

Relevantie-onderzoek gras op zand

Product 2



Relevantie-onderzoek gras op zand
Product 2

Auteur(s)

de heer ir. A. van Hoven

Relevantie-onderzoek gras op zand

Product 2

Opdrachtgever	Waterschap Drents Overijsselse Delta
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Erosie grasbekleding, golfklappen, golfoverslag, gras op zand, Vechtdijk, stabiliteit, reststerkte zand, afslag zand

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	12-08-2020
Projectnummer	11204369-002
Document ID	11204369-002-GEO-0005
Pagina's	98
Status	definitief

Auteur(s)

	A. van Hoven (Deltares)	
	R. Mom (Infram Hydren)	Hoofdstuk 3 en Bijlage A
	W.J. Klerk (Deltares)	Hoofdstuk 5 en bijlage C

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	ir. A. van Hoven	ir. T.P. Stoutjesdijk	ir. L. Voogt	
1.0	ir. A. van Hoven	ir. T.P. Stoutjesdijk	ir. L. Voogt	

Samenvatting

In opdracht van Waterschap Drents Overijsselse Delta wordt onderzoek uitgevoerd naar de erosiebestendigheid van grasbekledingen op een substraat van zand. Het onderzoek moet antwoord geven op de hoofdvragen [1]:

- 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 falen van grasbekledingen op kruin en binnentalud (GEKB) op zanddijken?

Met het antwoord op deze vragen wordt beoogd een goede onderbouwing te kunnen geven van de scope van de dijkversterking Vechtdijk. Een aantoonbare erosiebestendigheid van gras op zand zal de scope naar verwachting verkleinen.

In dit deelonderzoek wordt gekeken naar de relevantie van de erosiebestendigheid van de grasbekleding. Dit is om te voorkomen dat een eventueel positief onderzoeksresultaat, een aantoonbaar significant erosiebestendige grasbekleding op zand, uiteindelijk toch niet kan worden toegepast, omdat bijvoorbeeld andere mechanismen dominant worden en de bekleding daarom toch moeten worden verbeterd. Mechanismen die maatgevend kunnen worden bij een significante kans op golfoverslag zijn:

- Afschuiven van de bekleding bij golfoverslag.
- Macrostabieliteit binnenwaarts in combinatie met golfoverslag.

Daarnaast kunnen erosie door langsstroming en/ of (bijna niet te voorkomen) schades aan de grasbekleding dominant worden voor de overstromingskans. Ook is gekeken naar de hydraulische belasting langs de Vechtdijk, zijn deze belastingen naar verwachting houdbaar voor een gras op zand bekleding, die zeer waarschijnlijk minder erosiebestendig zal zijn dan gras op klei.

Voorafgaand aan de geplande grootschalige erosieproeven in het winterseizoen 2020-2021 is een go no-go moment, waarbij wordt besloten of moet worden doorgedaan met de investering in onderzoek naar gras op zand. De relevantiestudie dient ter ondersteuning van de hierbij te nemen beslissing.

Uit deze studie blijkt dat andere mechanismen slechts in beperkte mate dominant kunnen worden. Geotechnische instabiliteit van het binnentalud kan voor circa 10% van de uitgevoerde steekproef dominant worden, erosie door langsstroming eveneens voor circa 10%.

Uit een analyse van de hydraulische belasting blijkt dat de Vechtdijk voor het **buitentalud** circa 50% een zodanige rekenwaarde van de golfcondities heeft dat gras op zand het waarschijnlijk niet redt. Voor de andere 50% is nader onderzoek juist wel relevant. Voor de **kruin en het binnentalud** wordt verwacht dat voor circa 90% van de Vechtdijk onderzoek naar de erosiebestendigheid van gras op zand bij golfoverslag relevant is. Indien een sterkte kan worden aangetoond die gelijk is aan die volgt uit de Vechtdijk golfoverslagproeven uit 2010, dan voldoet 75% van de steekproef aan de doorsnede-eis signaleringswaarde.

Deze percentages kunnen stijgen met de komst van de nieuwe hydraulische databases, waarvan verwacht wordt dat deze gunstiger zijn. Ook een herverdeling van de standaard faalkansruimtes

van bijvoorbeeld piping naar de bekleding op het buitentalud kan voor de Vechtdijk nog een optimalisatie opleveren.

Er is gekeken naar veel voorkomende schades en het gevoerde beheer en onderhoud. Uit de studie blijkt dat het bijna onvermijdelijk is dat ook tijdens hoogwater schades aanwezig zullen zijn. Dit leidt naar verwachting echter niet direct tot catastrofaal falen van de dijk, omdat er een zekere reststerkte aanwezig is die zorgt voor vertraging van het doorbraakproces. Reststerkte van zand is in het algemeen gering, desalniettemin wordt in enkele gevallen uitgerekend dat de reststerkte onder golfwerking voldoende is. Deze reststerkte voorkomt snel catastrofaal falen en geeft ruimte voor het uitvoeren van noodmaatregelen.

Inhoud

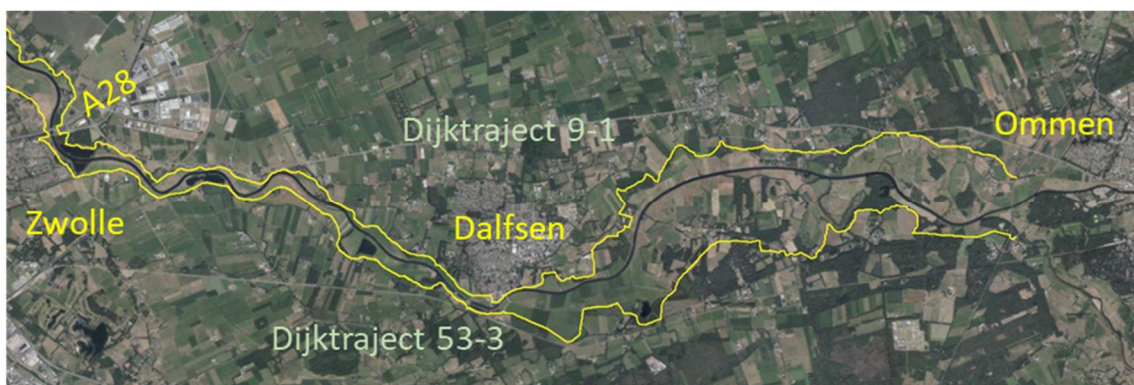
	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Uitvoerenden van het onderzoek	9
1.3	Doel	9
2	Geotechnische stabiliteit binnenwaarts	10
2.1	Inleiding	10
2.2	Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI)	10
2.3	Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)	13
3	Hydraulische belasting	19
3.1	Inleiding	19
3.2	Verwachting sterkte gras op zand	20
3.2.1	GEKB	20
3.2.2	GEBU	21
3.2.3	Erosiebestendigheid bij langsstroming	22
3.3	Steekproeven hydraulische belasting	24
3.3.1	GEKB uitgangspunten	24
3.3.2	GEBU uitgangspunten	25
3.3.3	Resultaten GEKB	26
3.3.4	Resultaten GEBU	29
3.3.5	Stroming	31
4	Reststerkte zanddijk bij golfaanval	33
4.1	Inleiding	33
4.2	Erosiemodel afslag zanddijk door golven	33
4.3	Uitgangspunten Vechtdijk	35
4.4	Berekende afslagprofielen Vechtdijk	39
5	Beheer en onderhoud	43
5.1	Inleiding	43
5.2	Samenhang tussen schades en overstromingskansen	43
5.3	Schades aan de Vechtdijken	44
5.4	Invloed van schade op dijkveiligheid	45
5.5	Conclusies schades beheer en onderhoud	45
6	Conclusies en overwegingen go no-go	47
6.1	Conclusies	47

6.2	Samenvatting overwegingen voor go/ no go beslissing	48
7	Referenties	50
A	Bijlagen bij hydraulische belastingen	51
A.1	Profielen	51
A.2	Uitvoerpunten	53
A.2.1	Uitvoerpunten 9-1	53
A.2.2	Uitvoerpunten 53-3	54
A.3	Waterstanden 9-1	55
A.4	Waterstanden 53-3	56
A.5	Faalkansen GEKB 9-1	57
A.6	Faalkansen GEKB 53-3	58
A.7	Overslagdebieten 9-1	58
A.8	Overslagdebieten 53-3	59
A.9	Golfcondities golfklapzone 9-1	60
A.10	Golfcondities golfklapzone 53-3	76
B	Stroomsnelheden Vecht hoogwater	93
B.1	1/1.000	93
B.2	1/10.000	94
C	Schades aan grasbekleding in kader van risico gestuurd beheer en onderhoud	95
D	Meting frontnelheden met beeldherkenning	96

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Uit de veiligheidsbeoordeling van de dijktrajecten 9-1 ten Noorden van de Overijsselse Vecht en 53-3 ten Zuiden van de Vecht 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 ontbreekt momenteel om een goede veiligheidsbeoordeling uit te voeren. Dit gegeven geeft een grote onzekerheid in de scope van de dijkversterking.



Figuur 1.1 Overzichtskaart Vecht en dijktrajecten 9-1 en 53-3

Voorafgaand aan de scope bepaling van de dijkversterking wordt in de periode tot en met december 2021 onderzoek gedaan naar de erosiebestendigheid van de grasbekleding op zand. De resultaten van het onderzoek moeten leiden tot een betrouwbare onderbouwing van de versterkingsopgave van de Vechtdijken. Het projectgebied ligt tussen de kruising met de A28 in het Westen tot het einde van de dijktrajecten bij Ommen in het Oosten (Figuur 1.1).

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

Dit rapport betreft de relevantiestudie, onderdeel van de voorstudie (1). Een aantoonbare erosiebestendigheid van gras op zand zal de scope van de dijkverbetering naar verwachting verkleinen. In het kader van deze relevantiestudie is gekeken of er inhoudelijke redenen zijn waarom een aantoonbaar significante erosiebestendigheid van gras op zand eventueel niet leidt tot een impact op de scope. In dat geval is het niet doelmatig om hierin te investeren en daarom is er voorafgaand aan de geplande grootschalige erosieproeven een go no-go moment. De relevantiestudie dient ter ondersteuning van de hierbij te nemen beslissing.

1.2 Uitvoerenden van het onderzoek

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

- Deltares (hoofdaannemer).
- Waterschap Drents Overijsselse Delta (Oprichtgever).
- Infram Hydren.
- Radboud Universiteit Nijmegen.
- Van der Meer Consulting.
- Wageningen Environmental Research (WnR).
- EurecoAdvies.
- Universiteit Twente.
- Lumbricus.

Elk van de partijen vervult hierin een rol, zoals beschreven in [1]. Onderhavig rapport is opgesteld door Deltares. De berekeningen die gepresenteerd worden in hoofdstuk 3 en bijlage A zijn uitgevoerd door Infram Hydren.

1.3 Doel

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

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

Deze hoofdvragen zijn overgenomen uit Plan van Aanpak behorende bij dit onderzoek [1].

Het is belangrijk dat indien een behoorlijke erosiebestendigheid van gras op zand wordt aangetoond, dit ook leidt tot een beperking van de scope. Als andere faalmechanismen dominant zijn of worden, dan heeft het onderzoek voor de betreffende dijkvakken geen positieve invloed op de scope. Zo kan een relatief hoge kans op golfoverslag leiden tot stabiliteitsproblemen van het binnentalud. De erosiebestendigheid van de grasmat kan dan wel voldoende zijn, maar de dijk moet toch worden versterkt omdat de stabiliteit bij golfoverslag onvoldoende is. Verder is gekeken naar de uitwerking van ontwikkelingen op het gebied van de berekening van hydraulische belastingen, naar het voorkomen van schades, beheer en onderhoud en de invloed hiervan op de overstromingskans.

2 Geotechnische stabiliteit binnenwaarts

2.1 Inleiding

Met geotechnische instabiliteit van het binnentalud worden bedoeld de mechanismen:

- Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI) en
- Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI).

De beschikbare berekeningswijzen voor GABI valt in het WBI2017 in groep 4. Voor GABI zijn geen veiligheidsfactoren in het kader van het WBI2017 afgeleid. STBI valt in groep 2, voor dit spoor wordt een semi-probabilistische berekening uitgevoerd die door extrapolatie leidt tot een afstand tot de norm. In het KPR Factsheet werkwijze macrostabieliteit i.c.m. golfoverslag OI2014v4 [3] wordt beschreven hoe het effect van golfoverslag op het mechanisme macro-instabiliteit van het binnentalud in rekening kan worden gebracht.

Er is een zekere overlap tussen GABI en STBI voor dijken met een redelijke kans op golfoverslag. Bij het optreden van golfoverslag zal water in de dijk kunnen infiltreren, waarbij zowel diepe als ondiepe glijvlakken kunnen optreden. Normaal worden bij STBI alleen de diepe glijvlakken beschouwd, omdat ondiepe glijvlakken, zonder golfoverslag, niet snel leiden tot een overstroming. Echter, zoals ook beschreven in het factsheet, verandert dit als er wordt gekeken naar het scenario van taludinstabiliteit, gegeven golfoverslag. In dat geval kunnen ook ondiepe glijvlakken een significant risico op een overstroming geven, omdat de kans op vervolgmecanismen, zoals erosie en secundaire glijvlakken, leidend tot een bres dan veel groter is.

2.2 Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI)

De WBI2017 beoordeling van spoor GABI bevat een eenvoudige toets op basis van kenmerken. De faalkans van de bekleding wordt als verwaarloosbaar verondersteld indien wordt voldaan aan een van de voorwaarden:

- Het overslagdebiet q is kleiner dan $0,1$ l/s/m (bepaald bij de norm).
- De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1V:5H en bestaat niet uit veen.
- De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1V:3H en de dijk bestaat uit stevige klei (zie Schematiseringshandleiding grasbekleding).
- De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1V:4H en de dijk bestaat uit klei die niet als stevig wordt gekwalificeerd.
- De dijk bestaat uit zand, al dan niet voorzien van een kleibekleding, en heeft een goed werkende drainage in de binnenteen.

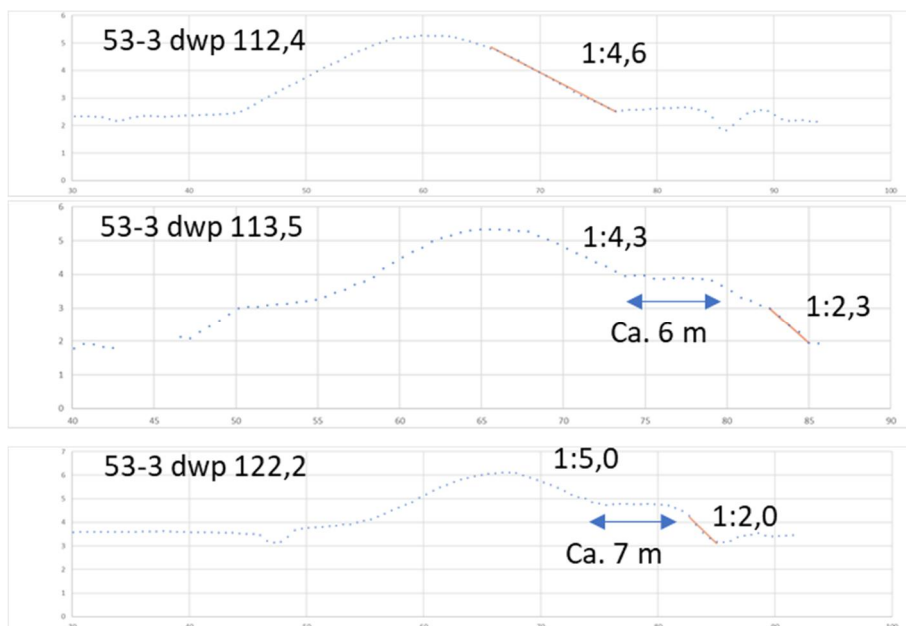
De Vechtdijk bestaat volledig uit zand en heeft voor zover bekend geen goed werkende drainage in de binnenteen. Hiermee wordt bedoeld een voorziening, bijvoorbeeld een grindkoffer met filterdoek of drainagebuis, die ervoor zorgt dat er geen uitredend grondwater in de teen optreedt bij hoge buitenwaterstanden.

Met Riskeer is voor een steekproef het golfoverslagdebiet bij de norm – signaleringswaarde bepaald, daarnaast is ook de taludhelling van het binnentalud bepaald. De norm-signaleringswaarde voor traject 9-1 is $1/1.000$ jr⁻¹ en voor traject 53-3 $1/10.000$ jr⁻¹. Omdat de Vechtdijk volledig uit zand bestaat is de kritische helling van het binnentalud 1:5. Het resultaat staat in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Overslagdebiet q (l/s per m) bij de norm – signaleringswaarde en de helling van het binnentalud 1:.. voor steekproeven op traject 53-3 en 9-1

Traject 53-3 Dwarsprofiel	q_norm (l/s per m)	Taludhelling Binnentalud 1:..	Traject 9-1 Dwarsprofiel	q_norm (l/s per m)	Taludhelling Binnentalud 1:..
101,4	0	5,4	21,2	0,02	5,1
101,9	0	5,5	20,4	0	4,0
102,7	0	5,4	19,8	0,08	4,0
104	0,05	5,0	19,2	0	5,5
104,4	0,01	5,4	18,7	0,01	5,1
104,7	0	5,6	18,2	0	5,5
106,9	0	4,0	18	0	4,4
107,4	0,04	5,2	17,4	0	5,5
108,6	0	4,6	16,2	0	6,3
109,4	0	5,5	15,6	0,01	4,3
110,1	0	4,5 / 2,4	14	0	4,5
111	0,06	4,2 / 2,0	12,9	0	5,9
112,4	0,42	4,6	12,5	0,01	-
113,1	0,27	5,6	11,7	0	5,6
113,5	0,37	4,3 / 2,3	9,2	0	7,8 / 2,0
117,1	0	7	2,6	0	- / 2,0
121,6	0,01	4,5	2,3	0	- / 2,0
122,2	0,12	5,0 / 2,0			
122,5	0,01	-			

Van de 36 steekproeven zijn er 3 die niet voldoen aan de voorwaarden van de eenvoudige toets. Voor traject 9-1 voldoen alle profielen aan de voorwaarde voor het golfoverslagdebiet. De profielen die niet aan de voorwaarden voldoen staan in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Dwarsprofielen die niet voldoen aan de eenvoudige toets GABI (let op schaal verticaal en horizontaal niet gelijk)

De gedetailleerde toets wordt uitgevoerd met de formules in bijlage D uit de schematiseringshandleiding grasbekledingen WBI2017 [5]. Het relevante scenario is die van een zanddijk met het talud boven water. Er wordt getoetst op het uitspoelen van zandkorrels bij horizontaal uittredend grondwater en het oppervlakkig afschuiven van zand bij horizontaal uittredend grondwater.

Uitspoelen wordt gecontroleerd met de formule:

$$\tan \alpha \leq \sqrt{\frac{\rho_g - \rho_w}{\rho_w \cdot \gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{m,\rho}}}$$

Waarin:

- ρ_g Volumieke massa natte grond [kg/m^3].
- ρ_w Volumieke massa water [kg/m^3].
- $\gamma_{m,\rho}$ Partiële veiligheidsfactor op volumieke massa grond (=1,0) [-].
- α Taludhelling [$^\circ$].
- $\gamma_d \cdot \gamma_n$ Modelfactor x schadefactor (=2) [-].

Bij een verzadigde volumieke massa van 2000 kg/m^3 (gangbaar voor verzadigd zand), is de maximaal toegelaten taludhelling iets steiler dan 1:1,5. Elk van de profielen voldoet hieraan.

Afschuiven van een zandtalud boven water, bij horizontaal uittredend grondwater wordt gecontroleerd met de formule:

$$\tan \phi' \geq \frac{\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{m,\phi} \cdot \rho_g \cdot g \cdot \sin \alpha}{\rho_g \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{\rho_w \cdot g}{\cos \alpha}} \quad \text{of in de vorm van een stabiliteitsfactor SF:}$$

$$SF = \frac{1}{\gamma_n \gamma_d} \frac{\left(\rho_g \cdot \cos \alpha - \frac{\rho_w}{\cos \alpha} \right) \tan \phi'}{\rho_g \cdot \sin \alpha}$$

Waarin:

ϕ'	Hoek van inwendige wrijving [°].
$\gamma_{m,\phi}$	=1,1 (let op deze gaat over $\tan \phi'$, niet over ϕ') [-].
ρ_g	Volumieke massa natte grond [kg/m ³].
ρ_w	Volumieke massa water [kg/m ³].
α	Taludhelling [°].
g	Zwaartekrachtsversnelling [m/s ²].
$\gamma_d \cdot \gamma_n$	Modelfactor x schadefactor (=1,1x1,1=1,21) [-].

Bij een volumieke massa van de grond van 2000 kg/m³ (gangbaar voor verzadigd zand), en een karakteristieke waarde van $\phi'=33,4^\circ$, zoals aangehouden in de door het waterschap aangeleverde berekeningen en rapportages [6] en [7], is de maximaal toegelaten taludhelling ongeveer 1:4,3. Daarmee voldoet ook profiel 53-3 112,2 en de bovenste taluddelen van de profielen 53-3 113,5 en 53-3 122,2. Enkel de steile onderste taluddelen van deze profielen voldoen niet aan de gedetailleerde toets op (oppervlakkig) afschuiven conform [5].

In het kader van deze relevantiestudie wordt geconcludeerd dat GABI bij een kleine 5% van de steekproef niet voldoet aan de voorwaarden van de eenvoudige en gedetailleerde toets, waarbij een steil stukje ondertalud hiervoor verantwoordelijk is. Dit beeld komt overeen met de conclusies ten aanzien van STBI (zie paragraaf 2.3).

De reden dat ook het stukje ondertalud op stabiliteit wordt beoordeeld is de voorwaardelijke conditie van golfoverslag. Een afschuiving van dit talud legt de zandkern bloot, waarna erosie door golfoverslag kan leiden tot een doorbraak. Er zal in deze specifieke gevallen, met relatief lage golfoverslagdebieten, nog wel heel wat materiaal moeten eroderen voordat de kruin wordt aangetast. Gevalideerde rekenregels voor de erosiesnelheid van zanddijken bij golfoverslag of overloop zijn echter nog niet in gebruik.

2.3 Macrostabiteit binnenwaarts (STBI)

Steekproefsgewijs is gekeken naar macrostabiteit binnenwaarts in combinatie met golfoverslag. Er is hiervoor gebruik gemaakt van het KPR factsheet [3] en van de door het waterschap aangeleverde stabiliteitsberekeningen en rapportages hiervan [6] en [7]. De berekeningen zijn gemaakt met Deltares projectsoftware die het rekenhart van D Geostability versie 18.1.0.564 aanroept. De grondparameters zijn overgenomen uit de aangeleverde berekeningen. Omdat de taluds langs de Vechtdijk in het projectgebied flauw zijn en het dijksmateriaal uit zand bestaat is de taludstabiliteit zonder golfoverslag ruim voldoende.

Er zijn drie profielen gekozen waar met behulp van het KPR factsheet is gekeken of de stabiliteit ook voldoende is indien rekening wordt gehouden met de kans op golfoverslag. De profielen zijn gekozen op i) een (relatief) lage stabiliteitsfactor en ii) een groot hoogteverschil tussen kruin en achterland en iii) minimaal één profiel per traject (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Profielen steekproef

Traject/ vak	Profiel
9-1 vak 13 (12,9-15,9)	15,3
9-1 vak 15 (19,6-22,1)	21,4
53-3 (111,8 – 113,6)	113,5

Volgens het KPR factsheet moet naast het (reguliere) scenario met een waterstand bij de norm, ook een berekening worden gemaakt met het scenario met golfoverslag. Beide berekeningen moeten voldoen aan de gestelde eisen. De eis die aan de taludstabiliteit wordt gesteld voor het scenario met golfoverslag is afhankelijk van de kans op golfoverslag. Hoe kleiner de kans op golfoverslag, hoe lager de eis die wordt gesteld aan de kans op falen van het talud, gegeven golfoverslag. De faalkanseis op doorsnedeniveau voor STBI $P_{eis,dsn,stbi}$ en de faalkanseis gegeven golfoverslag $P_{T,stbi,q}$ worden als volgt berekend:

$$P_{eis,dsn,stbi} = f_{stbi} P_{max} / \left(1 + a \frac{L}{b} \right)$$

$$P_{T,stbi,q} = P_{eis,dsn,stbi} / P(q \geq 1 \text{ l/s per m})$$

Waarin:

P_{max} Norm traject overstromingskans

f_{stbi} faalkansruimte stbi (default 0,04)

L Trajectlengte (m) 9-1 39.200 m, 53-3 36.400 m

a Factor default 0,033 (-)

b Mechanisme lengte default 50 m

De schadefactor γ_n wordt als volgt berekend:

$$\gamma_n = 0,15 \beta_{T,stbi,q} + 0,41$$

$$\beta_{T,stbi,q} = -\Phi^{-1} \left(P_{T,stbi,q} \right)$$

De eis aan de stabiliteitsfactor uit het glijvlakmodel volgt uit de vermenigvuldiging met de modelfactor en de schematiseringsfactor. De modelfactor γ_d is afhankelijk van het gebruikte model, 1,11 voor model Bishop, 1,06 voor model LiftVan en 1,07 voor model Spencer .

Bij het ontwerpen van dijken wordt rekening gehouden met de schematiseringsfactor die afhankelijk is van de nauwkeurigheid van de schematisering en ligt in het algemeen tussen 1 en 1,2. Bij een beoordeling in het kader van het WBI2017 wordt geen gebruik gemaakt van een schematiseringsfactor, maar worden verschillende scenario's beschouwd en onzekerheden op die manier in rekening gebracht.

De kans op een golfoverslagdebiet groter of gelijk aan 1 l/s per m is voor de drie profielen berekend met Hydra-NL versie 2.7.1. De berekeningen zijn gemaakt in de testmodus waarbij de standaardafwijking van de modelonzekerheid van de waterstand is aangepast naar 0,15 (-) op basis van [2]. De overige berekeningsinstellingen zijn aangehouden conform de WBI2017 default instellingen. De resultaten staan in Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Waterstanden bij norm (m NAP), overschrijdingskans van $q = 1$ l/s per m en de waterstand in het illustratiepunt (m NAP) voor drie dwarsprofielen in dijktrajecten 9-1 en 53-3 langs de Vecht

Profiel	Uitvoerlocatie	kruin (m NAP)	waterstand norm ondergrens/ signalering (m NAP)	P($q > 1$ l/s per m)	Waterstand illustratiepunt (m NAP)
9-1 15,3	144	+4,55	3,69 / 3,88	1/50.000	4,24
9-1 21,4	206	+3,60	2,72 / 2,90	1/38.000	3,03
53-3 113,5	81	+5,35	4,71 / 4,85	1/62.000	4,76

De hiermee berekende schadefactoren en de eis aan de stabiliteitsfactor staan in Tabel 2.4, uitgaande van een schematiseringsfactor van 1,0 en een modelfactor van 1,1 voor model Bishop.

Tabel 2.4 Berekende eis aan de stabiliteitsfactor voor het scenario met golfoverslag

Profiel	$P_{eis,dsn,stbi}$ (jr^{-1})	$P_{T,stbi,q}$ (jr^{-1})	γ_n (-)	γ_d (-)	SF_{eis}
9-1 15,3	1/200.000	1/4,0	0,51	1,1	0,56
9-1 21,4	1/200.000	1/5,3	0,54	1,1	0,60
53-3 113,5	1/1.880.000	1/30	0,69	1,1	0,75

Hierbij wordt opgemerkt dat de relatie tussen de schadefactor en de betrouwbaarheidsindex is afgeleid voor beta's vanaf circa 2,5 en dat de gevonden beta's veel lager zijn. Dit geeft een onnauwkeurigheid in het resultaat. Toepassing van de formule leidt tot een milde eis aan de stabiliteitsfactor voor het scenario met golfoverslag, hetgeen logischerwijs wordt verklaard door de zeer lage berekende kans op golfoverslag.

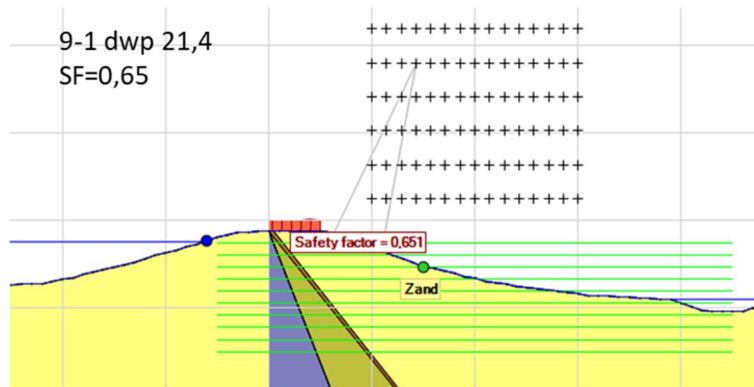
Met het model Bishop zijn in D-Geostability berekeningen gemaakt, waarbij de freatische lijn vlak onder het maaiveld is gelegd, waarmee wordt gemodelleerd dat de dijk als gevolg van golfoverslag helemaal verzadigd is, met een hydrostatische drukopbouw. Dit is een conservatieve aanname. De buitenwaterstand is conform het KPR Factsheet aangehouden op de waterstand in het illustratiepunt van de overslagberekening (Tabel 2.3). De resultaten van de berekeningen staan in Tabel 2.5. De hierbij berekende kritische glijvlakken staan in Figuur 2.2, Figuur 2.3 en Figuur 2.4.

Tabel 2.5 Berekende schadefactor en eis aan de stabiliteitsfactor voor het scenario met golfoverslag

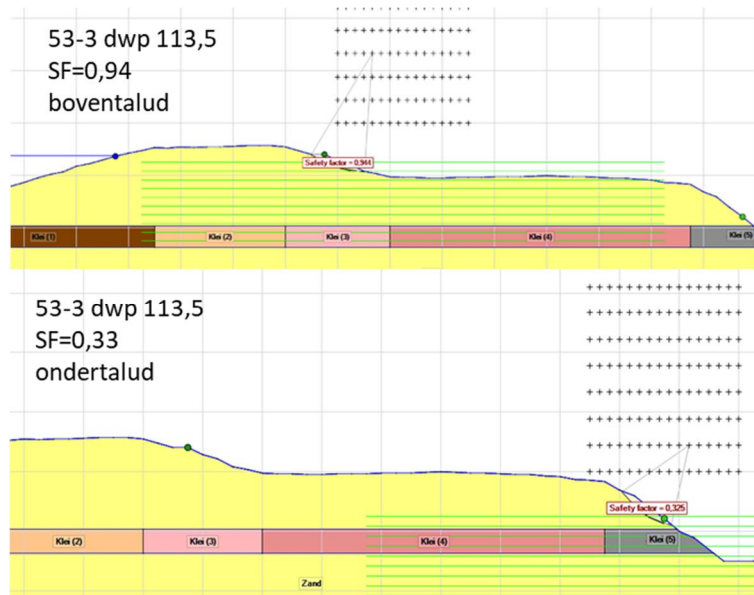
Profiel	SF_{eis}	$SF_{berekend}$	Lokale taludhelling rondom glijvlakje
9-1 15,3	0,56	0,93	1:3,4
9-1 21,4	0,60	0,65	1:2,7
53-3 113,5	0,75	boventalud 0,94 ondertalud 0,33	1:3,3 1:1,5



Figuur 2.2 Glijcirkel profiel 9-1 dwp 15,3 scenario overslag



Figuur 2.3 Glijcirkel profiel 9-1 dwp 21,4 scenario overslag



Figuur 2.4 Glijcirkels profiel 53-3 dwp 113,5 scenario overslag, boventalud (boven) ondertalud (onder)

Met uitzondering van het steile ondertalud van profiel 53-3 dwp 113,5 voldoen de profielen aan de eisen conform het KPR Factsheet. De berekende glijcirkels zijn zeer oppervlakkig, echter ook deze zijn relevant vanwege de voorwaardelijke combinatie met golfoverslag. Een oppervlakkige afschuiving beschadigt immers de bekleding, gegeven de situatie met golfoverslag, waardoor het onderliggende zand zal kunnen eroderen. In het geval van 53-3 dwp 113,5 zal echter flink wat materiaal moeten eroderen voordat dit leidt tot een kruindaling, een bres en een overstroming.

In theorie zal het meest kritische glijvlak in cohesieloos zand zo ondiep mogelijk zijn. Rekenkundig zal de bovenste zandkorrel op het lokaal steilste taluddeel de laagste stabiliteitsfactor hebben. De

stabiliteitsfactor zal in dat geval vooral afhankelijk zijn van de verhouding tussen taludhelling en de hoek van inwendige wrijving van het zand. Bij de bovenstaande berekeningen met de methode Bishop is een minimale glijvlaklengte van 2 m ingevuld, zodat er nog enige middeling in de taludhelling is.

De analyse van de drie steekproeven laat zien dat de faalkans van het binnentalud door geotechnische instabiliteit door golfoverslag bepaald wordt door 1) de taludhelling en 2) de kans op golfoverslag. Tevens laat de analyse zien dat taludhellingen van circa 1:3,5 à 1:4 en flauwer voldoen aan de lage eis ten aanzien van stabiliteit gegeven golfoverslag.

De kans op een golfoverslagdebiet groter dan 1 l/s per 'm is voor een grotere steekproef eveneens berekend met Ringtoets. De resultaten zijn samengevat in Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Berekende schadefactor en eis aan de stabiliteitsfactor voor het scenario met golfoverslag

53-3 Dwp.	1/P(q>1) (jr)	1/P _{T,stbi,q} (jr)	SF _{eis}	9-1 Dwp.	1/P(q>1) (jr)	1/P _{T,stbi,q} (jr)	SF _{eis}
101,4	2665.667	7	0,63	21,2	5.885	34	0,76
101,9	129.290	15	0,70	20,4	9.867	20	0,72
102,7	166.577	11	0,67	19,8	2.917	69	0,81
104	29.633	63	0,81	19,2	3.100	65	0,81
104,4	84.905	22	0,73	18,7	4.631	44	0,78
104,7	98.940	19	0,72	18,2	11.242	18	0,71
106,9	155.525	12	0,68	18	6.921	29	0,75
107,4	73.453	26	0,74	17,4	5.823	35	0,76
108,6	393.839	5	0,58	16,2	13.208	15	0,70
109,4	1.799.323	n.b.	n.b.	15,6	4.715	43	0,78
110,1	184.628	10	0,66	14	7.581	27	0,74
111	40.547	46	0,78	12,9	9.732	21	0,73
112,4	16.100	117	0,84	12,5	6.905	29	0,75
113,1	19.826	95	0,83	11,7	10.655	19	0,72
113,5	17.955	105	0,84	9,2	8.384	24	0,74
117,1	102.836	18	0,72	2,6	12.181	17	0,71
121,6	158.615	12	0,68	2,3	4.727	43	0,78
122,2	42.301	44	0,78				
122,5	121.449	15	0,70				

De hieruit volgende eis aan de stabiliteitsfactor voor het scenario met golfoverslag in deze grotere steekproef is nog altijd gering, variërend van circa 0,6 tot 0,8, gemiddeld 0,75. Dit is vanwege de in het algemeen lage kans op golfoverslag langs de Vechtdijk.

Voor dezelfde profielen is eveneens de globale helling van het binnentalud bepaald (zie Tabel 2.1 in paragraaf 2.2 GABI). Hierbij wordt opgemerkt dat op de lengteschaal van de berekende zeer oppervlakkige glijvlakken de taludhelling enigszins variabel is. Bij wat diepere glijvlakken middelt dit zich uit en is met name de globale taludhelling van belang, maar bij cohesieloos materiaal gaat de diepte van de glijcirkel (in theorie) naar de dikte van de bovenste zandkorrel, en zijn rekenkundig de steilste taludstukjes maatgevend. In de praktijk gaat dit echter niet op, omdat de bovenste paar decimeter van de dijk de wortels van de vegetatie het zand bij elkaar houden en

voorkomen dat er afschuivingen optreden door de wortels heen. Het glijvlak wordt zo in elk geval onder de sterk doorwortelde toplaag gedwongen en zal langer zijn, waardoor een zekere middeling van de taludhelling wel zal optreden.

Samenvattend:

- De stabiliteit bij het scenario zonder golfoverslag is voldoende gezien de beoordelingsresultaten van het waterschap.
- De eisen aan de stabiliteit bij het scenario met golfoverslag zijn gering, door de kleine kans op golfoverslag. De vereiste stabiliteitsfactor is in de orde van 0,75 (-).
- Glijvlakberekeningen volgens de methode Bishop laten zien dat zeer oppervlakkige en kleine glijvlakken kritisch zijn, waardoor zeer lokale steiltes in het talud maatgevend worden. Dit komt omdat het zand cohesieloos wordt gemodelleerd. Ook de kleine oppervlakkige glijcirkels voldoen overigens aan de eisen conform het KPR Factsheet.
- Globaal zijn de taludhellingen veel flauwer, 1:4,0 komt voor maar veelal is de helling flauwer tot 1:5,5 aan toe.
- Omdat de bovenste decimeters van het talud wel samenhang hebben door de vegetatie, zal een glijcirkel wat dieper worden gedwongen, waardoor enige uitmiddeling van taludhellingen zal optreden. Het kleine steilste stukje wordt niet meer dominant, de stabiliteitsfactor van wat diepere cirkels wordt hoger.
- Bij een lokale taludhelling van circa 1:3,5 gaat de stabiliteitsfactor voor een verzadigd talud richting 0,95 à 1 (eis orde 0,75). Gezien de veelal flauwere taluds en samenhangende grond in de bovenste decimeters wordt zeer waarschijnlijk voldaan aan de stabiliteitseisen.
- Uitzondering zijn enkele steile ondertaluds met een helling van ongeveer 1:2. Deze werden aangetroffen langs traject 53-3 ter hoogte van Dalfsen en nabij Ommen. Voor het optreden van een overstroming zal hier nog erosie van zandberm moeten plaatsvinden.

3 Hydraulische belasting

3.1 Inleiding

In het kader van de relevantiestudie zijn de hydraulische belastingen langs de Vechtdijk steekproefsgewijs inzichtelijk gemaakt. Het doel hiervan is om te kijken in hoeverre gras op zand naar verwachting zal presteren en of nader onderzoek naar gras op zand relevant is. Met hydraulische belasting wordt hoofdzakelijk bedoeld de golfcondities waarmee moet worden rekening gehouden op het buitentalud in de golfklapzone en het golfoverslagdebiet waarmee rekening moet worden gehouden op de kruin en het binnentalud. Binnen de beoordeling worden hiervoor respectievelijk de toetssporen *Grasbekleding erosie buitentalud* (GEBU) en *Grasbekleding erosie kruin en binnentalud* (GEKB) doorlopen

Grofweg kunnen de hydraulische belastingen hierbij in drie categorieën worden verdeeld:

1. 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. Middelmattige 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. 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.

De hydraulische belasting is bepaald met de huidige beschikbare databases. Er zijn verbeterde databases in aantocht, maar deze waren nog niet beschikbaar voor dit onderzoek. Verwacht wordt dat de hydraulische belastingen die volgen uit de nieuwe databases mogelijk gunstiger/ lager zullen zijn. Voor achtergronden hierover wordt verwezen naar de rapportage [2].

Naast de hydraulische belasting is dus ook de verwachte sterkte van gras op zand van belang bij de afweging of het onderzoek relevant is. Hierop wordt in paragraaf 3.2 ingegaan.

Indien de relevantie van verder onderzoek overeind blijft, dan is inzicht in de voorkomende hydraulische belastingen langs de Vechtdijk belangrijk in de keuze van de op te leggen belasting bij de grootschalige erosieproeven. Deze keuze zal in een later stadium van het project worden gemaakt.

Los van de toetssporen GEKB en GEBU is grofstoffelijk gekeken naar de stroomsnelheid door de Vecht tijdens hoogwater. Erosie door stroming is toetsspoor binnen het WBI. Een hoge stroomsnelheid wordt binnen het WBI niet erkent als bedreiging voor een overstroming, echter een grasbekleding op zand is kwetsbaarder dan de gangbare grasbekleding op klei. Daarnaast is erosie door stroming mogelijk van belang als wordt gekeken naar eventuele reststerkte na falen van de bekleding door ofwel overbelasting tijdens golfaanval of schade aan de bekleding door bijvoorbeeld graverij (Hoofdstuk 5).

Ten slotte is gekeken of de frontsnelheden van de overslagvolumes op basis van beeldherkenning en machine learning kunnen worden bepaald. Dit zou het op een aparte strook meten van hydraulische parameters overbodig kunnen maken, waardoor er meer ruimte (orde 1 dag) overblijft om daadwerkelijke erosieproeven uit te voeren. De metingen maken geen onderdeel uit

van de onderbouwing van een go no-go beslissing. De metingen zijn opgenomen in bijlage D, met als doel deze te bespreken in de projectgroep en op basis hiervan te beslissen of, en indien zo, hoe hiermee verder kan worden gegaan. De achtergrond van de methode wordt gegeven in [11]. Deze methode voor het meten van onder andere frontsnelheden is in ontwikkeling.

3.2 Verwachting sterkte gras op zand

Om te bepalen of de hydraulische belasting laag, significant of hoog is, wordt deze afgezet tegen de verwachte (nog niet aangetoonde) sterkte van de grasbekleding.

Voor deze verwachting zijn beperkte bronnen beschikbaar. In de voorgaande fase van het project is gekeken naar de stand van zaken ten aanzien van de kennis over gras op zand [8], daarnaast zijn onlangs proeven uitgevoerd op de IJsseldijk tussen Zwolle en Olst. Hiervan is nog geen definitieve rapportage beschikbaar, echter de conceptrapportages zijn besproken en bijna definitief. De resultaten van de uitgevoerde proeven zijn daarmee voldoende bekend voor het indicatieve gebruik dat nodig is voor deze studie. Voor het meenemen van de resultaten van deze proeven in de uiteindelijke analyse zijn de resultaten in meer detail noodzakelijk. Hiermee wordt bedoeld de analyse van de Vechtdijkproeven (na een go-beslissing) om te komen tot rekenwaarden voor erosieparameter voor gras op zand. In hoeverre de proeven bij Zwolle Olst representatief zijn zal moeten blijken uit een gedetailleerde vergelijking met de Vechtdijk.

3.2.1 GEKB

Voor het toetspoot GEKB wordt gebruik gemaakt van een kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet. In [8] wordt hiervoor op basis van de eerdere golfoverslagproeven op de Vechtdijk twee sets kansverdelingen gegeven, één set uit het Ol2014v4, voor een karakteristieke belastingduur van 3 uur, en de onderstaande Tabel 3.1 die is vervaardigd in het kader van een voorstudie voor het project Zwolle Olst. De voor deze kansverdelingen gehanteerde karakteristieke belastingduur was 5 uur. Het meest relevante scenario voor de Vechtdijk is die met versnellingsfactor $\alpha_a=1,4$; overgang van talud naar achterland en een golfhoogte van 0,5 m of 1 m.

Tabel 3.1 Kansverdelingen kritisch golfoverslagdebiet voor diverse scenario's

Scenario	Golfhoogte Hmo (m)	mu (l/s/m)	sigma (l/s/m)
Kruin, geen overgang $\alpha_a=1, \alpha_M=1, \alpha_S=1$	0,5	38	26
	1	14	4,9
	1,5	11	2,8
Talud geen overgang $\alpha_a=1,4, \alpha_M=1, \alpha_S=1$	0,5	9,3	4,5
	1	6,3	2,0
	1,5	5,9	1,3
(onvermijdelijke) overgang talud-achterland $\alpha_a=1,4, \alpha_M=1,1, \alpha_S=1,0$	0,5	2,4	0,77
	1	2,4	0,54
	1,5	2,7	0,50
'gemiddelde' overgang, zoals een boom op het binnentalud $\alpha_a=1,4, \alpha_M=1,5, \alpha_S=0,9$	0,5	1,2	0,33
	1	1,3	0,24
	1,5	1,9	0,37
Worst case overgang $\alpha_a=1,4, \alpha_M=1,8, \alpha_S=0,9$	0,5	1,0	0,29
	1	1,0	0,17
	1,5	1,4	0,23

Analyse van de profielen langs de Vechtdijk laat zien dat de taluds (binnen en buiten) flauw zijn en de kruin vaak behoorlijk breed is. De ervaring bij de proeven Zwolle Olst laat zien dat een brede kruin leidt tot een lagere belasting op het binnentalud. Verder betreft het relatief lage golven, kleine overslagvolumes. Dit zijn aanwijzingen dat de versnellingsfactor van 1,4 op het binnentalud waarschijnlijk niet wordt gehaald. Voor de Vechtdijk is daarom een nieuwe set kansverdelingen

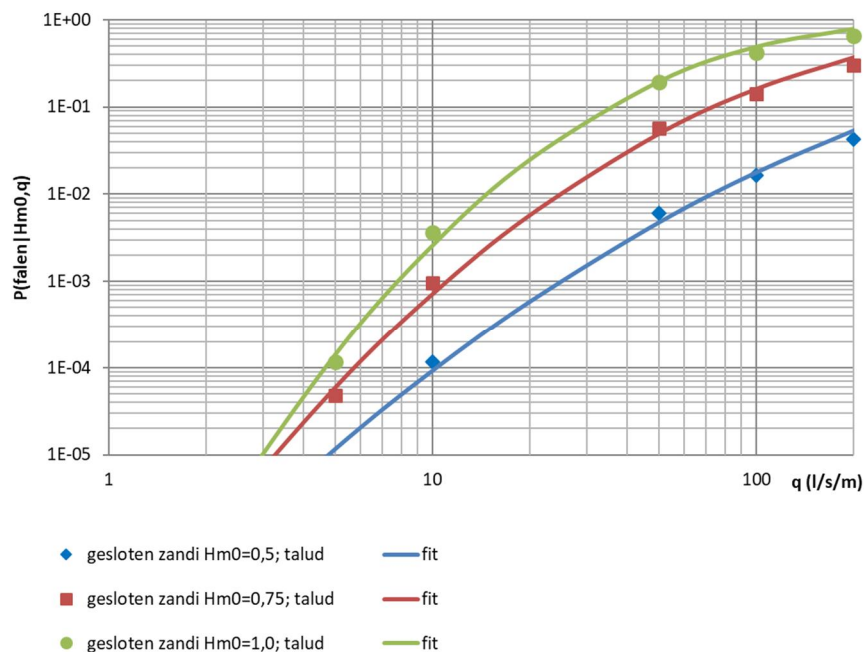
van het kritisch golfoverslagdebiet bepaald, bij een buitentalud van 1:3,5, een versnellingsfactor van 1,2. Voor de factor voor de overgang van talud naar achterland is aangehouden: $\alpha_M = 1,1$. De Vechtdijk heeft vaak een relatief geleidelijke overgang van talud naar achterland, waardoor deze factor misschien wat lager zou kunnen zijn.

Verder is voor de sterkte van de grasmat een kritische snelheid U_c van 3,5 m/s aangehouden met een standaardafwijking van 0,5 m/s en uitgaande van een normale verdeling, enkel op basis van de eerdere golfoverslagproeven op de Vechtdijk in 2010.

Dit leidt tot de volgende aangepaste kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet:

	μ_{qc} (l/s per m)	σ_{qc} (l/s per m)
Golfhoogte 0,5 m	7,6	1,4
Golfhoogte 0,75 m	5,6	1,1
Golfhoogte 1 m	4,6	0,8

In grafiekvorm staan deze verdelingen als de getrokken lijnen in Figuur 3.1.



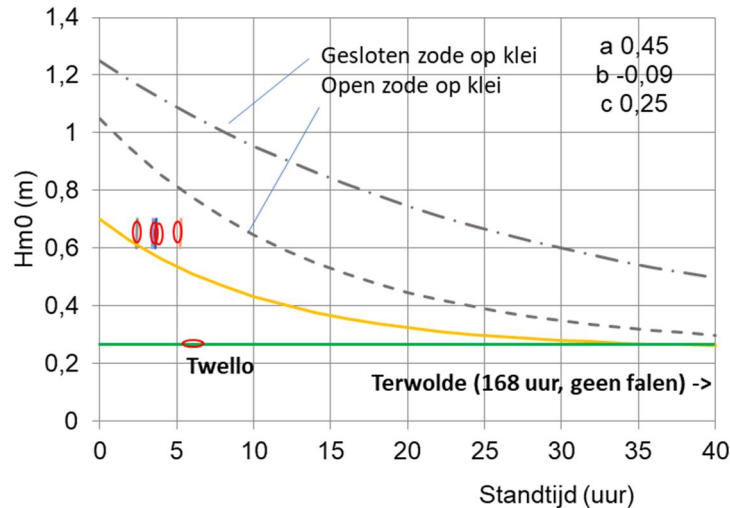
Figuur 3.1 Kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet q (l/s per m) voor een golfhoogte van 0,5; 0,75 en 1 m

3.2.2 GEBU

De beoordeling en het ontwerp van grastaluds op golfklappen vindt plaats met de zogenaamde standtijdlijnen. Deze lijnen geven de relatie weer tussen de standtijd van de grasbekleding en de golfhoogte. Met de grasbekleding wordt in dit geval enkel de toplaag bedoeld, dat is de sterk doorwortelde laag met een dikte van circa twee decimeter. Voor gras op een substraat van klei zijn deze lijnen beschikbaar, voor gras op zand nog niet.

Uit de kalibratiestudie GEBU blijkt dat voor de rekenwaarde van de standtijdlijn de 5% ondergrens geldt, zonder verdere veiligheidsfactoren [13]. Dit is mogelijk vanwege de strenge belasting die wordt gehanteerd, namelijk die bij de doorsnede-eis voor GEBU. Dit betekent dat de standtijdlijn aan de lage kant van de proefwaarnemingen zal komen te liggen.

In [8] zijn enkele beschikbare oude proeven van gras op zand in de standtijdlijn-grafiek gezet. In Figuur 3.2 is deze grafiek als basis gebruikt en zijn de twee resultaten van golfklapproeven bij Zwolle Olst toegevoegd. Bij de resultaten van deze proeven horen nog de nodige onzekerheden, met name in hoe het substraat moet worden geclassificeerd, als zand, als klei of een tussencategorie. De vergelijkbaarheid van deze grasbekleding met die op de Vechtdijk is mede daarom nog onzeker. Vanwege de onzekerheden rondom de belasting die door de klapgenerator wordt geleverd en het moment waarop falen optreedt zijn de punten ingetekend als 4 bolletjes rondom een golfhoogte van 0,6 à 0,7 m.



Figuur 3.2 Standtijd van de grasbekleding bij golfklappen uit [8] met toegevoegd het resultaat van twee golfklapproeven op de IJsseldijk tussen Zwolle en Olst. Getrokken groene lijn: resultaat proefstuk Terwolde, geen schade na 168 uur. Getrokken gele lijn: schatting 5% ondergrenslijn gras op zand.

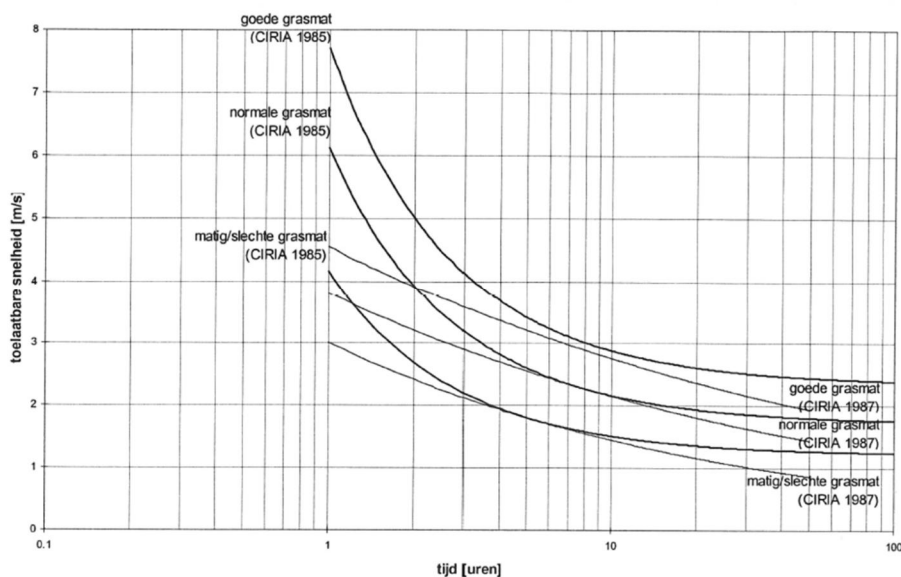
De standtijdlijnen worden gekarakteriseerd door de parameters a , b en c . De semi-probabilistische berekening van falen van de grasbekleding vindt plaats met de 5% ondergrens waarde van de standtijdlijn [13]. Op het oog is op basis van de beschikbare proefresultaten een eerste schatting gedaan van de parameters a , b en c . Dit is de oranje lijn in Figuur 3.2, gekarakteriseerd door $a=0,45$, $b=-0,09$ en $c=0,25$. De parameter c geeft de golfhoogte waaronder er ook gedurende lange tijd geen falen wordt verwacht. De som van parameter a en c ($=0,7$ m) is de golfhoogte waarbij modelmatig instantaan falen optreedt. De parameter b verzorgt de kromming van de lijn, deze is op het oog geschat zodanig dat deze gelijkvormig is met de lijn voor een open zode op klei.

Omdat de rekenkundige belastingduur langs de Vecht gelijk is aan 12 uur, is de kritische golfhoogte slechts 0,4 m. Gezien de grote onzekerheden omtrent het faalgedrag van gras op zand onder een golfklapbelasting zou dit ook wat meer of minder kunnen zijn. De bovengrens voor een gesloten zode op zand wordt waarschijnlijk gevormd door de standtijd voor een open zode op klei (ca. 0,6 m) of een gesloten zode op klei (ca. 0,9 m). Voor rekenwaarden van de golfhoogte die veel hoger zijn dan 0,6 m zal een gesloten zode op zand waarschijnlijk niet te handhaven zijn, tenzij de rekenwaarde van de belastingduur kan worden geoptimaliseerd, of eventuele reststerkte in rekening kan worden gebracht.

3.2.3 Erosiebestendigheid bij langsstroming

Er zijn geen stromingsproeven van gras op zand bekend. Voor een stroming van water over grasbekledingen op klei zijn de zogenaamde CIRIA krommes bruikbaar. Dit kan worden gezien als

een bovengrens van wat een gesloten zode op zand kan hebben. De krommes (versie 1985 en 1987) staan in Figuur 3.3.



Figuur 3.3 CIRIA krommes versie 1985 en 1987 voor een goede, normale en matige/slechte grasmat, stroomsnelheid tegen standtijd (uur)

De CIRIA versie 1987 krommes zijn wat conservatiever en naar verluidt komt dat omdat ze bedoeld zijn voor ontwerpdoeleinden [10]. De krommes zijn in [10] vergeleken met tot het jaar 2000 bekende proefresultaten van stroming over grasbekledingen, waarop is geconcludeerd dat CIRIA versie 1985 beter bij de proefresultaten aansluit. In de studie [10] wordt opgemerkt dat de kwaliteit van de grasmat vaak niet eenduidig is vastgelegd en dat de proeven waarop de krommes zijn gebaseerd jong gras betreft, van één of twee groeiseizoenen. Latere tests op meer ontwikkelde grasmatten gaven betere resultaten. Opgemerkt wordt dat het onderzoek naar de krommes gebeurde voor overloopcondities, wat een andere belasting geeft dan een langsstroming van een rivier.

Ervan uitgaande dat voor een ontwikkelde goede grasmat op klei zich ook laat karakteriseren door een 'gesloten zode' op klei conform het WBI2017, kan worden geconcludeerd dat deze voor een tijdsduur van 100 uur een stroomsnelheid kan hebben van orde 2,5 m/s (verwachtingswaarde). Dit is veel minder dan de in de cumulatieve overbelasting gebruikte kritische stroomsnelheid voor gras op klei. Binnen dit erosiemodel voor golfoverslag geldt voor een gesloten zode een verwachtingswaarde van 8 m/s, ruim 3x hoger dan de 2,5 m/s voor continue stroming. Het belastingregime en modellering zijn dus belangrijk bij het interpreteren van een kritische stroomsnelheid. De waarde van 2,5 m/s zal een absolute bovengrens zijn voor hetgeen een grasbekleding op zand kan hebben.

Bij de golfoverslagproeven op de Vechtdijk (2010) werd een kritische snelheid van 3,5 m/s vastgesteld voor gras op zand in golfoverslagcondities. De golfoverslagproeven op de IJsseldijk tussen Zwolle en Olst leiden tot een kritische stroomsnelheid van orde 5,5 m/s bij golfoverslag, met de kanttekening dat het substraat een vrij grote fractie fijn materiaal bevat, waaronder lutum. Waarschijnlijk was het aandeel fijn materiaal aanzienlijk meer dan bij de Vechtdijk. De beproefde IJsseldijk tussen Zwolle en Olst lijkt wat dat betreft tussen gras op zand en gras op klei in te zitten. Bij gebrek aan verdere kennis over een langdurige stromingsbelasting voor gras op zand zou als eerste schatting de factor 3 kunnen worden gebruikt die is gevonden voor gras op klei tussen de kritische snelheid onder golfoverslagcondities en die in stroomcondities. Dit leidt tot een kritische

stroomsnelheid van 3,5 gedeeld door 3, ofwel iets meer dan 1 m/s (verwachtingswaarde) voor gras op zand voor een langdurige stromingsbelasting.

Deze schatting is zeer grofstoffelijk, indien stroming kritisch blijkt voor de scope van het dijkversterkingsproject, dan verdient het de aanbeveling hier nader onderzoek naar te doen. Bekend is dat er tijdens recente hoogwaters geen schade door langsstroming is opgetreden, gekeken zou kunnen worden wat de belasting hierbij mogelijk is geweest, om een minimale sterkte aan te tonen. Daarnaast kan ook worden gedacht aan experimenteel onderzoek naar een continue stroming over gras op zand.

3.3 Steekproeven hydraulische belasting

3.3.1 GEKB uitgangspunten

Voor het bepalen van de faalkans voor het toetsspoor GEKB zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Software: Ringtoets v18.1.1.3
- HB-database: WBI2017_Vechtdelta_9-1_v01
- HB-database: WBI2017_Vechtdelta_53-3_v01
- Profiellocatie en -schematisatie:
 - Bij de beoordeling van het toetsspoor GEKB voor dijktraject 9-1 is conform [6] voor 10 profielen de faalkans bepaald. De prfl-bestanden (met schematisering van het golfoploopprofiel, dijknormaal en, indien van toepassing, voorland) inclusief een shape-bestand met de locaties van deze profielen zijn op basis van de door WDODelta aangeleverde Ringtoets-bestanden gegenereerd. Deze bestanden zijn zonder verdere aanpassing gebruikt voor de sterkte berekeningen. Door Deltares zijn 17 extra profielen (zie Bijlage A.1) geselecteerd en aangeleverd voor het berekenen van de faalkans. Ook deze bestanden zijn zonder verdere aanpassing gebruikt voor de sterkte berekeningen. In totaal zijn dus voor 27 profielen berekeningen uitgevoerd (zie Bijlage A.1)
 - Bij de beoordeling van het toetsspoor GEKB dijktraject 53-3 is conform [7] voor 12 profielen de faalkans bepaald. Door WDODelta zijn de prfl-bestanden (met schematisering van het golfoploopprofiel, dijknormaal en, indien van toepassing, voorland) inclusief een shape-bestand met de locaties van deze profielen aangeleverd. Deze bestanden zijn zonder verdere aanpassing gebruikt voor de sterkte berekeningen. Door Deltares zijn 19 extra profielen (zie Bijlage A.1) geselecteerd en aangeleverd voor het berekenen van de faalkans. Ook deze bestanden zijn zonder verdere aanpassing gebruikt voor de sterkte berekeningen. In totaal zijn dus voor 27 profielen berekeningen uitgevoerd (zie Bijlage A.1).
- Koppeling uitvoerpunt HB-database aan profiel: zie Bijlage A.1. In Bijlage A.2 is de ligging van de verschillende uitvoerpunten weergegeven.
- Verwachtingswaarde en standaardafwijking van het kritieke overslagdebiet: De voor de verschillende berekeningen gehanteerde waarden voor het kritieke overslagdebiet zijn weergegeven in onderstaande tabel. Uitgangspunt hierbij is dat de kwaliteit van de graszode gesloten is.

Tabel 3.2 Verwachtingswaarde en standaardafwijking kritieke overslagdebiet per berekening

Berekening	H_s [m]	μ [m ³ /s/m]	σ [m ³ /s/m]
WBI gesloten zode op klei [5]	0-1	0,225	0,25
zand;0,5 (Figuur 3.1)	0,5	0,0076	0,0014
zand;0,75 (Figuur 3.1)	0,75	0,0056	0,0011
zand;1,0 (Figuur 3.1)	1,0	0,0046	0,0008
zand;0,5 extra (Tabel 3.1)	0,5	0,0024	0,00077
zand;1,0 extra (Tabel 3.1)	1,0	0,0024	0,00054

Tegelijkertijd met het maken van de sterkte berekening is ook het overslagdebiet berekend bij een overschrijdingsfrequentie getalsmatig gelijk aan de ondergrens van categorie II_v voor toetsspoor GEKB. De ondergrens van deze categorie is gelijk aan signaleringswaarde op doorsnedeniveau $P_{eis;sig;dsn}$ en wordt gegeven door:

$$P_{eis;sig;dsn} = \frac{\omega P_{eis;sig}}{N_{dsn}}$$

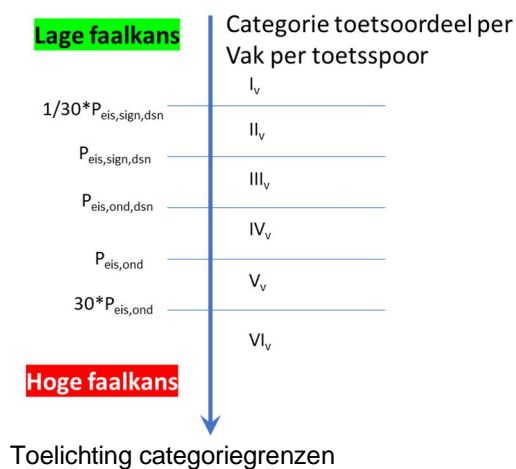
Hierin is ω de standaard faalkansruimtefactor voor het toetsspoor GEKB (=0,24), $P_{eis;sig}$ de signaleringswaarde van het traject (=1/1.000 en 1/10.000 voor respectievelijk traject 9-1 en 53-1 en N_{dsn} de lengte-effect factor (=2,0 en 1,0 voor respectievelijk voor traject 9-1 en 53-3).

Gelet op bovenstaande wordt $P_{eis;sig;dsn}$ voor traject 9-1 en 53-3 respectievelijk 1/8.333 en 1/41.667 per jaar. De uitgangspunten voor het bepalen van dit overslagdebiet zijn verder hetzelfde als voor de sterkteberekening.

3.3.2 GEBU uitgangspunten

Voor het bepalen van de golfcondities voor het toetsspoor Grasbekleding erosie buitentalud GEBU zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

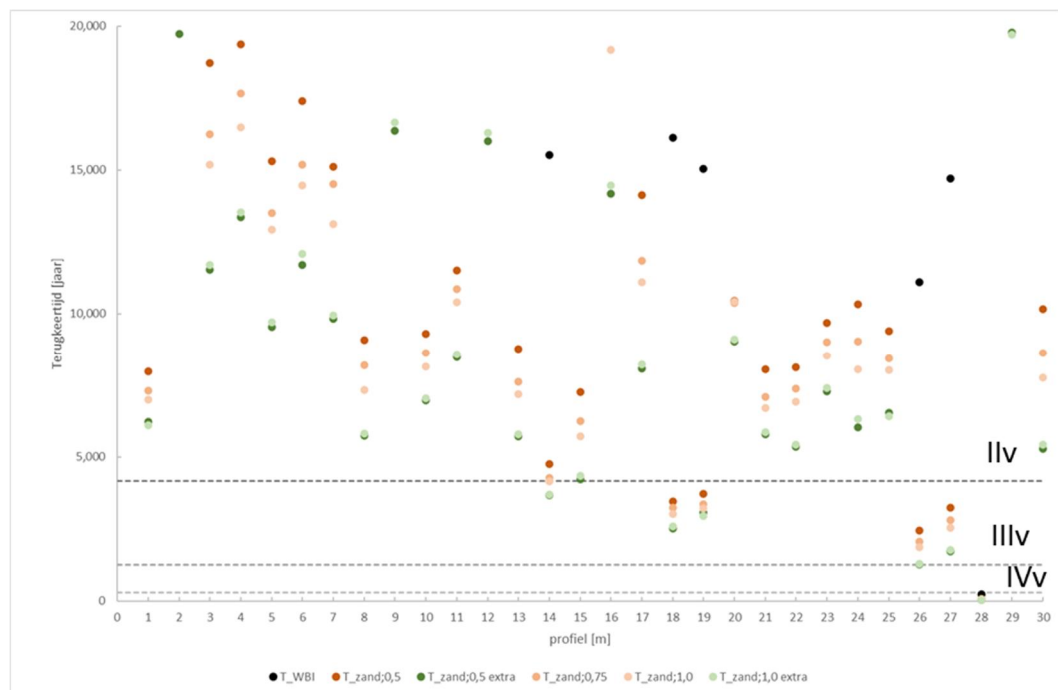
- Software: Hydra-NL v2.7.1
- HB-database: WBI2017_Vechtdelta_9-1_v01
- HB-database: WBI2017_Vechtdelta_53-3_v01
- Overschrijdingsfrequentie: de golfcondities worden bij een overschrijdingsfrequentie getalsmatig gelijk aan de ondergrens van categorie II_v voor toetsspoor GEBU bepaald. De ondergrens van deze categorie is gelijk aan signaleringswaarde op de doorsnedeniveau. Omdat voor het toetsspoor GEBU de standaard faalkansruimtefactor 0,05 wordt $P_{eis;sig;dsn}$ voor traject 9-1 en 53-3 respectievelijk 1/40.000 en 1/200.000 per jaar (zie onderstaande toelichting voor de categoriegrenzen).



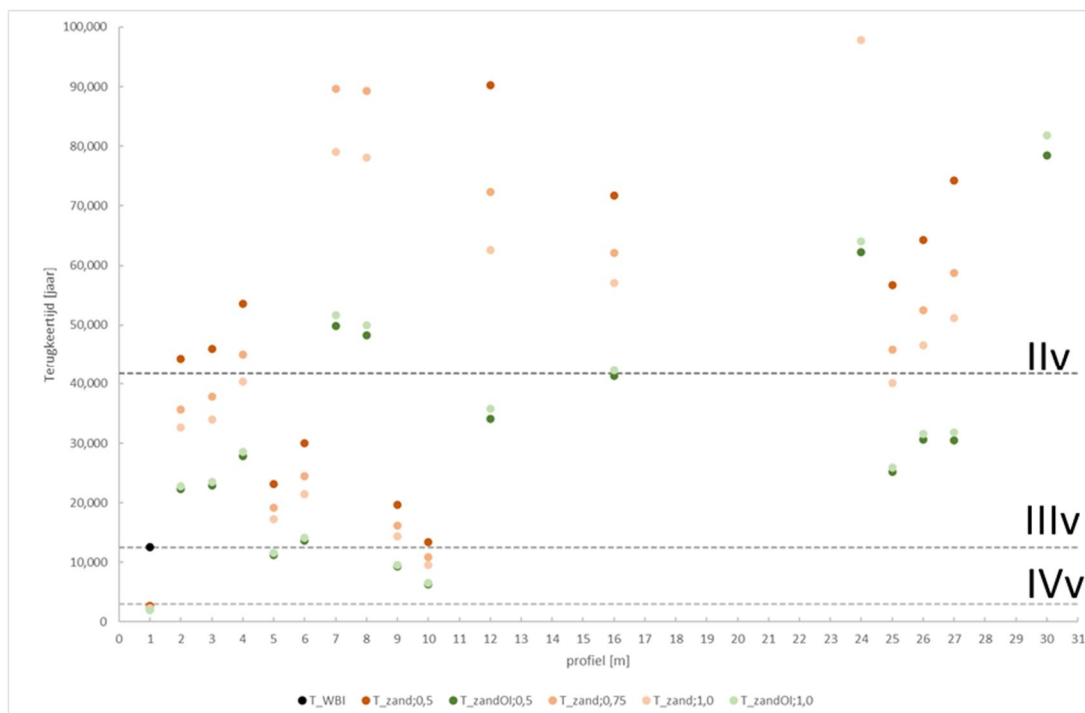
- Profiel: de profielen die zijn gebruikt voor het bepalen van zowel de faalkans voor het toetsspoor GEKB als het overslagdebiet zijn gebruikt voor het bepalen van de golfcondities. Opgemerkt wordt dat voor het bepalen van de golfcondities alleen de dijknormaal en (een) eventuele schematisering van het voorland wordt gebruikt.
- Type bekleding: de golfcondities per waterstandsniveau zijn bepaald voor het bekledingstype 'Grasmat golfklapzone (invloed golfinvalshoek, voor ToM)'. De coëfficiënten 'a', 'b' en 'c' van de belastingfunctie ($S=H_s^a T_p^b (\cos\beta)^c$) van dit type bekleding zijn respectievelijk 1,0; 0,67 en 0,67. In tegenstelling tot het bekledingstype 'Grasmat golfklapzone', waar de waarde van coëfficiënt c gelijk is aan 0, wordt bij dit bekledingstype het bepalen van de golfcondities de golfrichting meegewogen.
- Laagste en hoogste waterstand: bij het beoordelen van een grasbekleding in de golfklapzone wordt gesteld dat grasbekledingen onder de waterstand met een overschrijdingskans getalsmatig gelijk aan 1/10 per jaar niet meer onder de beoordeling valt (de golfklapzone loopt dan ook van de waterstand met een terugkeertijd van 10 jaar tot de waterstand bij categorie IIv). Beide waterstanden worden bepaald met Hydra-NL (zie Bijlage A.3). Voor de laagste waterstand wordt de gevonden waterstand met een terugkeertijd van 10 jaar naar beneden afgerond op 1 decimaal. De hoogste waterstand is gelijk aan de waterstand bij categorie IIv – 0,01 m.
- Stapgrootte: voor het bepalen van de golfcondities wordt een stapgrootte van 0,5 m aangehouden.

3.3.3 Resultaten GEKB

In de tabel in Bijlage A.5 (9-1) en A.6 (53-3) is per profiel voor de verschillende berekeningen de terugkeertijden ($=1/P_f$) en indicatieve golfhoogte weergegeven. In onderstaand Figuur 3.4 en Figuur 3.5 zijn per profiel de berekende terugkeertijden visueel weergegeven. De in het WBI voor het toetsspoor GEKB gehanteerde categoriegrenzen voor het oordeel zijn ook weergegeven (Ondergrens categorie IIv: signaleringswaarde; ondergrens categorie IIIv: ondergrenswaarde).



Figuur 3.4 De terugkeertijd per profiel voor verschillende berekeningen 9-1



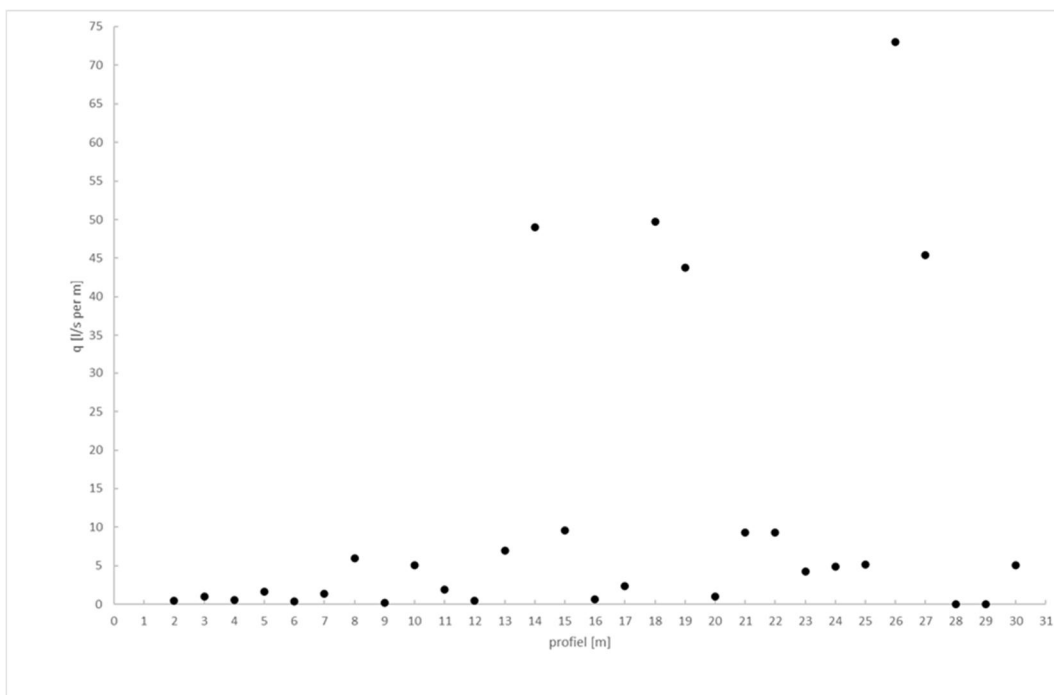
Figuur 3.5 De terugkeertijd per profiel voor verschillende berekeningen 53-3

Met de waarden van het kritieke overslagdebiet die bij de gedetailleerde toets van het WBI voor golfhoogteklasse 0-1 m, gesloten zode op klei, worden gebruikt valt de faalkans voor bijna elk profiel minimaal in categorie IIv. Uitzonderingen zijn profiel 2058 van traject 9-1 (ID = 28) en profiel 101 van traject 53-3 (ID = 1). Voor beide profielen is niet overslag maar overloop dominant en wordt een (relatief) grote faalkans gevonden.

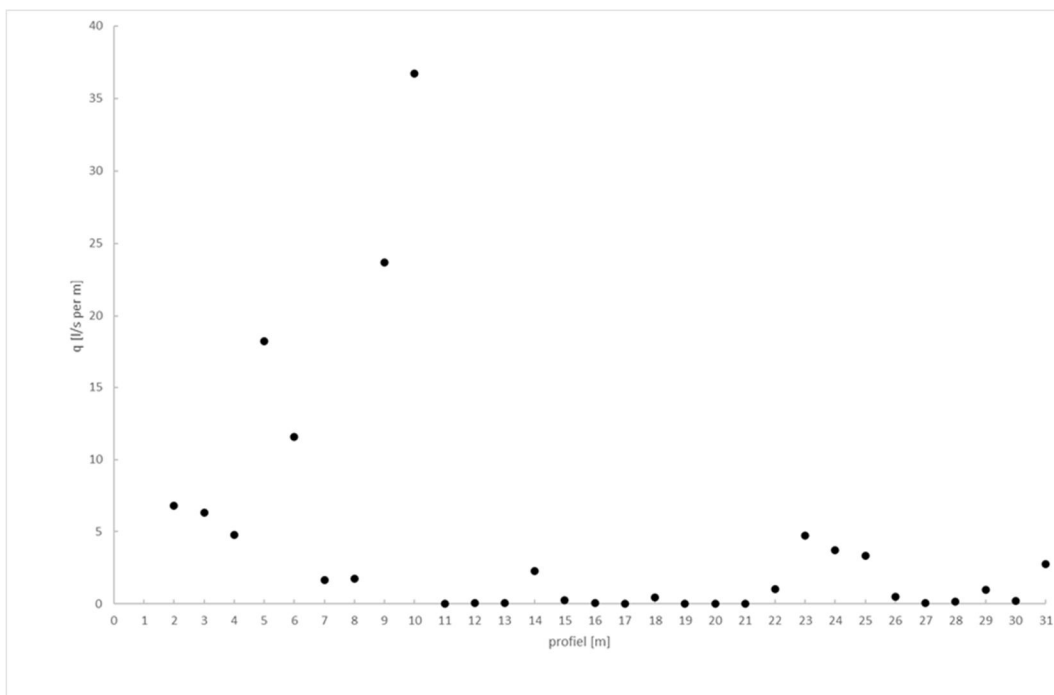
Uit de berekeningen blijkt verder dat de indicatieve golfhoogte voor bijna elk profiel kleiner is dan 0,5 m (zie Bijlage A.5 en A.6). Voor de verdere analyse van de resultaten is dan ook alleen het resultaat van de berekeningen 'zand;0,5' en 'zand;0,5 extra' gebruikt (zie ook paragraaf 3.2). De terugkeertijden voor deze berekeningen zijn logischerwijs kleiner dan de met de waarden van het WBI gevonden terugkeertijden op basis van gras op klei, maar voor de meeste profielen valt de faalkans met beide berekeningen nog in categorie IIv of IIIv. Uitzondering zijn profielen 268 (ID = 5), 360 (ID = 9) en 390 (ID = 10) van traject 53-3. Hiervoor valt de faalkans voor berekening 'zand;0,5 extra' in categorie IVv. Voor profiel 2058 en profiel 101 van traject 9-1 valt de faalkans in categorie Vv.

Over het algemeen kan worden geconcludeerd dat met waarden van het kritieke overslagdebiet voor gras op zand een grotere faalkans/ kleinere terugkeertijd wordt gevonden dan voor gras op klei, maar dat voor de meeste profielen dit niet tot een ander oordeel leidt. Dit betekent dat het zeker relevant is om de erosiebestendigheid van de grasmat op zand verder te onderzoeken en de in paragraaf 3.2 gegeven waarden te onderbouwen en/ of aan te scherpen.

Naast de sterkte berekeningen zijn ook overslagdebietberekeningen. In Bijlage A.7 en A.8 is per profiel het overslagdebiet weergegeven voor respectievelijk traject 9-1 en 53-3. In Figuur 3.6 en Figuur 3.7 is per profiel het berekende overslagdebiet visueel weergegeven. Opgemerkt wordt dat het voor profiel 101 (ID = 1; traject 53-3) berekende overslagdebiet niet is weergegeven: de berekening leverde een zeer hoog overslagdebiet op en dat is, mede omdat voor dit profiel overloop dominant is, niet conform verwachting. Ook voor profiel 2058 (ID = 28; traject 9-1) is het berekende overslagdebiet niet weergegeven: de berekening leverde een foutmelding op.



Figuur 3.6 Het overslagdebiet per profiel bij een terugkeertijd van 8.333 jaar (traject 9-1).



Figuur 3.7 Het overslagdebiet per profiel bij een terugkeertijd van 41.667 jaar (traject 53-3).

Voor een groot deel van de profielen is het berekende overslagdebiet relatief klein. Voor 10 van de 59 profielen (17%) is het overslagdebiet kleiner dan 0,1 l/s per m. Dit geldt met name voor traject 53-3 (9 van 30). Omdat bij een dergelijk overslagdebiet van 0,1 l/s per m geen eisen worden gesteld aan de grasbekleding is voor deze profielen de faalkans voor het toetsspoor GEKB verwaarloosbaar klein. Voor ongeveer 40% van de profielen is het golfoverslagdebiet kleiner dan 1 l/s per m.

Voor 20 profielen is het overslagdebiet groter dan 5 l/s per m (34%) en voor 9 meer dan 10 l/s per m (15%). Het grootste overslagdebiet wordt gevonden voor profiel 1989 (ID = 26), ruim 70 l/s per m.

3.3.4 Resultaten GEBU

In de figuren in Bijlage A.9 en A.10 zijn per uitvoerpunt de resultaten van de berekeningen met Hydra-NL opgenomen. Daarbij is de berekende golfhoogte H_{mo} uitgezet tegen de waterstand. Behalve de met Hydra-NL berekende golfhoogte is ook de golfhoogte weergegeven die wordt verkregen na vermenigvuldiging met de invloedsfactor voor scheve golfaanval f_{β} . Deze invloedsfactor kan worden bepaald met de volgende formule [9]:

$$f_{\beta} = \max(0,35; (\cos\beta)^{0,67})$$

Hierin is:

β de hoek van golfaanval in graden ten opzichte van dijknormaal.

Opgemerkt wordt dat de formule geldt voor $|\beta| \leq 90^{\circ}$. Voor $90^{\circ} < |\beta| \leq 100^{\circ}$ en $|\beta| > 100^{\circ}$ is f_{β} respectievelijk gelijk aan $3,5 - 0,035\beta$ en 0.

Uit de figuren in bijlage A.9 en A.10 blijkt dat de golfcondities per uitvoerpunt nogal verschillen. Voor een aantal berekeningen wordt bij hogere waterstanden de golfhoogte fors kleiner. Bij deze berekening wordt de bijdrage aan de overschrijdingsfrequentie van het scenario met de geopende Ramspolkering maatgevend. Bij dit scenario is de potentiële windsnelheid en daarmee de berekende golfhoogte lager.

In onderstaande Tabel 3.4 en Tabel 3.4 is per uitvoerpunt en profiel de maximale, op basis van de formule gereduceerde, golfhoogte weergegeven. Opgemerkt wordt dat de gereduceerde golfhoogte niet altijd bij dezelfde waterstand als de maximaal berekende golfhoogte hoort. Omdat het hele talud langs de Vechtdijk uit gras bestaat is echter altijd de maximale (gereduceerde) golfhoogte maatgevend.

Tabel 3.3 Maximale golfhoogte per uitvoerpunt traject 9-1

Uitvoerpunt	Profiel	H_{mo} [m]	$f_{\beta}H_{mo}$ [m]
OV_1_9-1_dk_00021	23	0,32	0,26
OV_1_9-1_dk_00024	26	0,69	0,55
OV_1_9-1_dk_00084	92	0,47	0,43
OV_1_9-1_dk_00101	1120	0,73	0,70
OV_1_9-1_dk_00102	1120	0,73	0,70
OV_1_9-1_dk_00105	1154	0,45	0,45
OV_1_9-1_dk_00106	1176	0,45	0,29
OV_1_9-1_dk_00107	1176	0,58	0,42
OV_1_9-1_dk_00109	117	0,60	0,51
OV_1_9-1_dk_00118	125	0,53	0,53
OV_1_9-1_dk_00121	129	0,45	0,39
OV_1_9-1_dk_00122	1325	0,66	0,57
OV_1_9-1_dk_00132	140	0,53	0,46
OV_1_9-1_dk_00148	156	0,68	0,68
OV_1_9-1_dk_00154	162	0,65	0,61
OV_1_9-1_dk_00166	174	0,52	0,37

Uitvoerpunt	Profiel	H_{mo} [m]	$f_{\beta}H_{mo}$ [m]
OV_1_9-1_dk_00172	180	0,59	0,44
OV_1_9-1_dk_00173	1837	0,78	0,66
OV_1_9-1_dk_00174	182	0,67	0,64
OV_1_9-1_dk_00178	1890	0,69	0,58
OV_1_9-1_dk_00179	187	0,62	0,58
OV_1_9-1_dk_00184	192	0,47	0,38
OV_1_9-1_dk_00188	1989	0,71	0,60
OV_1_9-1_dk_00189	1989	0,70	0,59
OV_1_9-1_dk_00190	198	0,73	0,71
OV_1_9-1_dk_00195	2058	0,97	0,97
OV_1_9-1_dk_00196	204	0,74	0,56
OV_1_9-1_dk_00204	212	0,60	0,51
OV_1_9-1_dk_00205	2154	0,62	0,57
OV_1_9-1_dk_00209	2184	0,83	0,75

Tabel 3.4 Maximale golfhoogte per uitvoerpunt traject 53-3

Uitvoerpunt	Profiel	H_{mo} [m]	$f_{\beta}H_{mo}$ [m]
OV_1_53-3_dk_00003	1225	0,52	0,35
OV_1_53-3_dk_00006	1222	1,10	0,86
OV_1_53-3_dk_00006	1229	1,16	0,94
OV_1_53-3_dk_00012	1216	0,81	0,64
OV_1_53-3_dk_00013	1161	1,00	0,81
OV_1_53-3_dk_00014	1161	0,99	0,80
OV_1_53-3_dk_00052	1171	0,15	0,14
OV_1_53-3_dk_00081	1135	0,65	0,62
OV_1_53-3_dk_00081	390	0,62	0,61
OV_1_53-3_dk_00083	360	0,51	0,48
OV_1_53-3_dk_00084	1131	0,73	0,68
OV_1_53-3_dk_00086	334	0,58	0,52
OV_1_53-3_dk_00090	299	0,83	0,63
OV_1_53-3_dk_00091	293	0,87	0,86
OV_1_53-3_dk_00092	1124	0,77	0,76
OV_1_53-3_dk_00093	268	0,76	0,75
OV_1_53-3_dk_00097	234	0,66	0,66
OV_1_53-3_dk_00099	201	0,68	0,56
OV_1_53-3_dk_00101	188	0,73	0,58
OV_1_53-3_dk_00106	1110	0,56	0,52
OV_1_53-3_dk_00106	136	0,59	0,57
OV_1_53-3_dk_00108	101	0,17	0,15
OV_1_53-3_dk_00109	101	0,16	0,14
OV_1_53-3_dk_00115	1101	0,73	0,58
OV_1_53-3_dk_00121	1094	0,62	0,38
OV_1_53-3_dk_00129	1086	0,57	0,44

Uitvoerpunt	Profiel	H_{mo} [m]	$f_{\beta}H_{mo}$ [m]
OV_1_53-3_dk_00141	1074	0,61	0,55
OV_1_53-3_dk_00147	1069	0,44	0,42
OV_1_53-3_dk_00168	1047	0,62	0,49
OV_1_53-3_dk_00171	1044	0,80	0,55
OV_1_53-3_dk_00176	1040	0,87	0,81
OV_1_53-3_dk_00188	1027	0,78	0,49
OV_1_53-3_dk_00197	1019	0,88	0,85
OV_1_53-3_dk_00201	1014	0,83	0,66

Uit de berekeningen blijkt dat de maximale gereduceerde golfhoogte tussen de 0,14 en 0,97 m ligt. Voor slechts 3 van de 64 berekeningen (5%) is de golfhoogte minder dan 0,25 m. Voor 10 van de 34 berekeningen (ca. 30%) is de maximale golfhoogte kleiner dan 0,5 m, voor circa 60% van de berekeningen is deze kleiner dan 0,6 m. Voor de profielen waar de golfhoogte tussen de circa 0,25 en 0,6 m ligt (ruim 50%) is het relevant om de erosiebestendigheid van de grasmat onder golfklapcondities beter te onderzoeken.

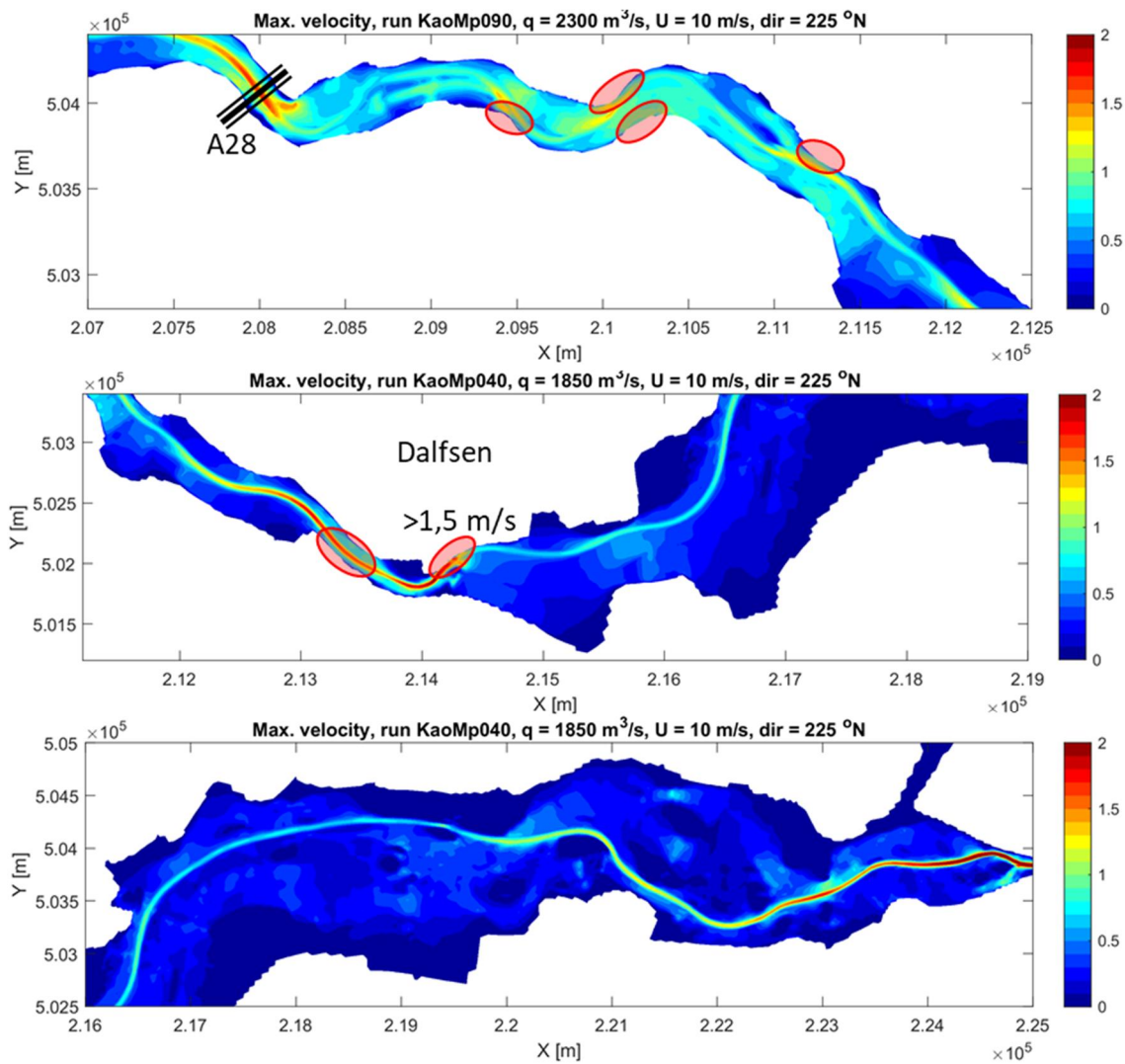
3.3.5 Stroming

Voor de terugkeertijden van 1/1000 en 1/10000 zijn de maatgevende waterstanden bepaald op een aantal locaties langs de Vecht (noord- en zuidoever) en is gekeken wat de waarden voor basisstochasten wind, waterstand en meerpeil waren die tot die waterstanden hebben geleid. In het interessegebied is de Vechtafvoer en vanwege de correlatie het meerpeil, bepalend. Wind speelt nauwelijks een rol.

Voor deze twee combinaties zijn de rekenresultaten van onlangs uitgevoerde WAQUA berekeningen verwerkt tot een maximale stroomsnelheid per locatie zoals weergegeven in Bijlage B.

In Figuur 3.8 staat de 1/10.000 situatie weergegeven. De rivierafvoer bij Dalfsen is 700 m³/s (IJssel: 2300 m³/s) en meerpeil 0,9m +NAP. De windsnelheid is 10 m/s, windrichting 225grN en de Ramspolkering is open. In de figuur is omcirkeld waar de stroomsnelheid langs de dijk in de orde van 1 m/s of groter wordt. De grootste stroomsnelheid langs de dijk wordt gevonden bij Dalfsen, deze wordt hier 1,5 à 2 m/s. Stroomopwaarts van Dalfsen is de stroomsnelheid langs de dijk gering, in het algemeen minder dan 0,5 m/s. Richting de A28 zijn er enkele stukken waar de stroomsnelheid in de orde van 1 m/s is. Op de meeste locaties blijft de stroomsnelheid langs de dijk echter een stuk onder de 1 m/s.

Gezien de grote onzekerheid in de kritische waarde van de stroomsnelheid voor gras op zand is het aan te bevelen hier beter naar te kijken.



Figuur 3.8 Maximale stroomsnelheid Vecht 1/10.000 jaar waterstand (omcirkeld waar deze bij de dijk 1 m/s of meer wordt)

4 Reststerkte zanddijk bij golfaanval

4.1 Inleiding

Falen van de grasbekleding betekent niet direct een catastrofale overstroming, de gebeurtenis waarvoor de norm is afgeleid. Voor het optreden van een overstroming moeten ook eventuele (nood)maatregelen falen en erosie van de kern van de dijk optreden zodanig dat een bres vervolgens leidt tot een overstroming. Eventuele noodmaatregelen worden in het ontwerp en de beoordeling van dijken echter doorgaans niet getalsmatig meegenomen.

De Vechtdijken in het projectgebied bestaan bijna volledig uit zand. Omdat zand makkelijk erodeert wordt er in het algemeen slechts weinig reststerkte aan toegekend. De kans op falen van de bekleding door golven en/of golfoverslag ligt in dat geval relatief dicht bij de kans op een overstroming. Echter, omdat de golfhoogte bij rivieren vaak relatief beperkt is en het dijklichaam van de Vechtdijk relatief breed, is grofstoffelijk gekeken naar de kans op erosie van de dijk kern door golven. Hiermee wordt gekeken in hoeverre de grasbekleding op het buitentalud relevant is voor de overstromingskans. Dit is ook van belang voor de omgang met schades aan de grasmat. Leidt een enkele schade direct tot een faalkans hoger dan de norm, of is er nog een zekere reststerkte aanwezig die dit voorkomt (zie verder Hoofdstuk 5).

Er is gekeken naar erosie door golfwerking, niet naar de gecombineerde effecten van golven en langsstroming. Als de golven voldoende zijn om de kern te eroderen leidend tot een bres, dan zal dat in combinatie met langsstroming waarschijnlijk ook zo zijn. Als de golven niet leiden tot een bres, dan kan langsstroming hier mogelijk nog wel toe leiden. Vooral in buitenbochten van de rivier en op plekken waar de geul dicht langs de dijk ligt kan dit optreden.

4.2 Erosiemodel afslag zanddijk door golven

Voor erosie van zand door golfaanval wordt in het WBI2017 bijlage III [12] een afslagbreedte gegeven voor voorland, afhankelijk van de golfhoogte. Voor een golfhoogte van 0,5 m à 1 m volgt een afslagbreedte van circa 12 à 27 m. Dit betreft een evenwichtsprofiel, dat enigszins aan de veilige kant is. Het tijdsaspect is hierin niet meegenomen. Deze afslagbreedte is relatief groot ten opzichte van de profielbreedte van de Vechtdijk. Daarom is gebruik gemaakt van een iets verfijnder model uit het rapport 'Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven, SBW reststerkte; analyse Deltagootproeven' [4]. SBW, Sterkte en Belastingen Waterkeringen was één van de voorlopers van het WBI programma, tegenwoordig het BOI. Op basis van deltagoot onderzoek naar het ontstaan van een afslagprofiel in een zandkern is een formule opgesteld waarmee het geërodeerde volume zand met verloop van tijd kan worden voorspeld, afhankelijk van de golfcondities, duur van de belasting en de (oorspronkelijke) geometrie.

De geldigheid van de formule wordt gelimiteerd tot:

- $0,7 < H_s < 3 \text{ m}$
- $0,22 < \tan\alpha < 0,5$ (taludhelling 1:2 tot 1:4,5)
- $0,015 < S_{op} < 0,06$ (-)
- $180 < D_{50} < 220 \mu\text{m}$

Waarin:

H_s Significante golfhoogte (m)

α taludhelling (radialen)

S_{op} golfsteilheid berekend voor de diep water golf lengte en de piekperiode (-)

D_{50} zandmediaan (μm)

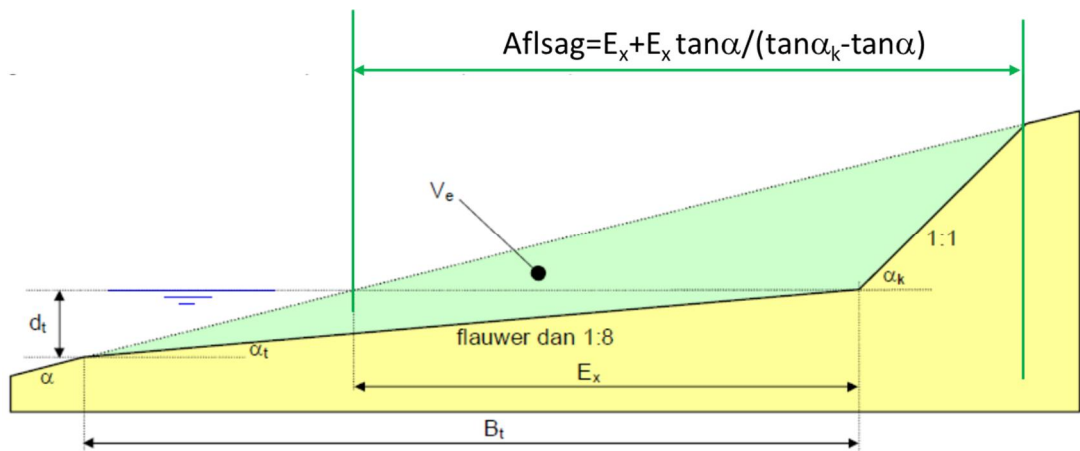
De formule voor erosiesnelheid V_e per uur (m^2/uur):

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = \frac{H_s^2}{T_p} \left(\frac{0,15}{s_{op}^{1,3}} + (\tan \alpha)^{0,8} \cdot (135 - 1500 \cdot s_{op}) \cdot \exp \left(-0,0091 \cdot \left(\frac{B_t}{H_s} \right)^2 \right) \right)$$

Waarin:

- V_e erosievolume per strekkende meter dijk (m^3 per m' ofwel m^2)
- t stormduur (uur)
- T_p piekperiode (s)
- B_t Terrasbreedte (m)

Hierbij wordt uitgegaan van een geschematiseerd afslagprofiel dat er uit ziet als Figuur 4.1. Deze figuur is overgenomen uit [4], waarbij aanvullend een afslaglengte is aangegeven, zijnde de lengte tussen het snijpunt van de waterlijn met de insteek van het afslagprofiel.



Figuur 4.1 Geschematiseerd afslagprofiel

Omdat de erosiesnelheid afhankelijk is van de terrasbreedte kan de formule niet direct worden toegepast. In [4] wordt aanbevolen om de storm op te knippen in stukken van 1 uur en per uur de snelheid en voortschrijding van het terras te beschouwen. Het afslagvolume V_e en de terrasbreedte B_t zijn als volgt aan elkaar gerelateerd:

$$B_t \left(1 - \frac{\tan \alpha_t}{\tan \alpha} \right) = P \sqrt{\frac{V_e}{\tan \alpha}}$$

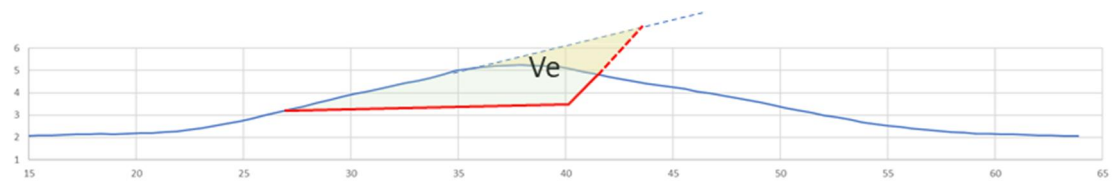
Waarin:

- P Factor variërend van 0,82-1 voor realistische waarden van taludhelling, terrashelling en klifhelling.
- α_t Terrashelling, flauwer dan 1:8.
- α_k Klifhelling, orde 1:1.

Er wordt vanuit gegaan dat zand dat vrijkomt uit het dijkprofiel zich niet afzet voor het profiel en daarmee het terras vergroot. Dit komt overeen met een situatie waarbij het vrijgekomen zand verdwijnt naar dieper water, dan wel zijdelings wordt afgevoerd door langsstroming.

De formules gaan uit van een insnijding van een talud, echter bij afslag bij een dijk tot een doorbraak zal het profiel insnijden in de kruin en het binnentalud (Figuur 4.2). De relatie tussen de

terrasbreedte en het erosievolume zal dan niet meer kloppen en het kan zijn dat de snelheid van de afslaglengte hierdoor toeneemt. De berekende afslaglengte wordt door dit effect mogelijk onderschat indien de afslag ook de kruin van de dijk bereikt.



Figuur 4.2 Erosievolume bij afslag in (doorgaand) talud vs dijkprofiel bij afslag tot voorbij de buitenkruinlijn

4.3 Uitgangspunten Vechtdijk

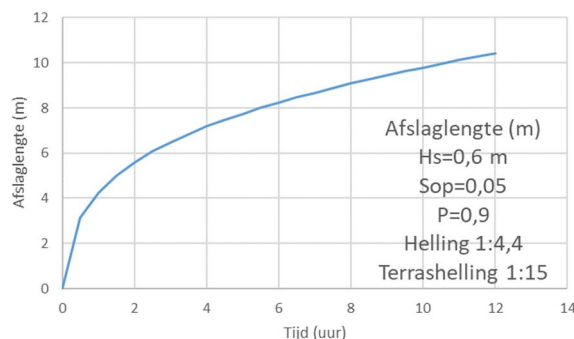
Belastingduur

De waterstand van de Vecht oostelijk van de A28 wordt voor een groot deel gedomineerd door een hoge afvoer. De invloed van windopzet neemt op de Vecht af in Oostelijke richting. Bij een afvoer gedomineerde waterstand varieert de waterstand relatief traag waardoor een golfklapbelasting relatief lang op eenzelfde hoogte aanhoudt. Voor afvoer gedomineerde watersystemen wordt daarom een continue belasting op één hoogte aangehouden van 12 uur. Bij het bepalen van de omvang van de erosie is hiervan uitgegaan.

Bij scenario's waarbij windopzet dominant is ten opzichte van de afvoer, bij een geopende Ramspolkering, moet bij de beoordeling van GEBU worden uitgegaan van een piek van de storm van 2 uur met een totale stormduur van 35 uur en hiermee variërende waterstand en golfcondities. De totale belastingduur is circa drie keer langer, maar de piek is veel korter ($\frac{1}{6}$) en de golfbelasting varieert over de taludhoogte. De verwachting is dat de belasting uitgaande van een afvoer gedomineerde waterstand iets meer erosie zal geven. Gezien de andere niet geringe onzekerheden in de berekening van golfafslag en het grofstoffelijke karakter van deze studie is de belastingduur verder niet geoptimaliseerd.

Van belang voor de optredende afslag is het deel van de tijd van de rekenkundige stormduur van 12 uur dat de grasbekleding het uithoudt. In het kader van deze studie wordt met name gekeken naar de relevantie van de grasbekleding (Vechtdijk als duin) en de ernst van schades (zie verder hoofdstuk 5). Daarom is gekeken naar de afslaglengte in 12 uur. Overigens neemt de snelheid van erosie sterk af met tijd, waardoor een grasmat die het enkele uren uithoudt niet heel veel uitmaakt voor de afslaglengte.

Indien de grasmat bij een golfhoogte van 0,6 m direct faalt, dan volgt een afslaglengte van ruim 10 m in de rekenkundige stormconditie van 12 uur. Indien de grasbekledingen het 2 uur houdt, dan is de resterende stormduur waarin afslag plaatsvindt nog 10 uur en is de afslaglengte krap 10 m (Figuur 4.3).



Figuur 4.3 Voorbeeld afslaglengte (m) afhankelijk van tijd (uur)

Golfhoogte en golfsteilheid

Met behulp van Ringtoets zijn berekeningen gemaakt om een indicatie van de voorkomende golfhoogtes langs de Vechtdijk. De berekeningen zijn uitgevoerd voor het toetsspoor GEBU, voor de locaties zoals aangegeven in Figuur 4.4 en Figuur 4.5.



Figuur 4.4 Locaties berekeningen GEBU – golfhoogte traject 9-1

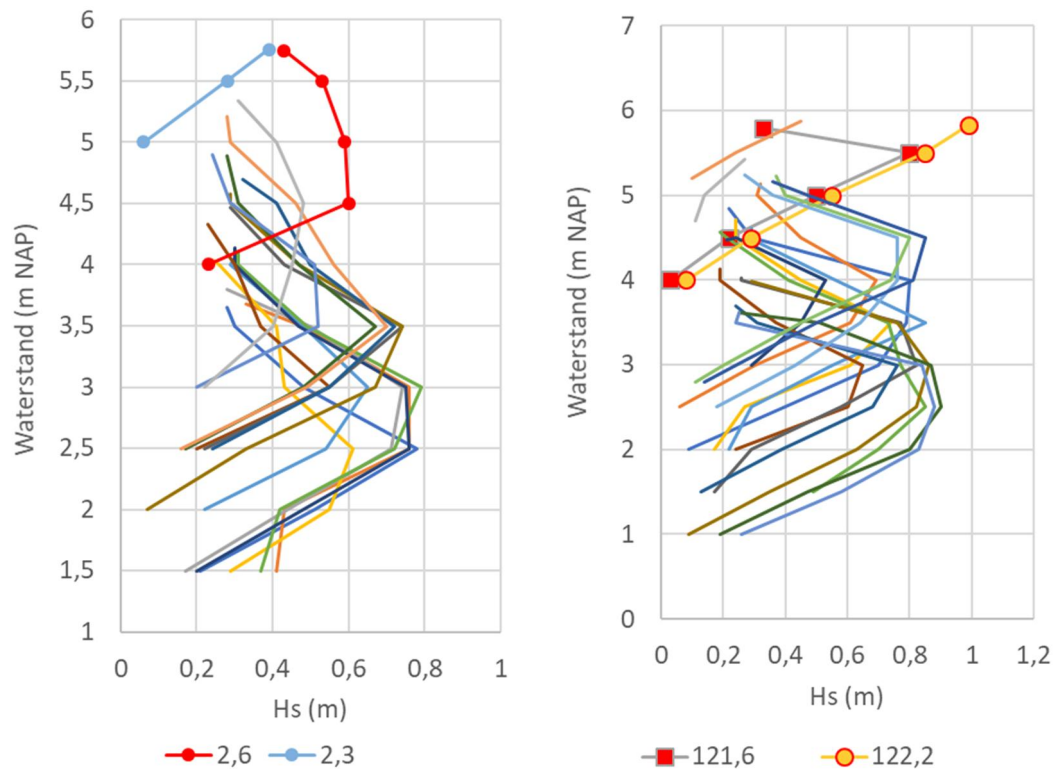


Figuur 4.5 Locaties berekeningen GEBU – golfhoogte traject 53-3

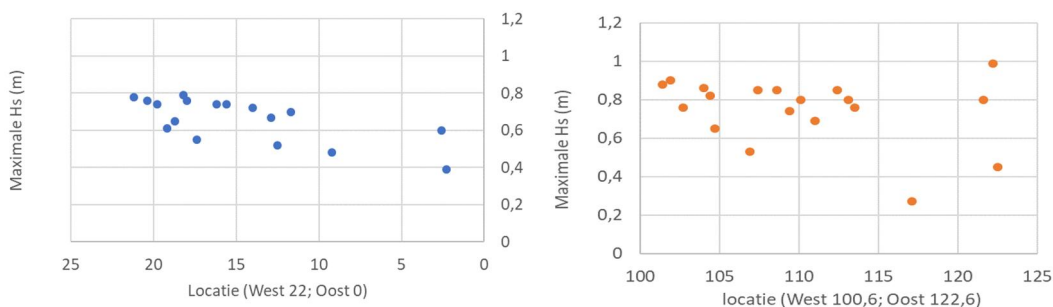
De berekeningen zijn uitgevoerd voor de doorsnede-eis GEBU signaleringswaarde, 1/40.000 voor dijktraject 9-1 en 1/200.000 voor dijktraject 53-3. Er is gebruik gemaakt van voorlandprofielen. De golfhoogtes zijn berekend voor verschillende waterstanden, vanaf voorlandniveau tot de waterstand bij de doorsnede-eis, signaleringswaarde, GEBU.

De golfhoogtes zijn grafisch weergegeven in Figuur 4.6. De berekende golfhoogtes langs traject 9-1 zijn tot circa 0,8 m rondom een waterstand van NAP +2,5 à +3,5 m. Boven een waterstand van NAP +3,5 m neemt de golfhoogte af tot 0,5 à 0,6 m. Langs traject 53-3 zijn de berekende golfhoogtes iets hoger, tot ca. 0,9 m rondom een waterstand van NAP +2,5 à +4,5 m. Een uitschieter is locatie 122,2 waar een golfhoogte van 1 m wordt berekend bij een waterstand van bijna NAP + 6 m. Ook dit punt ligt helemaal in het Oosten van het traject.

Voor het bezwijken van de grasbekleding is de maximale golfhoogte van belang. De maximale golfhoogte per locatie is uitgezet tegen de locatie (Figuur 4.7).

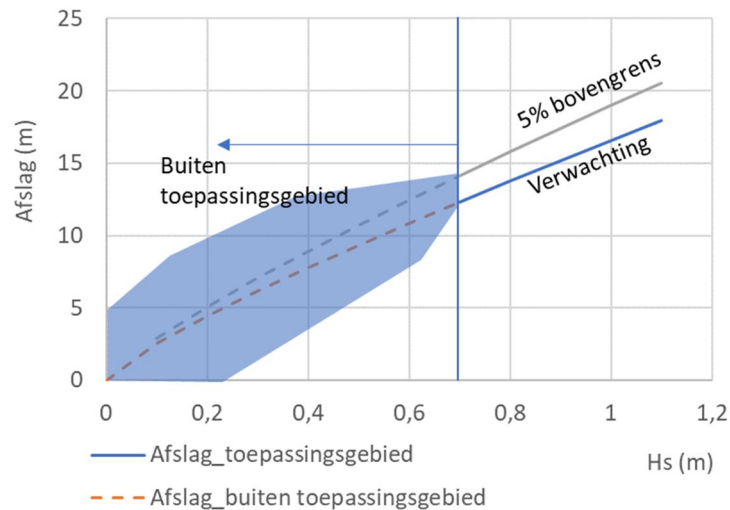


Figuur 4.6 Golfhoogte Hs (m) tegen waterstand (m NAP) voor diverse locaties langs traject 9-1 (links) en traject 53-3 (rechts). Gemarkeerd zijn locaties met hoge golven bij hoge waterstanden.



Figuur 4.7 Maximale golfhoogte per locatie tegen de locatie voor traject 9-1 (links) en 53-3 (rechts) bij doorsnede-eis GEBU signaleringswaarde

De golfhoogtes langs de Vechtdijk zitten aan de ondergrens van het geldigheidsgebied van de formule en er ook onder. Het ligt voor de hand dat een lagere golfhoogte wel leidt tot een lager erosievolume, echter de formule zal minder betrouwbaar worden. Voor een buitentaludhelling van 1:4, golfsteilheid s_{op} 0,05 (-) een terrashelling 1:15 en een P factor van 0,9 is de afslaglengte bepaald voor verschillende golfhoogtes (Figuur 4.8).



Figuur 4.8 Afslag (m) tegen significante golfhoogte H_s (m) verwachtingswaarde en 5% bovengrenswaarde voor een taludhelling 1:4, $P=0,9$, terrashelling 1:15.

Voor de modelonzekerheid wordt in het rapport een verwachtingswaarde van 1 met een standaarddeviatie van 0,19 aangehouden op het erosievolume. Op basis hiervan is de 5% bovengrenswaarde in de figuur met de afslaglengte weergegeven. Buiten het toepassingsgebied zal de onzekerheid van het model toenemen.

De golfsteilheid s_{op} varieert tussen circa 0,01 en 0,07, echter de hoogste golven hebben een golfsteilheid van ca. 0,045 à 0,06 en vallen daarmee binnen het geldigheidsgebied van de erosieformule.

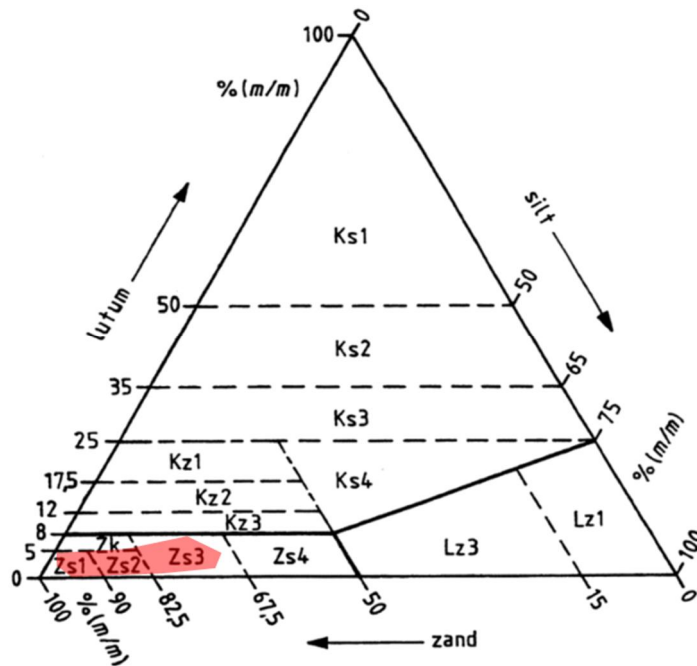
Taludhelling

De taludhelling van het buitentalud varieert langs de Vechtdijk. Er is steekproefsgewijs ($N=36$) een helling bepaald. Het gemiddelde van de buitentaluds was 1:4,4. Enkele hellingen waren orde 1:3 à 1:3,5. Een enkele helling was 1:5 à 1:5,5. Er is in de steekproef geen verschil aangetroffen tussen de buitentaludhellingen van de dijken langs traject 53-3 en 9-1. De hellingen vallen voor het grootste deel binnen de toepassingsvoorwaarden van de formule voor golfafslag.

Zandmediaan D_{50}

De geldigheid van de formule is relatief smal voor de grofheid van het zand ($180 < D_{50} < 220 \mu\text{m}$).

Op basis van de talrijke handboringen die langs en op de Vechtdijk zijn uitgevoerd is vastgesteld dat het dijklichaam hoofdzakelijk uit zand bestaat. De handboringen zijn beschreven conform de NEN5140. Veruit het meeste materiaal valt in de categorie zand, matig siltig ($Zs2$), soms komen ook zand, zwak en sterk siltig voor ($Zs1$ en $Zs3$) (zie Figuur 4.9). Klei is zeer zeldzaam in het dijklichaam.

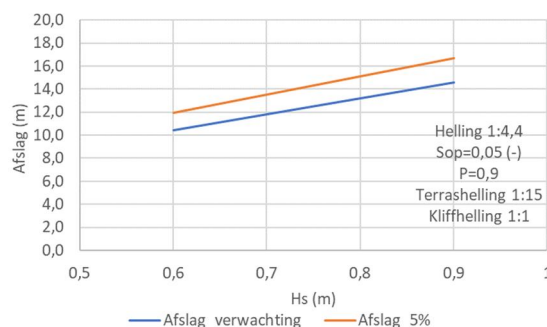


Figuur 4.9 Indeling van de lutum-silt-zanddriehoek (uit NEN5140)

Het zand in de bovenste 20 tot 40 cm van de dijk wordt beschreven als zand, zeer fijn, wat betekent een zandmediaan van 105-150 μm . Het kernmateriaal wordt overwegend beschreven als zijnde zand, matig fijn (150-210 μm). Enkele keren wordt ook de beschrijving 'uiterst fijn' gegeven (63-105 μm), en enkele keren matig grof (210-300 μm). Overwegend valt het zand binnen de toepassingsvoorwaarden, maar regelmatig zal het zand er buiten vallen. Dit is vooral aan de fijnere kant ($D_{50} < 180 \mu\text{m}$) en een enkele keer aan de grovere kant ($D_{50} > 220 \mu\text{m}$). De variabiliteit is niet enkel van locatie tot locatie, maar ook in één boring op één locatie worden soms fijnere en grovere zanden vastgesteld. Als gevolg hiervan zal de onzekerheidsband van het afslagvolume en van de afslaglengte groter zijn dan aangehouden in het rapport [4].

4.4 Berekenende afslagprofielen Vechtdijk

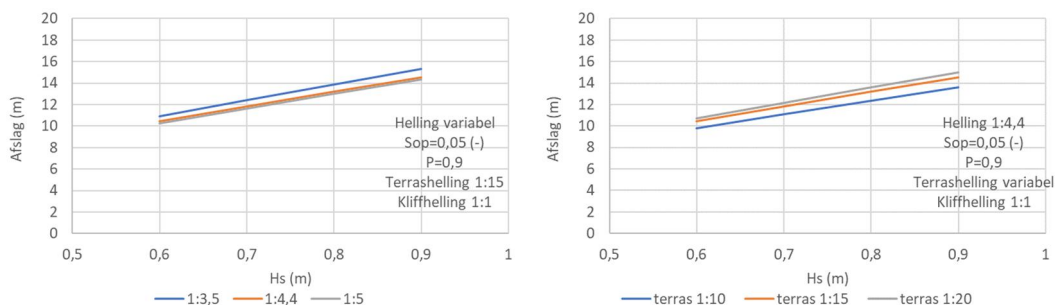
De significante golfhoogte langs de Vecht bij de doorsnede-eis voor GEBU signaleringswaarde zijn veelal tussen 0,6 en 0,9 m. Omdat deze niet zijn gecorrigeerd voor de hoek van golfval zoals mogelijk is voor de beoordeling van gras in de golfklapzone, valt dit wat hoger uit dan gerapporteerd in hoofdstuk 3. Voor deze range van golfhoogtes en uitgaande van de belastingduur van 12 uur is de verwachte afslag berekend en weergegeven in Figuur 4.10.



Figuur 4.10 Afslaglengte (m) verwachtingswaarde en 5% overschrijdingswaarde tegen H_s (m) voor taludhelling 1:4,4, S_{op} 0,05, $P=0,9$; terrashelling 1:15 en kliffhelling 1:1

De berekende verwachte afslag is 10 tot 14 m, de berekende 5% overschrijdingswaarde is 12 tot 17 m.

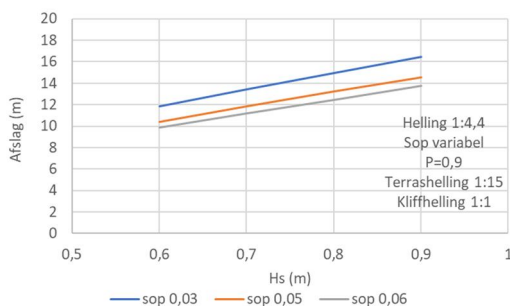
De buitentaludhelling varieert langs de Vechtdijk van circa 1:3,5 tot 1:5. De invloed hiervan op de berekende verachtingswaarde van de afslaglengte staat in Figuur 4.11. De terrashelling zal bij golfafslag van de zandkern flauwer dan 1:8 zijn, echter de helling ligt niet vast in het model. De invloed van de aangehouden terrashelling staat eveneens in Figuur 4.11.



Figuur 4.11 Invloed taludhelling (links) en terrashelling (rechts) op afslaglengte

De berekende invloed van zowel de terrashelling als de helling van het buitentalud blijkt relatief gering, circa 1 m op de afslaglengte.

De golfsteilheid s_{op} van de berekende golven varieert tussen 0,01 en 0,07. De lage waarden van 0,01 à 0,03 worden berekend bij lage golfhoogtes en lage waterstanden op het voorland. De combinatie van de lage waterstand, veel dijkbreedte bij een lage waterstand en de lage golven maakt dat deze golven nauwelijks een bijdrage leveren aan de overstromingskans. De hogere golven bij hogere waterstanden hebben meestal een golfsteilheid van 0,045 tot 0,06. Het effect van de golfsteilheid op de afslaglengte staat in Figuur 4.12.

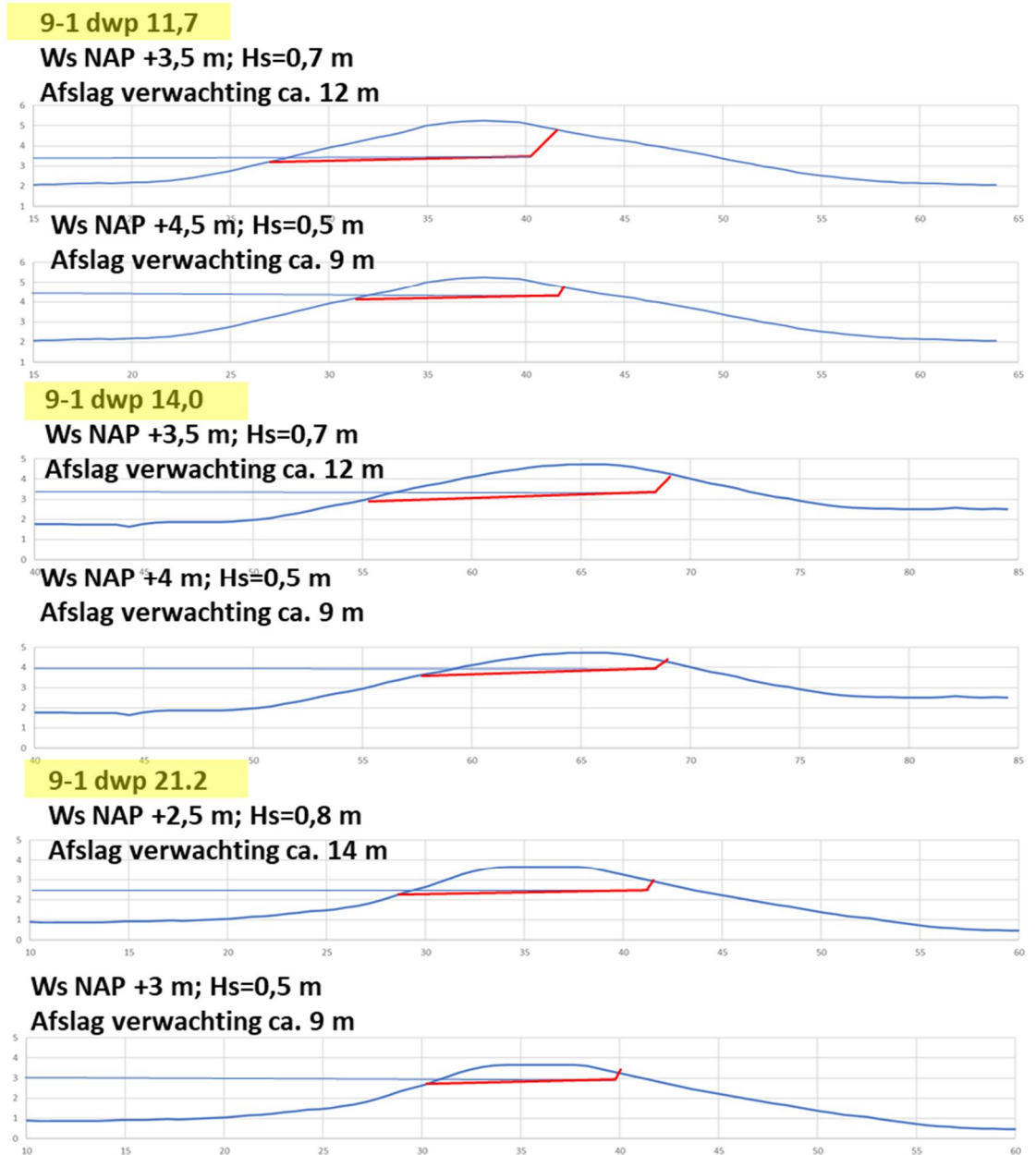


Figuur 4.12 Invloed golfsteilheid s_{op} (-) op afslaglengte (m)

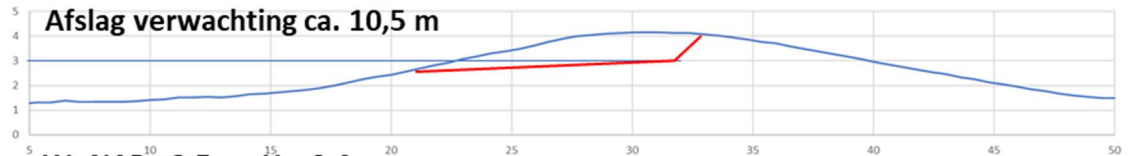
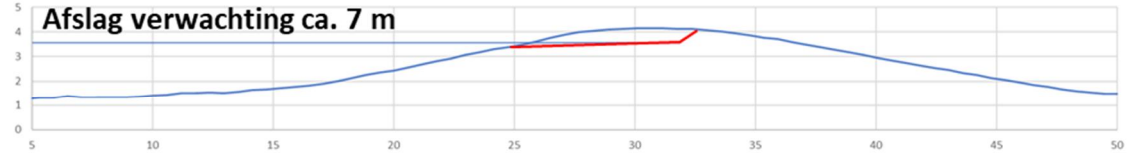
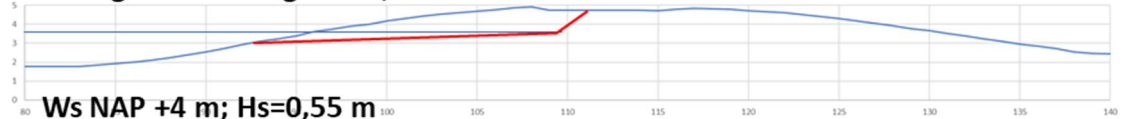
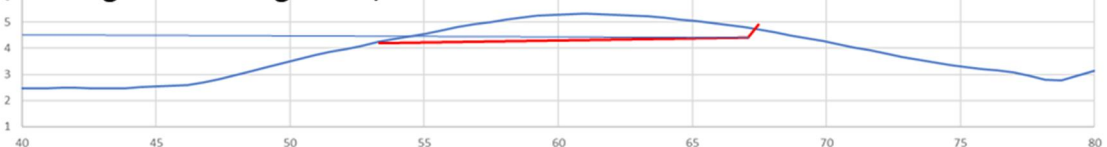
De invloed van een lage steilheid ten opzichte van steile golven is ongeveer 2 m afslaglengte. Omdat enkel de hogere maar steilere golven optreden bij een hoge waterstand en daarmee een bijdrage kunnen leveren aan de overstromingskans, is de invloed voor de Vechtdijk echter beperkter, orde 0,5 à 1 m.

De met het erosiemodel berekende afslaglengte is voor enkele profielen grafisch weergegeven. De invoer voor het model is locatiespecifiek geweest, de lokale taludhelling en golfcondities zijn gebruikt. Vaak waren er twee waterstand/ golfhoogtecombinaties dominant, deze zijn schetsmatig in een dwarsprofiel gezet. Het resultaat staat in Figuur 4.13. en Figuur 4.14. De horizontale en

verticale lengteschaal zijn ongeveer aan elkaar gelijk genomen, waardoor de hoeveelheid erosie in relatie tot het dijkprofiel zo veel mogelijk inzichtelijk wordt.



Figuur 4.13 Schetsmatige visualisatie afslaglengte voor drie dwarsprofielen van traject 9-1

53-3 dwp 104,7**Ws NAP +3 m; Hs=0,65 m****Afslag verwachting ca. 10,5 m****Ws NAP +3,5 m; Hs=0,4 m****Afslag verwachting ca. 7 m****53-3 dwp 108,6****Ws NAP +3,5 m; Hs=0,85 m****Afslag verwachting ca. 14,5 m****Ws NAP +4 m; Hs=0,55 m****Afslag verwachting ca. 10 m****53-3 dwp 113,1****Ws NAP +4,5 m; Hs=0,8 m****Afslag verwachting ca. 12,5 m***Figuur 4.14 Schetsmatige visualisatie afslaglengte voor drie dwarsprofielen van traject 53-3*

De berekende verwachte afslagprofielen komen veelal voorbij de kruin en in het binnentalud. De dijk zal gegeven deze extreme stormconditie dicht bij falen of tot falen komen. Uitzondering is de brede dijk profiel 108,6 in traject 53-3. Hier ligt een weg op de kruin, waarbij de weg wel wordt aangetast, maar waarbij wordt berekend dat een groot deel van de kruin intact zal blijven.

Geconcludeerd kan worden dat gegeven een gefaalde bekleding aan het begin van de storm en verder gegeven alle beperkingen van het model en onzekerheden hierover, de kans groot is dat alleen de zandkern niet voorkomt dat er een doorbraak volgt. Er kan op basis van deze studie niet op worden vertrouwd dat de Vechtdijk ook als duin kan fungeren. Vanuit de overstromingskansbenadering gezien is het daarom wel relevant om de erosiebestendigheid van de grasbekleding tegen golfklappen in kaart te brengen.

Anderzijds lijkt het er ook niet op dat er in zeer korte tijd catastrofaal falen optreedt. De kern geeft wel degelijk een significante weerstand tegen golven. Dit laatste is met name van belang bij het beheer en onderhoud, het omgaan met schades aan de grasbekleding (zie hoofdstuk 5) en bij het kansrijk zijn van noodmaatregelen.

5 Beheer en onderhoud

5.1 Inleiding

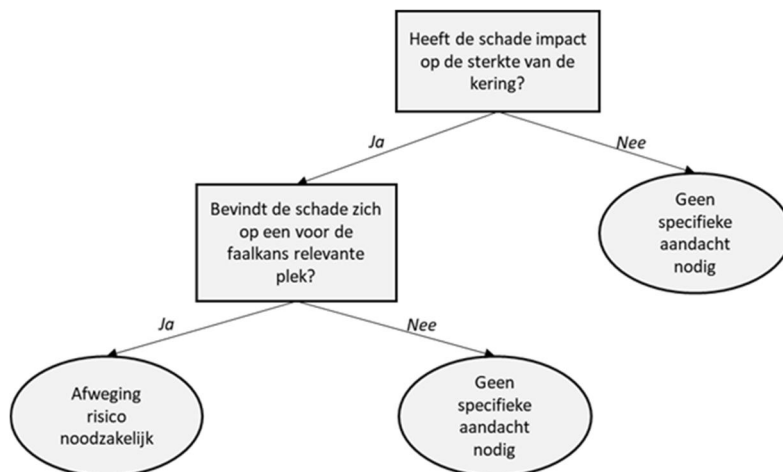
Belangrijk aandachtspunt bij de Vechtdijken is dat de functie van de grasbekleding als bescherming tegen erosie groter is dan bij dijken waar zich onder het gras een erosiebestendige kleilaag bevindt: er is immers maar 1 verdedigingslinie voordat de zandkern begint te eroderen. Dit betekent ook dat het beheer en onderhoud van deze grasbekleding extra aandacht vereist vanuit het oogpunt van het overstromingsrisico. In deze verkenning beschouwen we wat aandachtspunten en belangrijke onzekerheden zijn bij het risicogestuurd beheren van de grasbekleding op de Vechtdijken. Het doel is tweeledig: enerzijds wordt bepaald voor welke typen schades de sterktereductie het meest onzeker is en of en hoe dit kan worden verkleind met het slim kiezen van de locaties van erosieproeven, anderzijds kijken we hoe dit verder kan worden vertaald naar de context van risicogestuurd beheer en onderhoud. De complete studie is te vinden in Bijlage C. In de volgende paragrafen volgt een beknopte samenvatting met de belangrijkste conclusies.

5.2 Samenhang tussen schades en overstromingskansen

Vanuit het perspectief van de overstromingskansen kunnen de effecten van de vele soorten schade aan waterkeringen verschillen. We onderscheiden globaal 3 typen schade:

- Type 1: Schades die een directe invloed hebben op de faalkans van de kering. Bijvoorbeeld dierlijke graverij,
- Type 2: Schades die op termijn effect kunnen krijgen op de faalkans van de kering. Dit kan bijvoorbeeld door degradatie van de kwaliteit van de graszode als gevolg van afdekking, of door verminderende inspecteerbaarheid waardoor andere schades steeds moeilijker te detecteren worden, bijvoorbeeld als gevolg van ruigte.
- Type 3: Schades die niet of nauwelijks invloed hebben op de faalkans van de kering, maar om andere redenen onwenselijk zijn. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen de schade zelf die geen directe invloed heeft, of schades die zich op een plek bevinden die onbelangrijk is voor de faalkans. Denk hierbij aan kale plekken op het binnentalud van een kering met overhoogte.

Figuur 5.1 geeft handelingsperspectieven voor de omgang met verschillende soorten schade vanuit het effect op de faalkans. Kort samengevat is de kern dat, om impact te hebben op de overstromingskans een schade impact moet hebben op de sterkte, en zich op een voor de faalkans relevante plaats moet bevinden. In dat geval is het afwegen van de effecten van die specifieke schade op de overstromingskans noodzakelijk, om zo een schema van beheer en onderhoud te bepalen wat de impact van de schade op de overstromingskans dusdanig verkleint dat aan de normen wordt voldaan.



Figuur 5.1 Beslisboom voor risicogestuurd beheer en onderhoud.

5.3 Schades aan de Vechtdijken

Er zijn verschillende bronnen geraadpleegd om te kunnen bepalen welke schades voor de Vechtdijken relevant zijn. Het gaat hier specifiek om graslandonderzoeken van de betreffende trajecten, de WBI beoordeling, inspectiedata sinds 2016 en een interview met de dijkbeheerder.

Qua typen schade moet er onderscheid gemaakt worden tussen schades die in het verleden zijn voorgekomen en schades die in de toekomst zouden kunnen voorkomen. Daarbij is het van belang om de kansen en gevolgen goed af te wegen: in het gebied is bijvoorbeeld nog geen graafschade van bevers of dassen geregistreerd, maar ze zijn wel gesignaleerd en het is dus waarschijnlijk dat dit in de toekomst (een keer) zal voorkomen. Anderzijds zijn er een aantal schadetypen die frequent voorkomen en die zelfs met zeer intensieve inspecties niet uit te sluiten zijn. Zo worden ieder jaar in voor- en najaar gemiddeld ca. 100 meldingen van schade gedaan. Tabel 5.1 geeft een overzicht van de meest frequent voorkomende meldingen, inclusief typering (type 1, 2 of 3) en toelichting.

Tabel 5.1 Overzicht van meest voorkomende typen schades en toelichting van hun effecten op de faalkans.

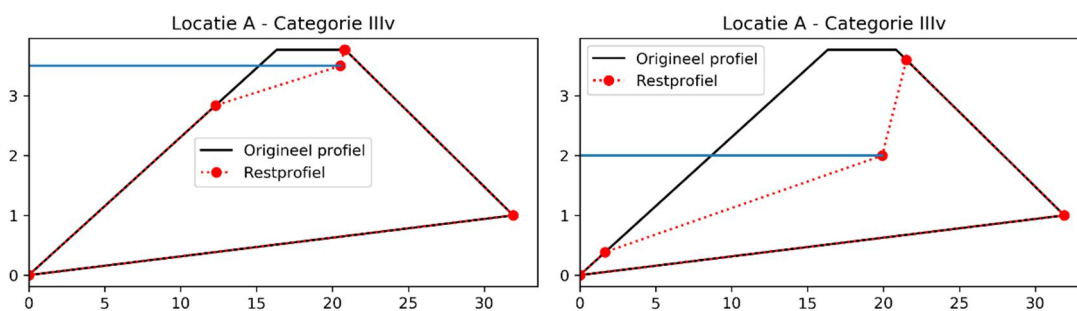
Schadeparameter	Type	Toelichting
gras afdekking (a.g.v. begroeiing/bebouwing)	2	Slechte inspecteerbaarheid leidt tot afname betrouwbaarheid inspecties en tot grotere kans op missen belangrijke schades
gras afdekking (a.g.v. bijvoorbeeld drijfvuil en achtergebleven maaisel)	2	Geen direct probleem, maar niet verwijderen leidt op termijn tot afsterven en kale plekken. Tevens kan dit tot gevolg hebben dat er te veel voedingsstoffen beschikbaar zijn voor snel groeiende ongewenste kruiden. Met als gevolg het voorkomen van meer grasafdekking en de vorming van loten.
loten	2	Geen direct probleem, maar houtige gewassen kunnen leiden tot preferente erosiepaden of slechte begaanbaarheid en inspecteerbaarheid
gras graverij groot	1	Graverij leidt tot rechtstreekse aantasting van de grasmatten. Diepte en omvang bepaalt, naast de plaats op het talud de gevolgen voor de overstromingskans. Bij zeer grote graverij kunnen ook andere mechanismen dan GEBU/GEKB worden beïnvloed
gras kale plekken – emelten	1	Op relatief korte termijn kunnen emelten leiden tot een zeer losse en aangetaste graszode.

gras kale plekken (a.g.v. droogte)	1	Door droogte kan de graszode afsterven. Opgemerkt moet worden dat uit de analyse van de droogte van 2018 herstel nog lang mogelijk is, maar lokaal is uitgebleven. Op taluds met een in 2018 (en 2019) afgestorven vegetatie zijn nu nog kale plekken aanwezig of zijn de voormalig kale plekken begroeid met een pioniervegetatie die in het winterseizoen weinig sterkte biedt.
------------------------------------	---	---

Met name de schades uit Tabel 5.1 die vallen onder type 1 zijn interessant om nader te beproeven met de golfklap- of golfoverslagsimulator. Dit betreft veelal ook schades die door de beheerder zijn aangemerkt als relevant in het gebied.

5.4 Invloed van schade op dijkveiligheid

Om een indicatie te krijgen van de effecten van schade aan de grasmat op de veiligheid van zanddijken zijn voor een aantal locaties berekeningen gemaakt met het afslagmodel uit Hoofdstuk 4. Doel is om een beeld te vormen van de reststerkte wanneer de grasmat niet zou functioneren, wat een conservatieve aanname is van het gevolg van schade (waarschijnlijk doet de grasmat vaak nog wel iets). Voor een viertal locaties is met behulp van het erosiemodel een afslagprofiel bepaald met verschillende randvoorwaarden, zie Figuur 5.2 ter illustratie. De berekende afslag betreft verwachtingswaarden op basis van de formules uit Hoofdstuk 4. Er zijn geen berekeningen gemaakt voor effecten van schade bij golfoverslag.



Figuur 5.2 Restprofielen voor locatie A. Links de belastingcombinatie met de kleinste restbreedte. Rechts het erosieprofiel bij de grootste golf.

Uit de berekeningen blijkt dat in veel gevallen er rekenkundig nog wel enige restbreedte overblijft, maar dat met name bij locaties waarbij de veiligheid voor golfoverslag (GEKB) lager is, het restprofiel door de lagere effectieve hoogte ook kleiner/(te klein) wordt. Ook hier gelden dezelfde onzekerheden rondom de verwachtingswaarde zoals aangegeven in hoofdstuk 4. Het blijkt echter niet zo dat de dijk in een zeer korte tijd doorbreekt. Dit maakt het waarschijnlijk haalbaar om, ook wanneer de invloed van schade wordt meegenomen, met risicogestuurd beheer en onderhoud toch aan de overstromingskansen te voldoen. Wanneer meer inzicht wordt verkregen in de sterkte van gras met de relevante type 1 schades kan dit nader worden uitgewerkt.

5.5 Conclusies schades beheer en onderhoud

- De meest 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 (Engerlingen: larven van bladsprietkevers). Het is niet realistisch om deze schades met een intensief inspectieregime volledig uit te sluiten. Om de sterkte van de grasmat bij schade beter te kunnen inschatten wordt geadviseerd om deze schades tijdens het erosieonderzoek te beproeven. Hierbij moet rekening worden gehouden met

het tijdsaspect, schades hebben een hersteltijd en te beproeven schades kunnen in verschillende stadia van herstel zitten.

- Aanvullend dient in het risicogestuurd beheer en onderhoud ook rekening te worden gehouden met schades die minder vaak voorkomen (met name grootschalige graverij door bevers/dassen). Omdat deze schades nu niet voorkomen zouden deze voor proeven nageemaakt moeten worden. De vraag is echter hoe zinvol dit is omdat a) de vraag is hoe goed een dergelijke schade kan worden nageemaakt en b) de vraag is in hoeverre het mogelijk is om de situatie met een golfklapsimulator op realistische wijze te beproeven.
- De sterkte bij golfaanval op het buitentalud is onderzocht met een afslagmodel. Dit leidt tot de volgende conclusies:
 - Verwacht wordt dat golfaanval bij een gefaalde bekleding aan het begin van de storm, door schade of door overbelasting, zal leiden tot afslag van een groot deel van de zanddijk. De berekende afslag bevat vaak de hele kruin, soms wordt een doorbraak berekend. Gezien de onzekerheden in de modellering moet voor een substantieel deel van de Vechtdijk worden uitgegaan van te hoge kans op een doorbraak bij het scenario van een gefaalde bekleding.
 - De (rekenkundige) stormduur van orde 12 uur is wel nodig om te komen tot een doorbraak. Het afslagproces heeft tijd nodig.
 - Op de onderzochte locaties is een verband gevonden tussen het overslagdebiet en de restbreedte na golfaanval op het buitentalud.
 - De restbreedtes die worden gevonden in de berekeningen laten zien dat met een zanddijk bekleed met gras, gecombineerd met gericht risicogestuurd beheer en onderhoud het voldoen aan de overstromingskanseisen reëel is.
- Wanneer meer bekend is over de sterkte van grasbekledingen op zanddijken kan nader geanalyseerd worden wat nodig is om vanuit risicogestuurd beheer en onderhoud de overstromingskans te beheersen door keuzes in ontwerp, inspectie, beheer en onderhoud en crisismanagement integraal af te wegen.

6 Conclusies en overwegingen go no-go

6.1 Conclusies

Het doel van deze relevantiestudie is om te kijken of kennisontwikkeling op het gebied van de erosiebestendigheid van gras op zand ook echt kan leiden tot een impact op de scope van de verbetering van de Vechtdijk. 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.

Voorafgaand aan de grootschalige erosieproeven is een go no-go moment ingebouwd. Deze conclusies dienen ter ondersteuning van de beslissing hierover.

Redenen waarom het aantonen van een significante erosiebestendigheid niet leidt tot een impact op de scope van de dijkverbeteringen van de Vechtdijk:

- **Geotechnische instabiliteit (GABI of STBI) binnenwaarts wordt maatgevend (Hoofdstuk 2).**

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 mogelijk toch een significante bijdrage leveren aan de overstromingskans.

- **Hydraulische belasting (Hoofdstuk 3)**

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. Middelmattige 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.

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 langstroming

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 onderkent dat een zanddijk met een grasbekleding hiervoor extra kwetsbaar is, waardoor het mogelijk wel een significante bijdrage levert aan de overstromingskans. Voor de meeste dijkstrekkingen is de stroomsnelheid echter zo laag dat verwacht mag worden dat erosie door langsstroming geen significante verhoging van de overstromingskans oplevert.

- **Reststerkte (Hoofdstuk 4)**

Er is gekeken naar de reststerkte van een zanddijk onder golfwerking, 1) om te kijken in hoeverre de bekleding op het buitentalud relevant is en 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 (Hoofdstuk 5)**

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 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. Om de sterkte van de grasmat bij schade beter te kunnen inschatten wordt geadviseerd om deze schades tijdens het erosieonderzoek te beproeven. Dit kan antwoord geven op de vraag in welke schades in welke mate leiden tot erosie van het kernmateriaal. Bij de afslagberekeningen is namelijk uitgegaan van falen van de hele bekleding aan het begin van de storm. Dit scenario is misschien geldig bij een volstrekt afgestorven grasbekleding na een droge zomer, maar het is de vraag in hoeverre dit ook voor bijvoorbeeld konijnengangen geldt en graverij door honden.

6.2 Samenvatting overwegingen voor go/ no go beslissing

Voor het **buitentalud** wordt verwacht dat voor circa 50% van de Vechtdijk onderzoek naar de erosiebestendigheid van gras op zand in de golfklapzone relevant is. Op basis van de huidige stand van het onderzoek wordt voor de andere 50% een zodanige rekenwaarde van de golfbelasting verwacht dat gras op zand het hier niet zal redden en een andere bekleding nodig is.

Voor de **kruin en het binnentalud** wordt verwacht dat voor circa 90% van de Vechtdijk onderzoek naar de erosiebestendigheid van gras op zand bij golfoverslag relevant is. Indien een sterkte kan worden aangetoond die gelijk is aan die volgt uit de Vechtdijk proeven uit 2010, dan voldoet 75% van de steekproef aan de doorsnede-eis signaleringswaarde (categoriegrens IIv).

Deze percentages kunnen stijgen met de komst van de nieuwe hydraulische databases, waarvan verwacht wordt dat deze mogelijk gunstiger zijn. Ook een herverdeling van de standaard faalkansruimtes van bijvoorbeeld piping naar de bekleding op het buitentalud kan voor de Vechtdijk nog een optimalisatie opleveren. Anderzijds zullen de hydraulische belastingen in de toekomst waarschijnlijk toenemen, waardoor het beoordelen bij een later zichtjaar de percentages juist ongunstig zal beïnvloeden.

Het is zeer onwaarschijnlijk dat met het onderzoek naar de erosiebestendigheid van gras op zand de scope van de dijkversterking tot nul kan worden gereduceerd. Bij een gunstig resultaat van het erosie-onderzoek is het wel waarschijnlijk dat de scope met tientallen procenten aan dijk lengte kan worden gereduceerd.

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] Model Uncertainty in the Vechtdelta, Estimation of water level uncertainty substantiated with physical calculations, HKV, PR4049.10, February 2020
- [3] KPR Factsheet werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag OI2014v4, d.d. 8-3-2018, versie 2, M. de Visser en R. Jongejan
- [4] Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven SBW reststerkte; analyse Deltagootproeven, Deltares kenmerk 1204200-008, versie 2 18-5-2012
- [5] Schematiseringshandleiding Grasbekleding, WBI2017, versie 4.0, Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 28 november 2019
- [6] Logboek Dijktraject 9-1, Vecht Noord Wettelijke Beoordeling Primaire Waterkeringen 2017-2022, Waterschap Drents Overijsselse Delta, versie 1.3, 5-11-2018
- [7] Logboek Dijktraject 53-3, Vecht Zuid Wettelijke Beoordeling Primaire Waterkeringen 2017-2022, Waterschap Drents Overijsselse Delta, versie 0.3, 14-12-2017
- [8] Stand van zaken kennis gras op zand, Product 1, Deltares projectnummer 11204369-002, definitief versie 1.0, 7-7-2020.
- [9] Invloed hoek van golfaanval op graserosie op dijken. Deltares rapport 11203720-017-GEO-0001, juli 2019.
- [10] Erosiebestendigheid gras op overstromend water, WL| Delft Hydraulics, ir. H.J. Verhey, Q2610, januari 2000
- [11] Deep learning video analysis as measurement technique in physical models, J.P. den Bieman, M.P. de Ridder, M.R.A. van Gent, Coastal Engineering 158 (2020) 103689
- [12] Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid, Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving
- [13] Semi-probabilistic assessment of wave impact and runup on grass revetments, WTI Product C.4, W.J. Klerk (Deltares), R. Jongejan (Jongejan RMC), Deltares project 1220080-005-ZWS-0003, December 2016

A Bijlagen bij hydraulische belastingen

A.1 Profielen

In onderstaande tabellen zijn de voor de berekeningen gebruikte profielen opgenomen. Per profiel is ook de dijknormaal en het gekoppelde uitvoerpunt aangegeven.

Traject 9-1

Profiel	Aangeleverd door	Dijknormaal [° t.o.v. Noord]	Voorland geschematiseerd?	Uitvoerpunt
2,3	Deltares	175	ja	OV_1_9-1_dk_00021*
2,6	Deltares	180	ja	OV_1_9-1_dk_00024*
9,2	Deltares	150	ja	OV_1_9-1_dk_00084*
11,20	WDODelta	225	ja	OV_1_9-1_dk_00101*
11,20	WDODelta	225	ja	OV_1_9-1_dk_00102*
11,54	WDODelta	170	ja	OV_1_9-1_dk_00105*
11,76	WDODelta	135	ja	OV_1_9-1_dk_00106*
11,76	WDODelta	135	ja	OV_1_9-1_dk_00107*
11,7	Deltares	175	ja	OV_1_9-1_dk_00109*
12,5	Deltares	270	ja	OV_1_9-1_dk_00118*
12,9	Deltares	180	ja	OV_1_9-1_dk_00121*
13,25	WDODelta	225	ja	OV_1_9-1_dk_00122*
14,0	Deltares	190	ja	OV_1_9-1_dk_00132*
15,6	Deltares	270	ja	OV_1_9-1_dk_00148*
16,2	Deltares	245	ja	OV_1_9-1_dk_00154*
17,4	Deltares	145	ja	OV_1_9-1_dk_00166*
18,0	Deltares	195	ja	OV_1_9-1_dk_00172*
18,37	WDODelta	225	ja	OV_1_9-1_dk_00173*
18,2	Deltares	225	ja	OV_1_9-1_dk_00174*
18,90	WDODelta	180	ja	OV_1_9-1_dk_00178*
18,7	Deltares	200	ja	OV_1_9-1_dk_00179*
19,2	Deltares	160	ja	OV_1_9-1_dk_00184*
19,89	WDODelta	225	ja	OV_1_9-1_dk_00188*
19,89	WDODelta	225	ja	OV_1_9-1_dk_00189*
19,8	Deltares	255	ja	OV_1_9-1_dk_00190*
20,58	WDODelta	270	ja	OV_1_9-1_dk_00195*
20,4	Deltares	210	ja	OV_1_9-1_dk_00196*
21,2	Deltares	185	ja	OV_1_9-1_dk_00204*
21,54	WDODelta	190	ja	OV_1_9-1_dk_00205*
21,84	WDODelta	260	ja	OV_1_9-1_dk_00209*

*zowel sterkteberekening/ overslagdebiet als golfcondities

Traject 53-3

Profiel	Aangeleverd door	Dijknormaal [° t.o.v. Noord]	Voorland geschematiseerd?	Uitvoerpunt
1225	Deltares	15	ja	OV_1_53-3_dk_00003*
1229	WDODelta	340	ja	OV_1_53-3_dk_00006*
1222	Deltares	340	ja	OV_1_53-3_dk_00006*
1216	Deltares	5	ja	OV_1_53-3_dk_00012*
1161	WDODelta	5	ja	OV_1_53-3_dk_00013***

Profiel	Aangeleverd door	Dijknormaal [° t.o.v. Noord]	Voorland geschematiseerd?	Uitvoerpunt
1161	WDODelta	5	ja	OV_1_53-3_dk_00014**
1171	Deltares	20	ja	OV_1_53-3_dk_00052*
390	WDODelta	15	ja	OV_1_53-3_dk_00081*
1135	Deltares	20	ja	OV_1_53-3_dk_00081*
360	WDODelta	50	ja	OV_1_53-3_dk_00083*
1131	Deltares	340	ja	OV_1_53-3_dk_00084*
334	WDODelta	355	ja	OV_1_53-3_dk_00086*
299	WDODelta	350	ja	OV_1_53-3_dk_00090*
293	WDODelta	280	ja	OV_1_53-3_dk_00091*
11,4	Deltares	280	ja	OV_1_53-3_dk_00092*
268	WDODelta	280	ja	OV_1_53-3_dk_00093*
234	WDODelta	315	ja	OV_1_53-3_dk_00097***
201	WDODelta	35	ja	OV_1_53-3_dk_00099*
188	WDODelta	35	ja	OV_1_53-3_dk_00101*
136	WDODelta	25	ja	OV_1_53-3_dk_00106*
1110	Deltares	30	ja	OV_1_53-3_dk_00106*
101	WDODelta	25	ja	OV_1_53-3_dk_00108***
101	WDODelta	25	ja	OV_1_53-3_dk_00109**
1101	Deltares	25	ja	OV_1_53-3_dk_00115*
1094	Deltares	55	ja	OV_1_53-3_dk_00121*
1086	Deltares	45	ja	OV_1_53-3_dk_00129*
1074	Deltares	45	ja	OV_1_53-3_dk_00141*
1069	Deltares	70	ja	OV_1_53-3_dk_00147*
1047	Deltares	50	ja	OV_1_53-3_dk_00168*
1044	Deltares	10	ja	OV_1_53-3_dk_00171*
1040	Deltares	340	ja	OV_1_53-3_dk_00176*
1027	Deltares	30	ja	OV_1_53-3_dk_00188*
1019	Deltares	345	ja	OV_1_53-3_dk_00197*
1014	Deltares	40	ja	OV_1_53-3_dk_00201*

*zowel sterkteberekening/ overslagdebiet als golfcondities

**alleen sterkteberekening/ overslagdebiet

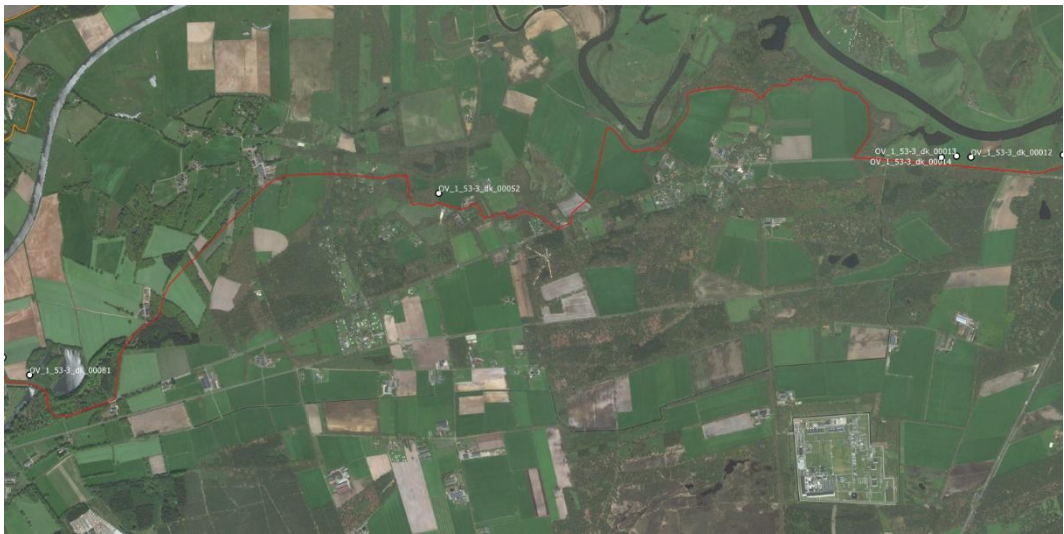
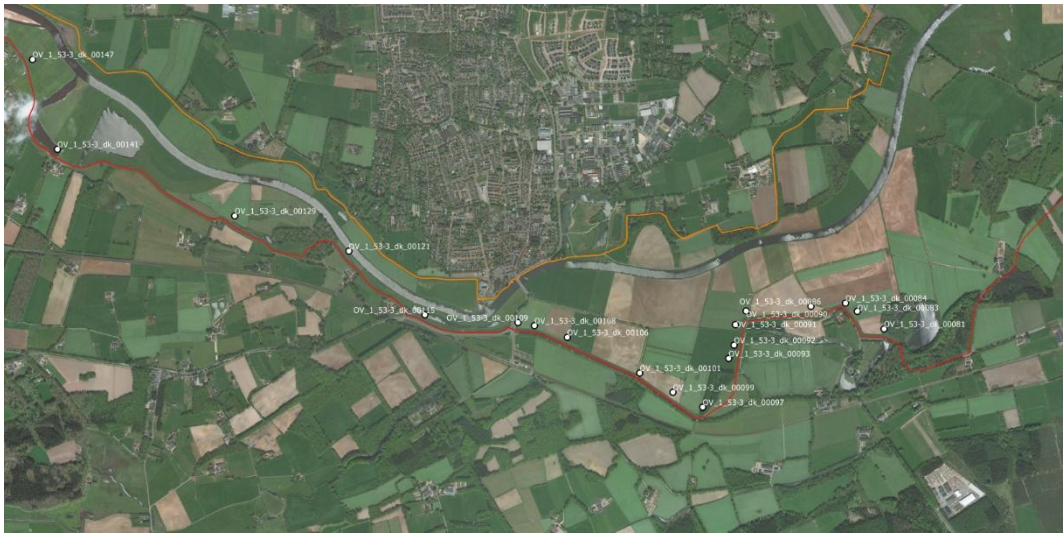
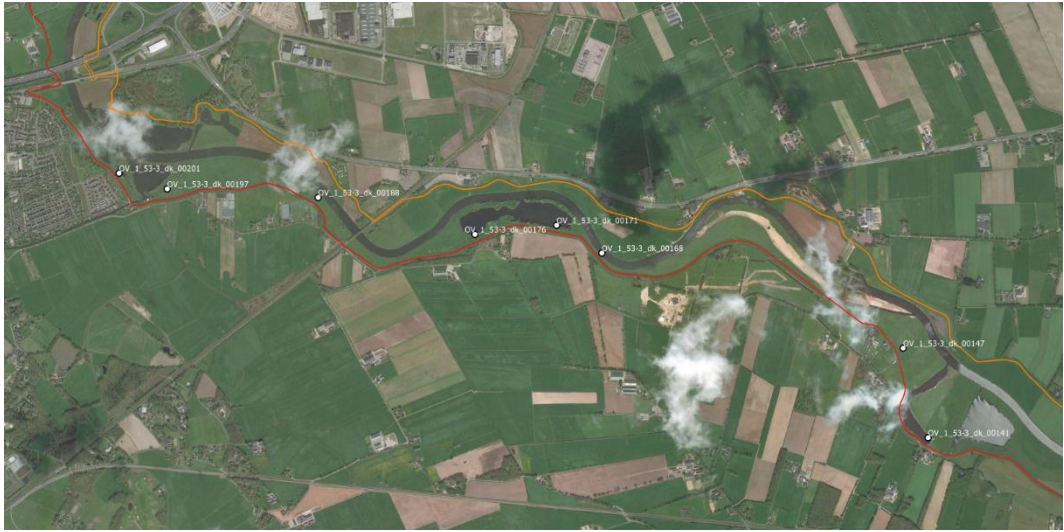
***alleen golfcondities

A.2 Uitvoerpunten

A.2.1 Uitvoerpunten 9-1



A.2.2 Uitvoerpunten 53-3





A.3 Waterstanden 9-1

In onderstaande tabel is per uitvoerpunt de waterstand met een overschrijdingsfrequentie van 1/10 en 1/40.000 per jaar weergegeven. Tevens is de voor het berekenen van de golfcondities gebruikte laagste en hoogste waterstand opgenomen in de tabel.

Uitvoerpunt	Waterstand [m+NAP]		Laagste waterstand* [m+NAP]	Hoogste waterstand* [m+NAP]
	T = 10 jaar	T = 40.000 jaar		
OV_1_9-1_dk_00021	4,39	5,73	4,00	5,72
OV_1_9-1_dk_00024	4,42	5,71	4,00	5,70
OV_1_9-1_dk_00084	3,83	5,32	3,50	5,31
OV_1_9-1_dk_00101	3,65	5,21	3,50	5,20
OV_1_9-1_dk_00102	3,64	5,21	3,50	5,20
OV_1_9-1_dk_00105	3,61	5,20	3,50	5,19
OV_1_9-1_dk_00106	3,63	5,20	3,50	5,19
OV_1_9-1_dk_00107	3,63	5,20	3,50	5,19
OV_1_9-1_dk_00109	3,61	5,18	3,50	5,17
OV_1_9-1_dk_00118	3,43	4,88	3,00	4,87
OV_1_9-1_dk_00121	3,41	4,87	3,00	4,86
OV_1_9-1_dk_00122	3,38	4,83	3,00	4,82
OV_1_9-1_dk_00132	3,24	4,67	3,00	4,66
OV_1_9-1_dk_00148	3,09	4,55	3,00	4,54
OV_1_9-1_dk_00154	3,00	4,45	3,00	4,44
OV_1_9-1_dk_00166	2,83	4,30	2,50	4,29
OV_1_9-1_dk_00172	2,67	4,13	2,50	4,12
OV_1_9-1_dk_00173	2,66	4,10	2,50	4,09
OV_1_9-1_dk_00174	2,65	4,09	2,50	4,08
OV_1_9-1_dk_00178	2,61	4,05	2,50	4,04
OV_1_9-1_dk_00179	2,59	4,04	2,50	4,03
OV_1_9-1_dk_00184	2,55	4,02	2,50	4,01
OV_1_9-1_dk_00188	2,43	3,84	2,00	3,83
OV_1_9-1_dk_00189	2,40	3,79	2,00	3,78
OV_1_9-1_dk_00190	2,40	3,78	2,00	3,77
OV_1_9-1_dk_00195	2,33	3,71	2,00	3,70

Uitvoerpunt	Waterstand [m+NAP]		Laagste waterstand* [m+NAP]	Hoogste waterstand* [m+NAP]
	T = 10 jaar	T = 40.000 jaar		
OV_1_9-1_dk_00196	2,31	3,68	2,00	3,67
OV_1_9-1_dk_00204	2,26	3,63	2,00	3,62
OV_1_9-1_dk_00205	2,26	3,63	2,00	3,62
OV_1_9-1_dk_00209	2,22	3,56	2,00	3,55

*t.b.v. berekening golfcondities Hydra-NL

A.4 Waterstanden 53-3

In onderstaande tabel is per uitvoerpunt de waterstand met een overschrijdingsfrequentie van 1/10 en 1/200.000 per jaar weergegeven. Tevens is de voor het berekenen van de golfcondities gebruikte laagste en hoogste waterstand opgenomen in de tabel.

Uitvoerpunt	Waterstand [m+NAP]		Laagste waterstand* [m+NAP]	Hoogste waterstand* [m+NAP]
	T = 10 jaar	T = 200.000 jaar		
OV_1_53-3_dk_00003	5,04	6,41	5,0	6,40
OV_1_53-3_dk_00006	4,97	6,31	4,5	6,30
OV_1_53-3_dk_00006	4,97	6,31	4,5	6,30
OV_1_53-3_dk_00012	4,92	6,17	4,5	6,16
OV_1_53-3_dk_00013	4,91	6,15	4,5	6,14
OV_1_53-3_dk_00014	4,82	6,13	4,5	6,12
OV_1_53-3_dk_00052	3,98	5,43	3,5	5,42
OV_1_53-3_dk_00081	3,68	5,23	3,5	5,22
OV_1_53-3_dk_00081	3,68	5,23	3,5	5,22
OV_1_53-3_dk_00083	3,68	5,22	3,5	5,21
OV_1_53-3_dk_00084	3,67	5,22	3,5	5,21
OV_1_53-3_dk_00086	3,66	5,20	3,5	5,19
OV_1_53-3_dk_00090	3,58	5,16	3,5	5,15
OV_1_53-3_dk_00091	3,58	5,15	3,5	5,14
OV_1_53-3_dk_00092	3,58	5,15	3,5	5,14
OV_1_53-3_dk_00093	3,58	5,15	3,5	5,14
OV_1_53-3_dk_00097	3,58	5,15	3,5	5,14
OV_1_53-3_dk_00099	3,57	5,15	3,5	5,14
OV_1_53-3_dk_00101	3,57	5,15	3,5	5,14
OV_1_53-3_dk_00106	3,54	5,12	3,5	5,11
OV_1_53-3_dk_00106	3,54	5,12	3,5	5,11
OV_1_53-3_dk_00108	3,54	5,11	3,5	5,10
OV_1_53-3_dk_00109	3,53	5,08	3,5	5,07
OV_1_53-3_dk_00115	3,34	4,86	3,0	4,85
OV_1_53-3_dk_00121	3,23	4,70	3,0	4,69
OV_1_53-3_dk_00129	3,13	4,59	3,0	4,58
OV_1_53-3_dk_00141	3,06	4,62	3,0	4,61
OV_1_53-3_dk_00147	3,00	4,47	2,5	4,46
OV_1_53-3_dk_00168	2,62	4,12	2,5	4,11
OV_1_53-3_dk_00171	2,52	4,02	2,5	4,01
OV_1_53-3_dk_00176	2,50	3,99	2,5	3,98
OV_1_53-3_dk_00188	2,26	3,72	2,0	3,71
OV_1_53-3_dk_00197	2,17	3,65	2,0	3,64

Uitvoerpunt	Waterstand [m+NAP]		Laagste waterstand* [m+NAP]	Hoogste waterstand* [m+NAP]
	T = 10 jaar	T = 200.000 jaar		
OV_1_53-3_dk_00201	2,17	3,64	2,0	3,63

*t.b.v. berekening golfcondities Hydra-NL

A.5 Faalkansen GEKB 9-1

In onderstaande tabel zijn de voor de verschillende berekeningen bepaalde terugkeertijden T inclusief bijbehorende indicatieve golfhoogte H_{m0} voor het toetsspoor GEKB weergegeven. De berekeningen waarvoor de faalkans $P_f (=1/T)$ groter is dan de faalkanseis (1/8.333 per jaar) zijn rood gemarkeerd.

Faalkansen traject 9-1 per profiel voor verschillende berekeningen met de verwachtingswaarde en standaardafwijking van het kritieke overslagdebiet

Pro- fiel	T [jaar]	H_{m0} [m]	T [jaar]	H_{m0} [m]	T [jaar]	H_{m0} [m]	T [jaar]	H_{m0} [m]	T [jaar]	H_{m0} [m]	T [jaar]	H_{m0} [m]
	WBI		zand;0,5		zand;0,75		zand;1,0		zand;0,5 extra		zand;1,0 extra	
23	39.437*	0,30	7.984	0,29	7.291	0,29	6.986	0,29	10.600	0,29	8.563	0,29
26	1.000.672	0,49	49.903	0,41	39.029	0,40	34.013	0,39	85.731	0,42	56.987	0,41
92	106.811*	0,24	18.727	0,22	16.238	0,22	15.198	0,22	23.378	0,22	19.757	0,22
1120	16.131	0,29	3.449	0,24	3.228	0,29	3.015	0,23	4.277	0,25	3.709	0,24
1120	15.042	0,29	3.710	0,29	3.362	0,24	3.201	0,29	5.143	0,25	3.844	0,29
1154	42.693*	0,00	10.458	0,14	10.380	0,14	10.427	0,14	11.783	0,15	10.790	0,15
1176	36.168*	0,22	8.055	0,21	7.085	0,21	6.710	0,21	10.389	0,20	8.596	0,21
1176	37.786*	0,16	8.125	0,25	7.377	0,25	6.914	0,25	10.108	0,24	8.677	0,24
117	104.159*	0,15	19.369	0,24	17.672	0,24	16.490	0,24	25.211	0,23	20.493	0,24
125	98.273	0,13	15.301	0,21	13.498	0,21	12.931	0,22	19.286	0,21	15.294	0,21
129	72.366	0,16	17.393	0,17	15.194	0,17	14.474	0,17	18.057	0,17	16.268	0,17
1325	52.747*	0,17	9.675	0,26	9.000	0,26	8.518	0,26	12.056	0,26	10.263	0,26
140	82.292	0,83	15.108	0,27	14.515	0,27	13.119	0,27	19.140	0,26	16.001	0,27
156	47.520	0,16	9.068	0,25	8.196	0,25	7.330	0,26	11.133	0,25	9.385	0,25
162	140.445*	0,26	24.766	0,25	21.722	0,25	20.763	0,25	29.505	0,25	25.070	0,25
174	30.483*	0,12	9.304	0,18	8.621	0,18	8.137	0,18	8.049	0,18	9.541	0,18
180	60.970*	0,26	11.508	0,25	10.856	0,25	10.392	0,26	15.295	0,25	12.207	0,25
1837	41.122	0,27	10.321	0,27	9.028	0,27	8.053	0,27	13.542	0,27	11.041	0,26
182	141.124*	0,17	25.536	0,27	22.795	0,27	21.624	0,27	33.192	0,27	27.098	0,26
1890	45.575*	0,18	9.393	0,25	8.425	0,26	8.033	0,26	11.719	0,25	9.926	0,25
187	42.430*	0,17	8.758	0,25	7.604	0,25	7.189	0,25	10.469	0,24	9.130	0,25
192	15.532*	0,14	4.743	0,20	4.267	0,20	4.148	0,20	4.305*	0,20	4.925	0,20
1989	11.106	0,25	2.432	0,25	2.053	0,25	1.854	0,25	3.405	0,24	2.618	0,24
1989	14.710	0,24	3.225	0,23	2.806	0,24	2.549	0,24	4.405	0,23	3.467	0,23
198	34.651	0,27	7.248	0,26	6.242	0,26	5.708	0,26	9.727	0,26	7.980	0,26
2058	225*	0,41	66	0,29	60	0,29	57	0,29	81	0,28	68	0,29
204	92.951	0,30	24.187	0,30	21.140	0,31	19.192	0,31	33.444	0,30	25.156	0,30
212	79.091*	0,25	14.140	0,26	11.850	0,27	11.093	0,27	18.997	0,25	14.750	0,26
2154	150.424*	0,16	24.604	0,24	23.255	0,24	22.527	0,24	30.559	0,24	25.184	0,24
2184	64.787*	0,36	10.171	0,49	8.627	0,49	7.764	0,48	14.369	0,50	11.020	0,49

*golfoverslag niet dominant

A.6 Faalkansen GEKB 53-3

In onderstaande tabel zijn de voor de verschillende berekeningen bepaalde terugkeertijden T inclusief bijbehorende indicatieve golfhoogte H_{m0} voor het toetsspoor GEKB weergegeven. De berekeningen waarvoor de faalkans $P_f (=1/T)$ groter is dan de faalkanseis ($1/41.667$ per jaar) zijn rood gemarkeerd.

Faalkansen traject 53-3 per profiel voor verschillende berekeningen met de verwachtingswaarde en standaardafwijking van het kritieke overslagdebiet

Pro- fiel	T	H_{m0}	T	H_{m0}	T	H_{m0}	T	H_{m0}	T	H_{m0}	T	H_{m0}
	[jaar]	[m]	[jaar]	[m]	[jaar]	[m]	[jaar]	[m]	[jaar]	[m]	[jaar]	[m]
	WBI		zand:0,5		zand:0,75		zand:1,0		zand :0,5 extra		zand:1,0 extra	
1225	1.778.862	0,57	588.046*	0,43	455.038*	0,42	390.495	0,41	220.176	0,39	230.579	0,39
1229	612.071	0,85	203.027	0,58	156.818	0,57	134.429	0,57	78.442	0,57	81.771	0,56
1222	705.620	0,70	90.214	0,55	72.299	0,55	62.597	0,57	34.071	0,56	35.751	0,56
1216	3.156.993	0,76	823.301*	0,57	645.254	0,56	548.164	0,56	296.543	0,54	311.683	0,55
1161	3.180.578	0,63	468.051	0,58	346.314	0,58	295.165	0,58	147.858	0,56	157.012	0,56
1171	1.297.703	0,29	236.936	0,26	200.516	0,26	208.505	0,26	152.876	0,26	156.081	0,26
390	101.854	0,27	13.356	0,30	10.900	0,30	9.579	0,30	6.330	0,30	6.535	0,30
1135	729.979	0,31	74.206	0,36	58.797	0,45	51.203	0,45	30.525	0,44	31.770	0,44
360	144.315	0,27	19.703	0,27	16.184	0,27	14.389	0,27	9.267	0,28	9.545	0,28
1131	485.192	0,33	64.295	0,34	52.446	0,34	46.624	0,34	30.619	0,35	31.522	0,35
334	775.902	0,35	111.238	0,47	89.235	0,47	78.044	0,47	48.217	0,46	49.972	0,46
299	691.311	0,36	109.505	0,51	89.613	0,51	79.014	0,51	49.862	0,51	51.622	0,51
293	276.505	0,33	30.006	0,35	24.490	0,36	21.494	0,36	13.697	0,36	14.134	0,36
1124	477.217	0,33	56.645	0,34	45.902	0,35	40.119	0,35	25.241	0,35	25.942	0,35
268	164.504	0,32	23.122	0,33	19.129	0,33	17.208	0,33	11.216	0,33	11.539	0,33
201	342.384	0,30	53.508	0,28	45.079	0,28	40.298	0,28	27.826	0,29	28.522	0,29
188	322.334	0,29	46.045	0,30	37.767	0,30	34.004	0,30	22.864	0,31	23.488	0,30
136	283.950	0,27	44.306	0,27	35.685	0,27	32.635	0,27	22.261	0,28	22.837	0,28
1110	762.904	0,28	129.883	0,28	108.246	0,28	97.799	0,28	62.258	0,32	64.059	0,32
101	12.578*	-	2.721*	0,12	2.360*	0,12	2.227*	0,12	2.048*	0,11	2.029*	0,11
1101	2.404.122*	-	404.550	0,24	346.347	0,24	327.631	0,24	247.695	0,25	252.366	0,24
1094	17.422.796*	-	3.318.917*	-	2.910.563*	-	2.742.296*	-	2.180.117	0,52	2.190.814	0,51
1086	13.949.396*	0,52	1.486.867	0,51	1.272.085	0,51	1.127.061	0,51	672.536	0,49	699.894	0,49
1074	3.406.169	0,23	342.157	0,23	270.440	0,24	234.487	0,24	134.349	0,25	141.092	0,25
1069	1.767.738*	-	301.001*	-	275.082*	-	260.324*	-	199.895	0,15	211.248	0,15
1047	814.377*	-	150.191	0,19	155.213	0,19	142.785	0,19	118.458	0,20	119.625	0,20
1044	1.954.024	0,69	272.949*	0,45	231.332*	0,45	209.231*	0,45	133.092	0,65	137.299	0,65
1040	422.146	0,26	71.760	0,26	62.057	0,27	57.059	0,27	41.350	0,27	42.230	0,27
1027	2.533.700	0,67	462.938	0,63	394.552	0,63	354.065	0,62	242.253	0,61	247.914	0,61
1019	2.019.629	0,64	367.591	0,64	311.551	0,64	287.548	0,64	199.590	0,63	206.620	0,63
1014	3.069.996	0,68	670.803	0,67	592.565	0,66	542.843	0,66	381.784	0,65	390.291	0,65

*golfoverslag niet dominant

A.7 Overslagdebieten 9-1

In onderstaande tabel is het voor de verschillende profielen bepaalde overslagdebiet q bij een terugkeertijd van 8.333 jaar gegeven.

Overslagdebiet per profiel voor traject 9-1

ID	Profiel	q [l/s per m]
1	23	8,24
2	26	0,45
3	92	0,98
18	1120	49,71*
19	1120	43,80*
20	1154	1,00
21	1176	9,27
22	1176	9,35
4	117	0,56
5	125	1,63
6	129	0,42
23	1325	4,23
7	140	1,35
8	156	6,01
9	162	0,21
10	174	5,05
11	180	1,87
24	1837	4,86
12	182	0,47
25	1890	5,18
13	187	6,93
14	192	49,00*
26	1989	73,02*
27	1989	45,36*
15	198	9,57
28	2058	-**
16	204	0,64
17	212	2,37
29	2154	0,05
30	2184	5,11

*het berekende overslagdebiet is groot. Uit de berekeningen volgt dat sprake is van convergentie en ook de Z-waarde behorende bij de maatgevende windrichting is nagenoeg 0.

**het overslagdebiet kon met zowel Ringtoets als Hydra-NL niet berekend worden.

A.8 Overslagdebieten 53-3

In onderstaande tabel is het voor de verschillende profielen bepaalde overslagdebiet q bij een terugkeertijd van 41.667 jaar gegeven.

Overslagdebiet per profiel voor traject 53-3

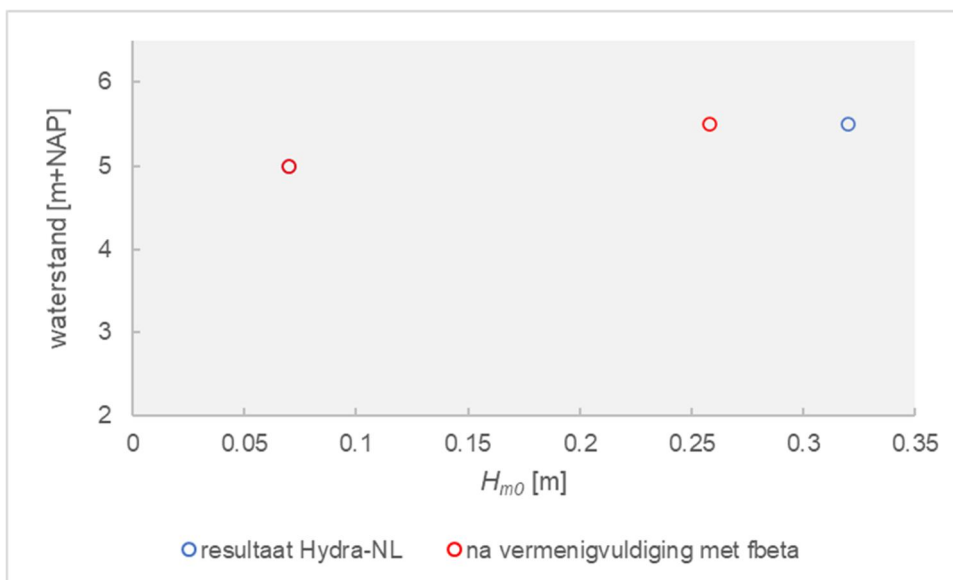
ID	Profiel	q [l/s per m]
30	1225	0,21
29	1229	2,76
31	1222	0,98
28	1216	0,15
26	1161	0,49

ID	Profiel	q [l/s per m]
27	1171	0,07
10	390	36,72
25	1135	3,36
9	360	23,71
24	1131	3,71
8	334	1,77
7	299	1,64
6	293	11,57
23	1124	4,73
5	268	18,26
4	201	4,77
3	188	6,32
2	136	6,8
22	1110	1,05
1	101	-*
21	1101	0,03
20	1094	0,00
19	1086	0,02
18	1074	0,43
17	1069	0,02
16	1047	0,06
15	1044	0,24
14	1040	2,26
13	1027	0,07
12	1019	0,09
11	1014	0,02

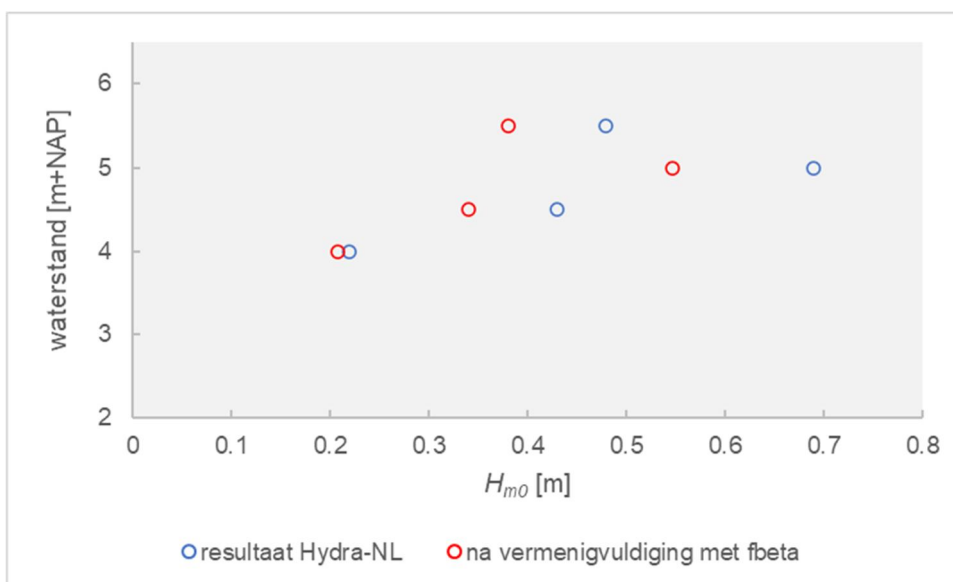
*het berekende overslagdebiet is erg groot en onwaarschijnlijk. Uit de illustratiepunten volgt dat de Z-waarde veel groter is dan 0. De berekening is dus niet geconvergeerd. Met Hydra-NL is ook getracht het overslagdebiet te berekenen. De berekening wordt echter afgebroken.

A.9 Golfcondities golfklapzone 9-1

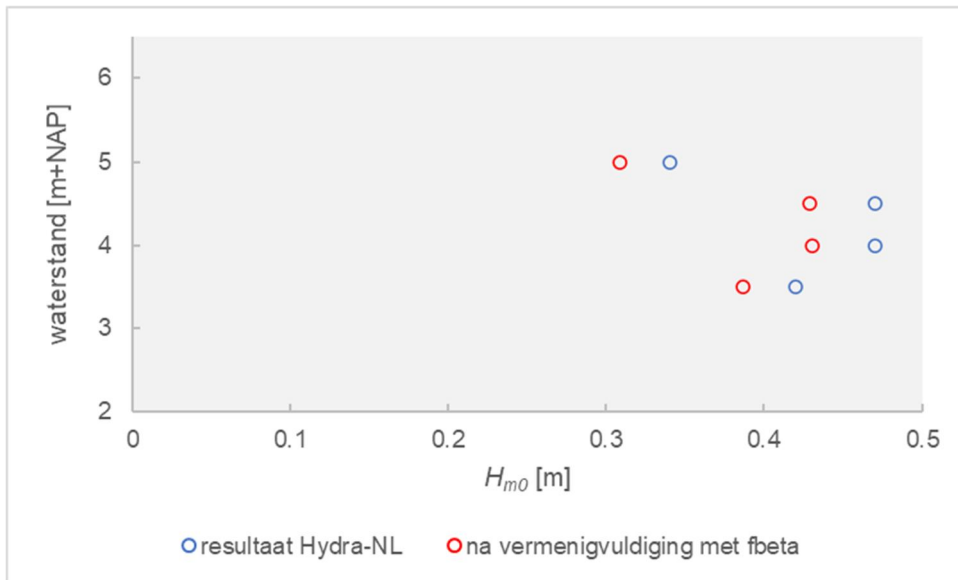
Alle in deze bijlage weergegeven figuren zijn gebaseerd op de met Hydra-NL berekende golfcondities voor het bekledingstype 'Grasmat golfklapzone (invloed golfinvalshoek, voor ToM)' en een terugkeertijd van 40.000 jaar.



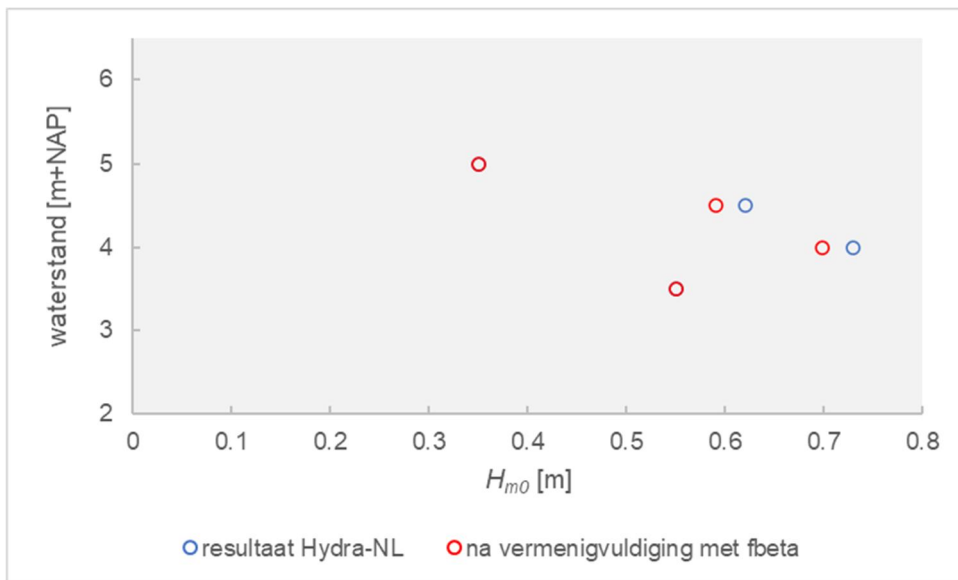
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00021 met profiel 23.prf



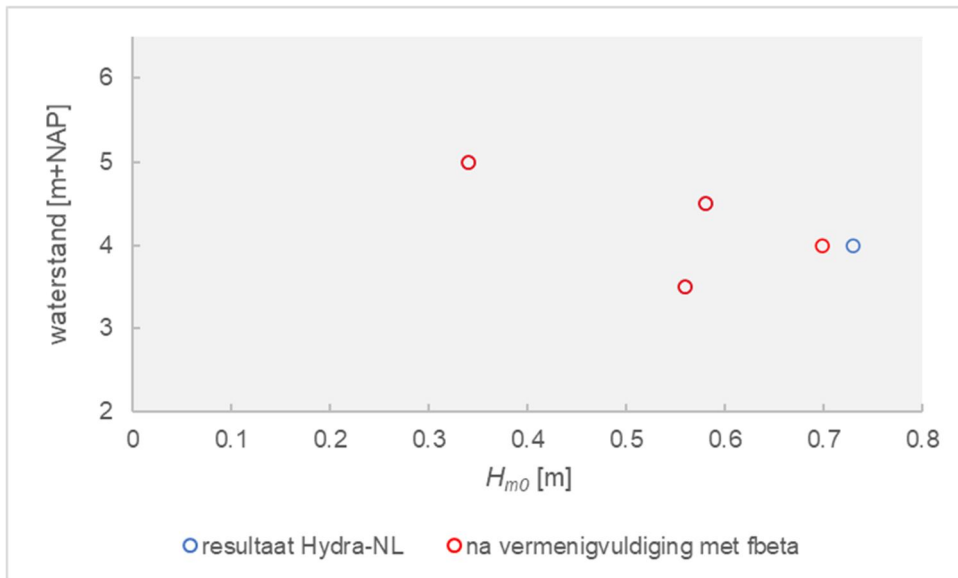
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00024 met profiel 26.prf



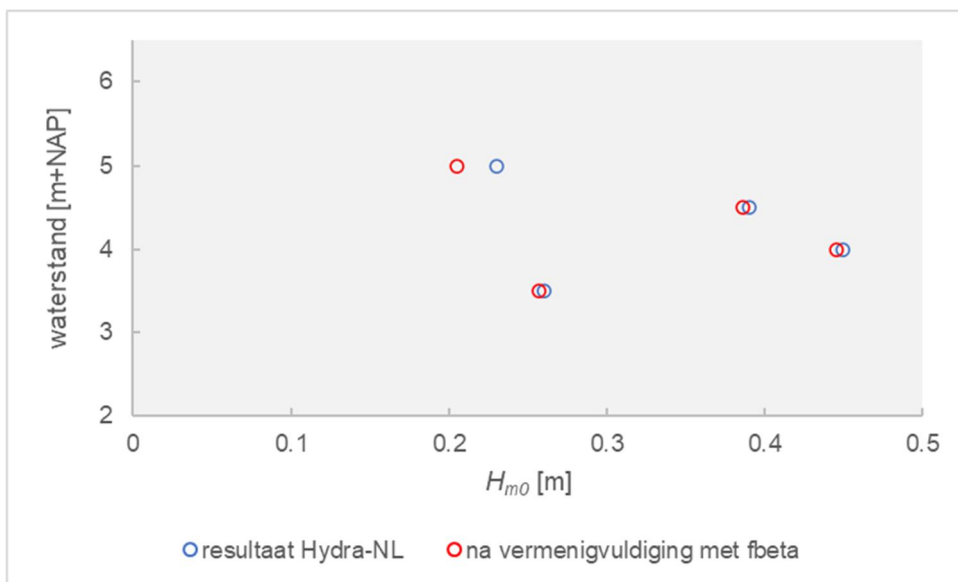
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00084 met profiel 92.prf



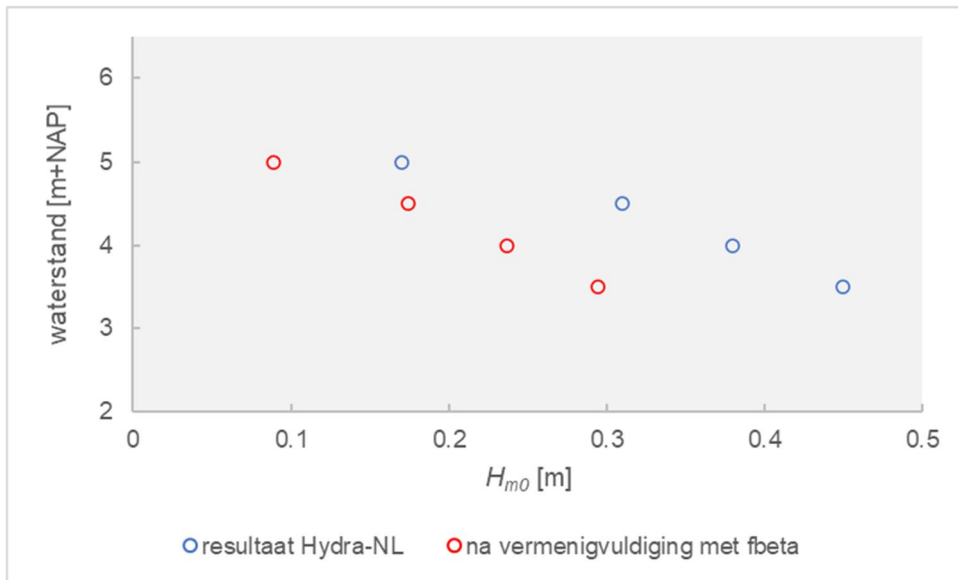
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00101 met profiel 1120.prf



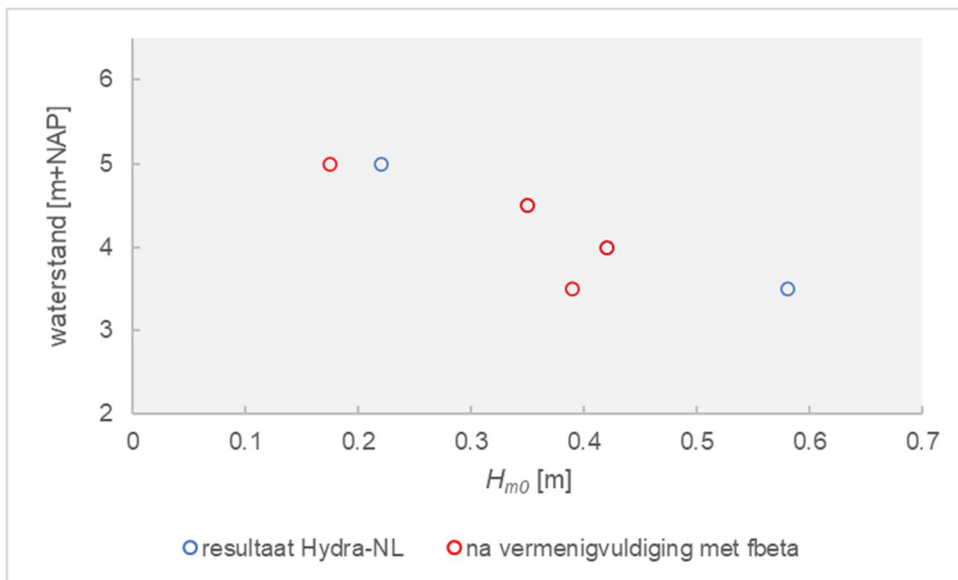
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00102 met profiel 1120.prf1



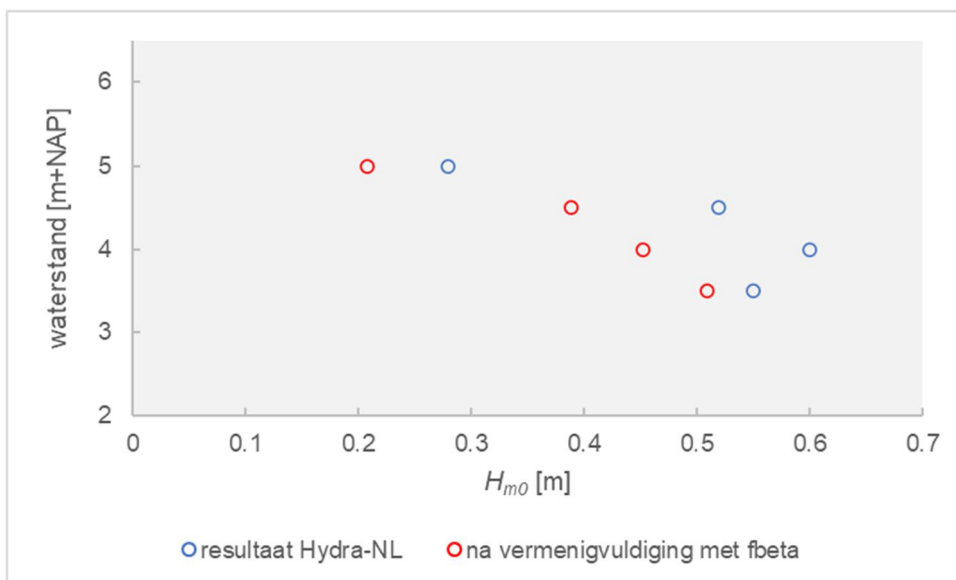
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00105 met profiel 1154.prf1



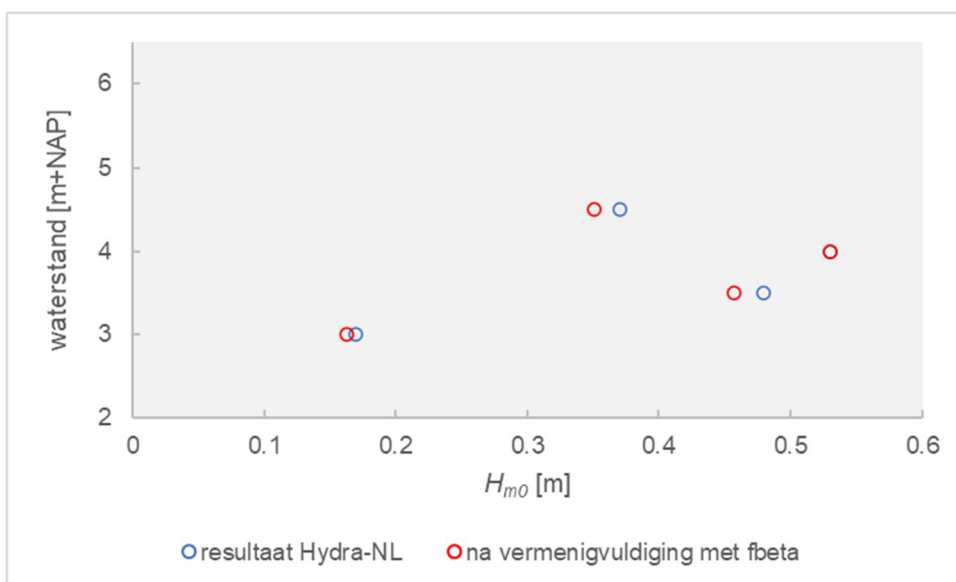
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00106 met profiel 1176.prf



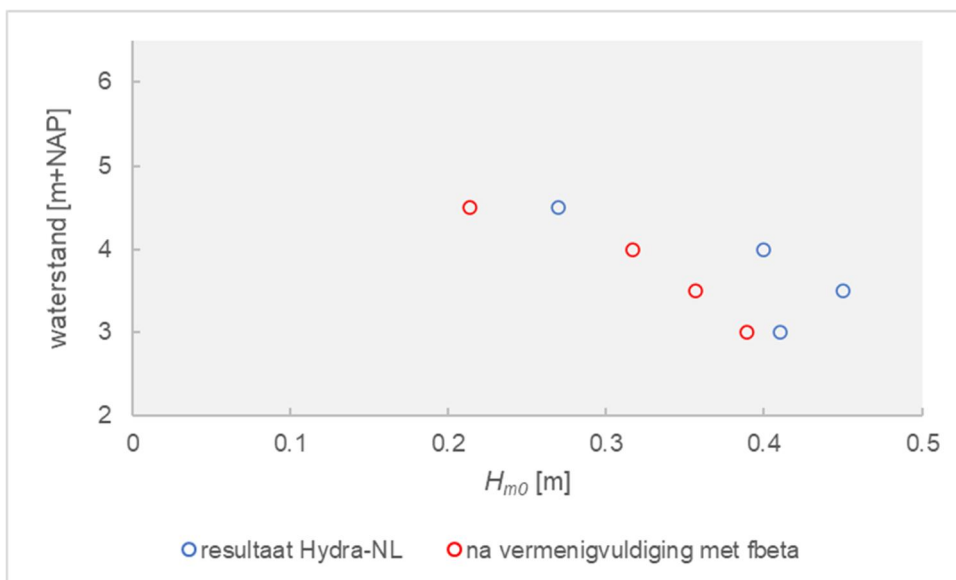
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00107 met profiel 1176.prf



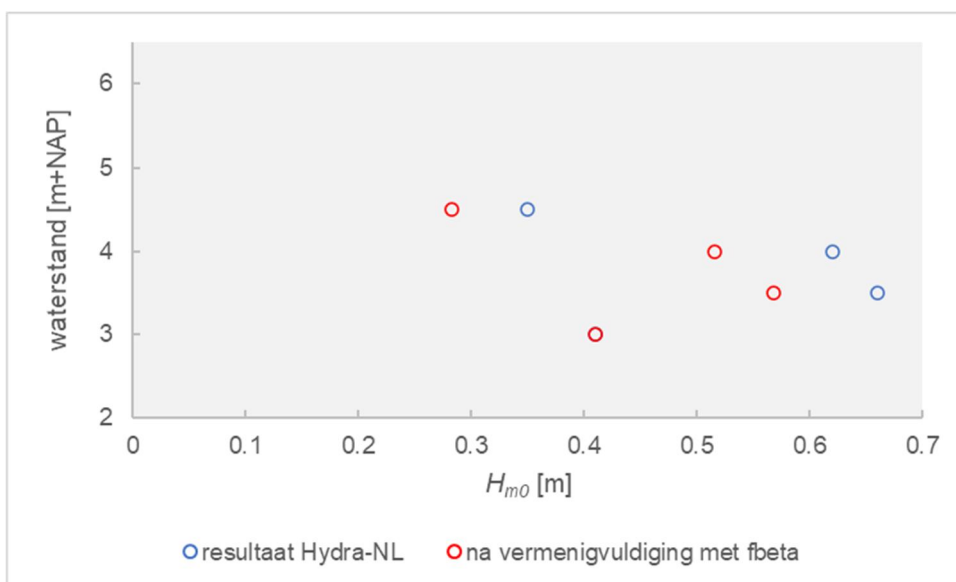
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00109 met profiel 117.prf



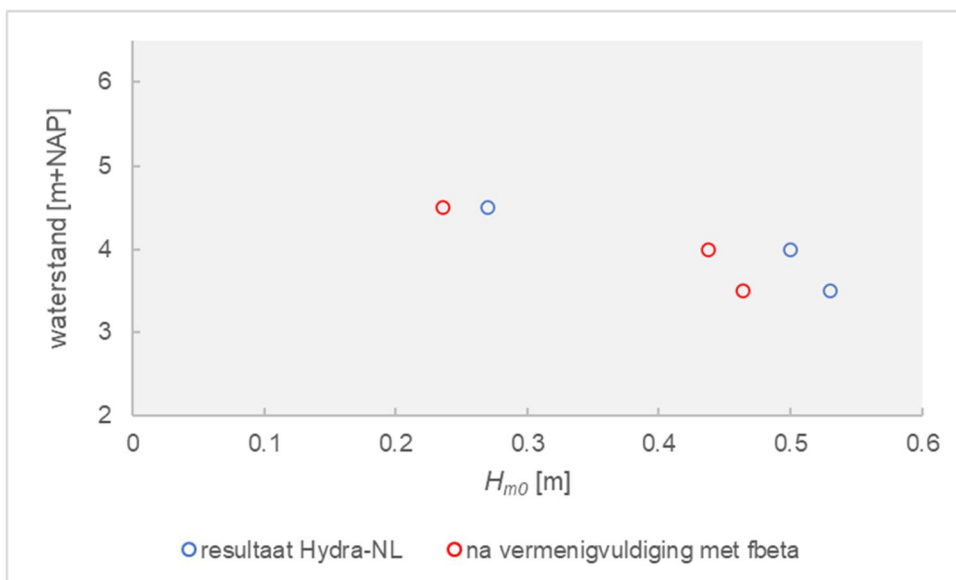
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00118 met profiel 125.prf



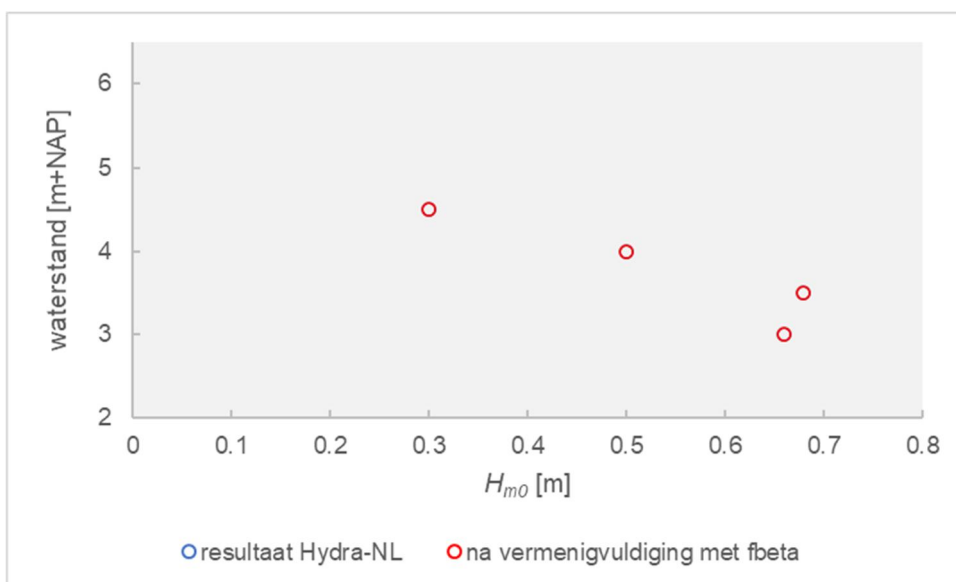
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00121 met profiel 129.prf



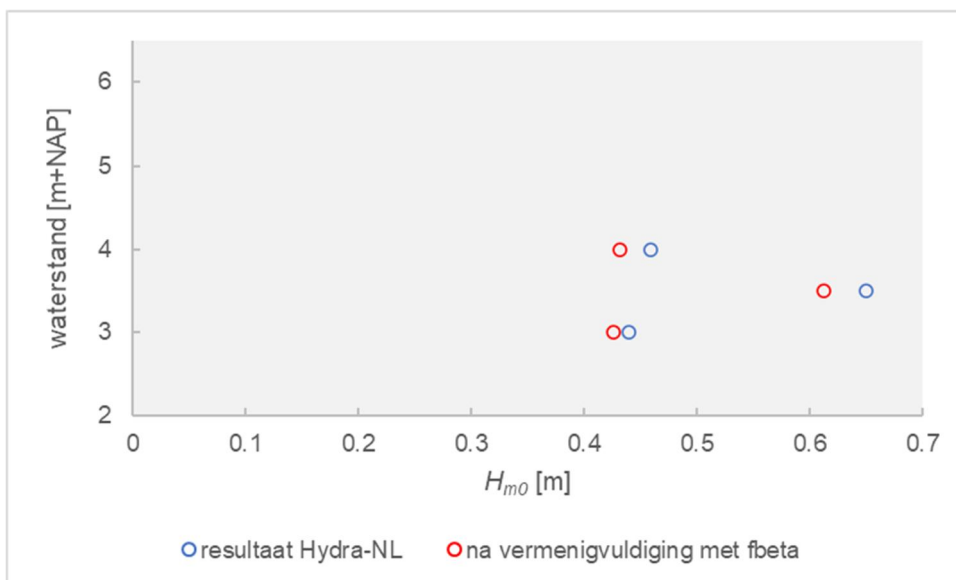
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00122 met profiel 1325.prf



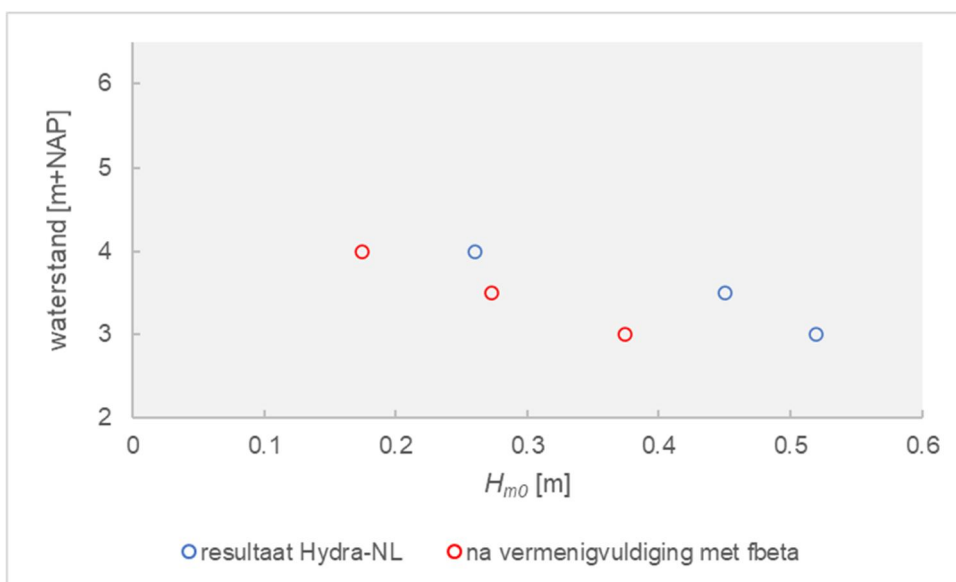
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00132 met profiel 140.prf



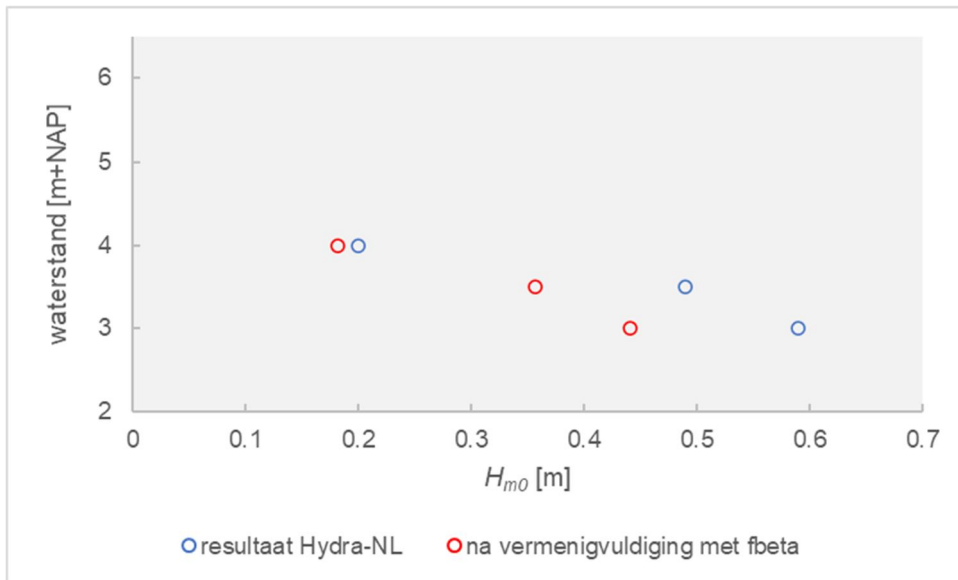
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00148 met profiel 156.prf



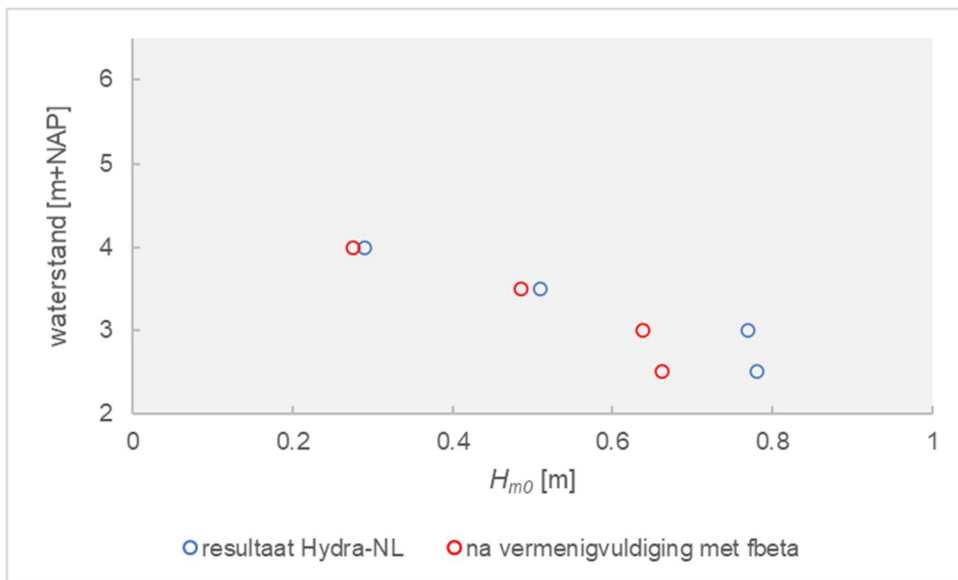
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00154 met profiel 162.prf



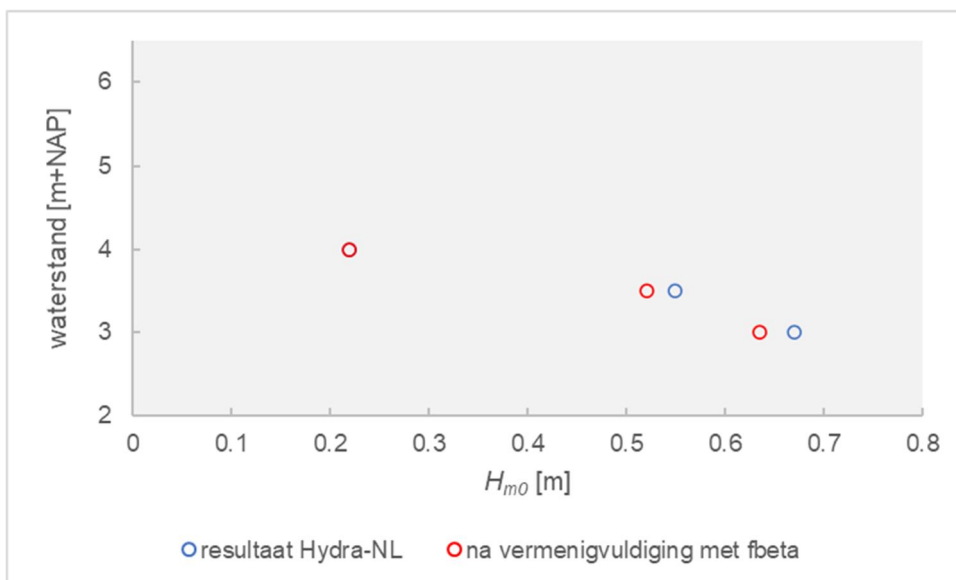
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00166 met profiel 174.prf



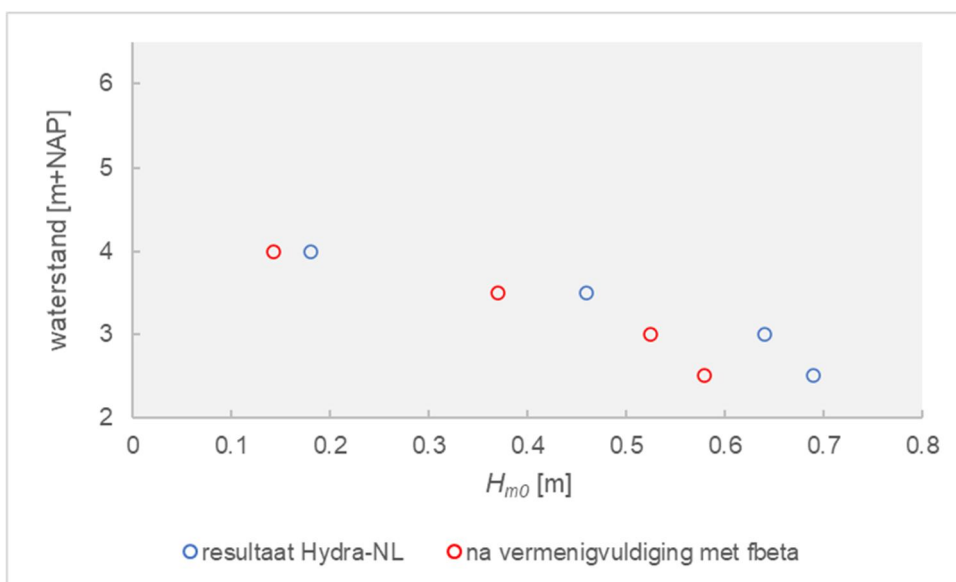
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00172 met profiel 180.prf



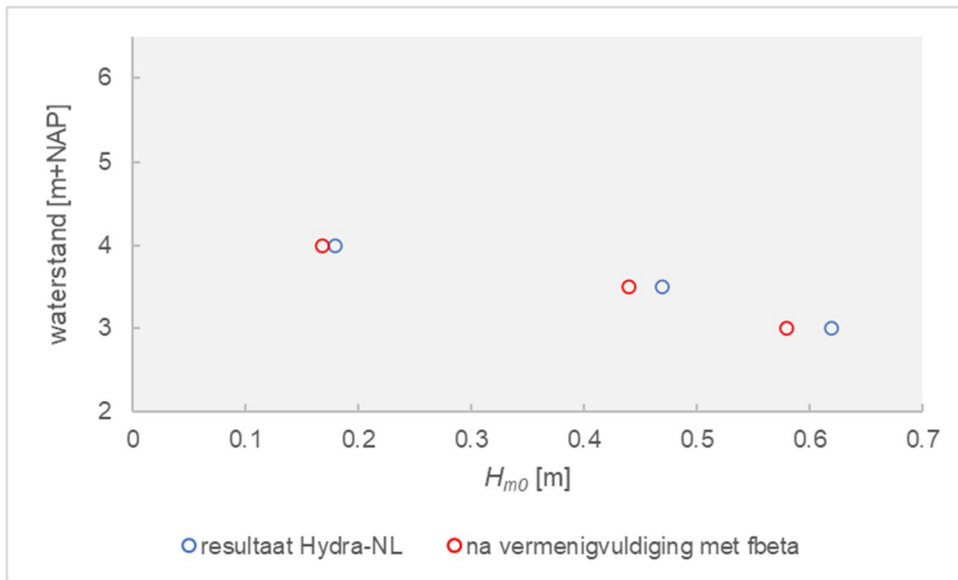
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00173 met profiel 1837.prf



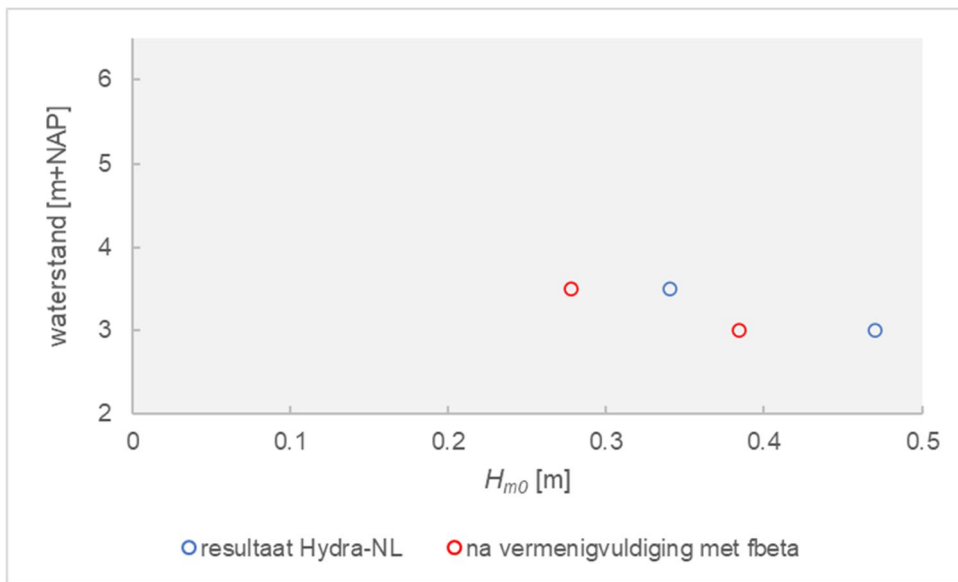
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00174 met profiel 182.prf



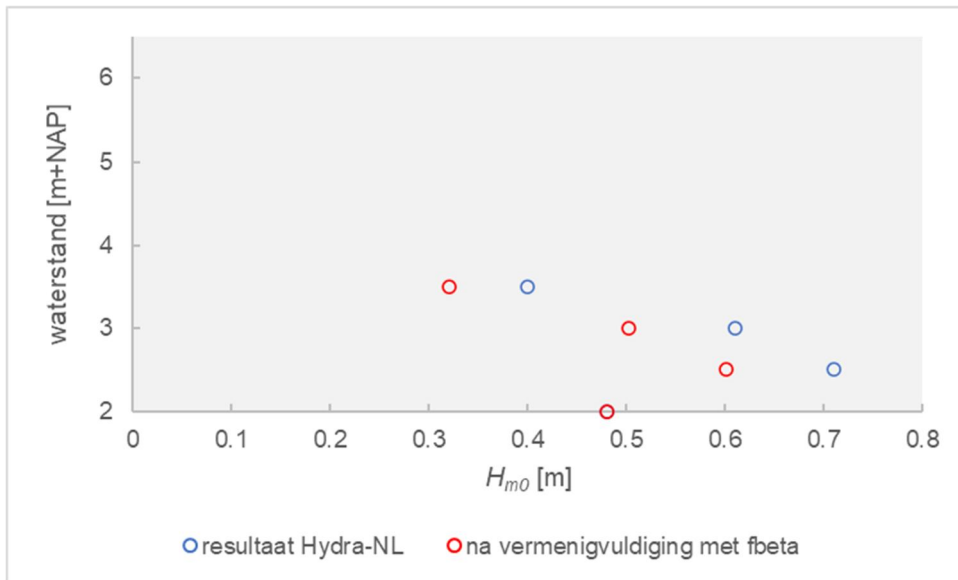
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00178 met profiel 1890.prf



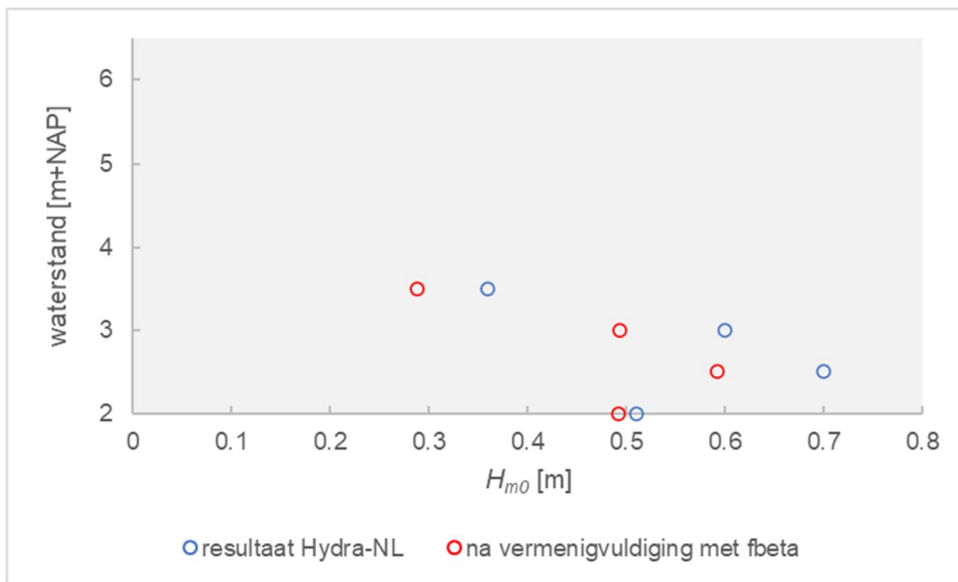
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00179 met profiel 187.prf



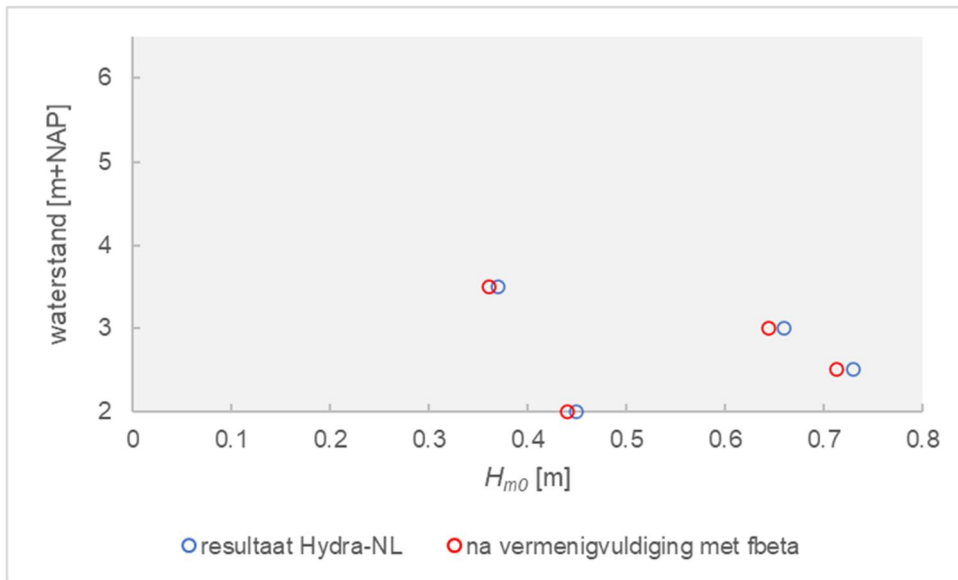
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00184 met profiel 192.prf



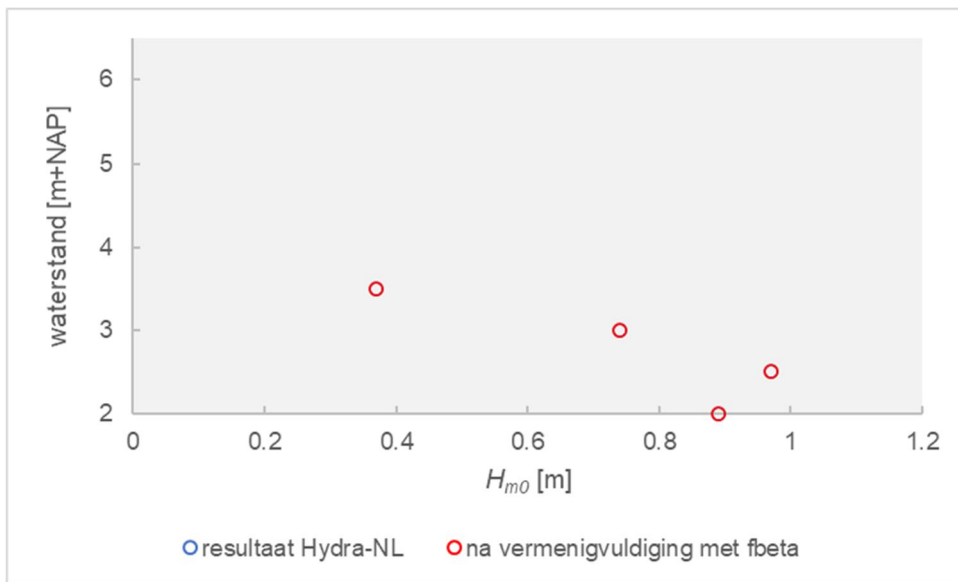
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00188 met profiel 1989.prf1



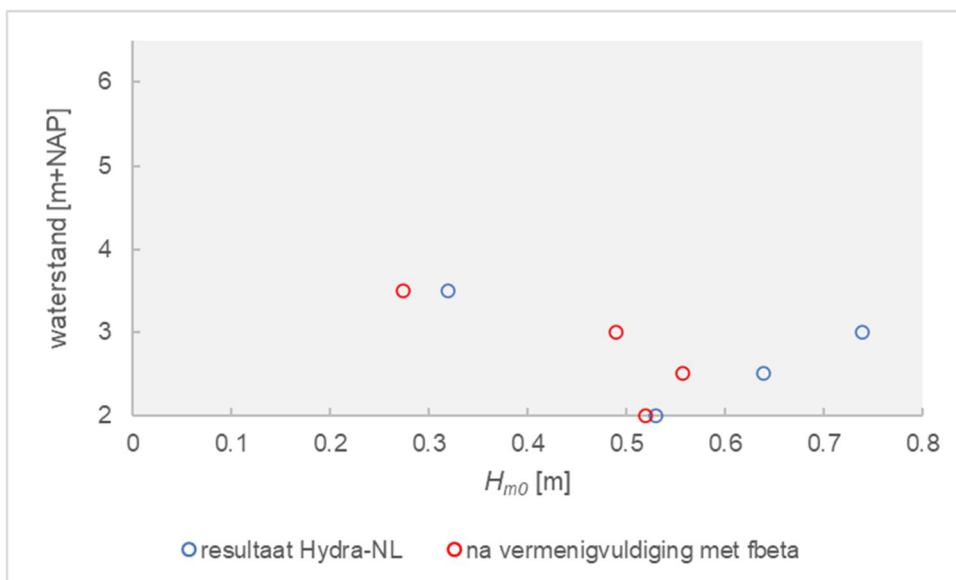
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00189 met profiel 1989.prf1



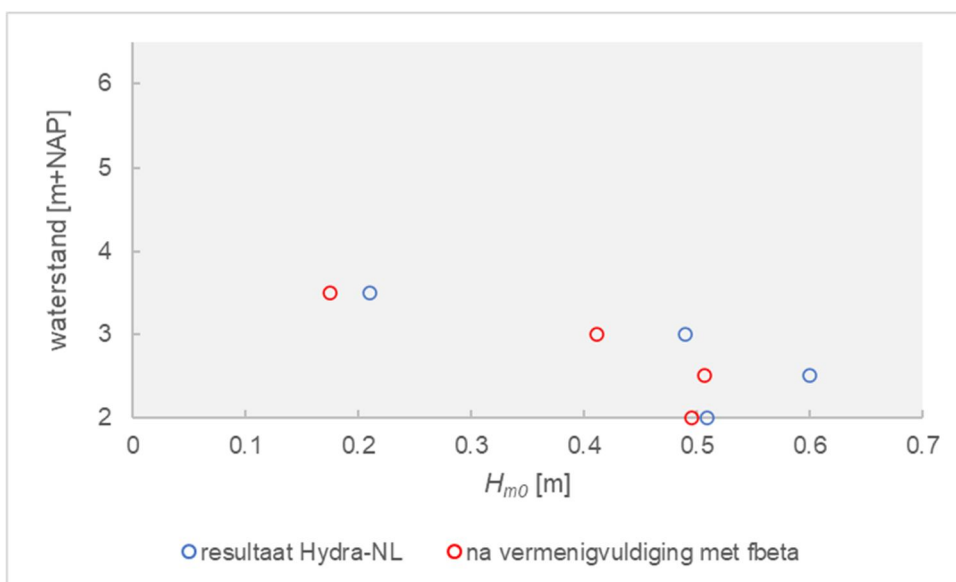
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00190 met profiel 198.prf



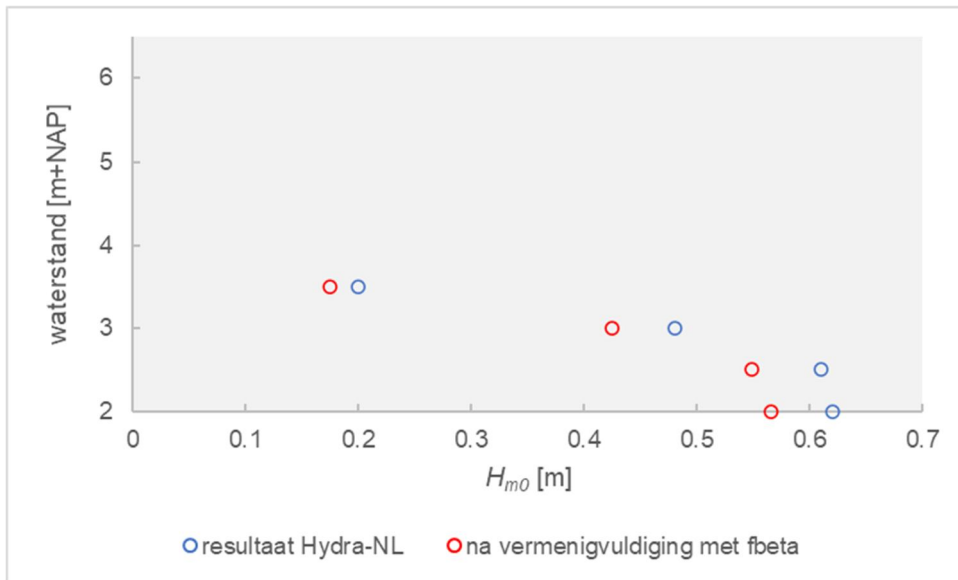
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00195 met profiel 2058.prf



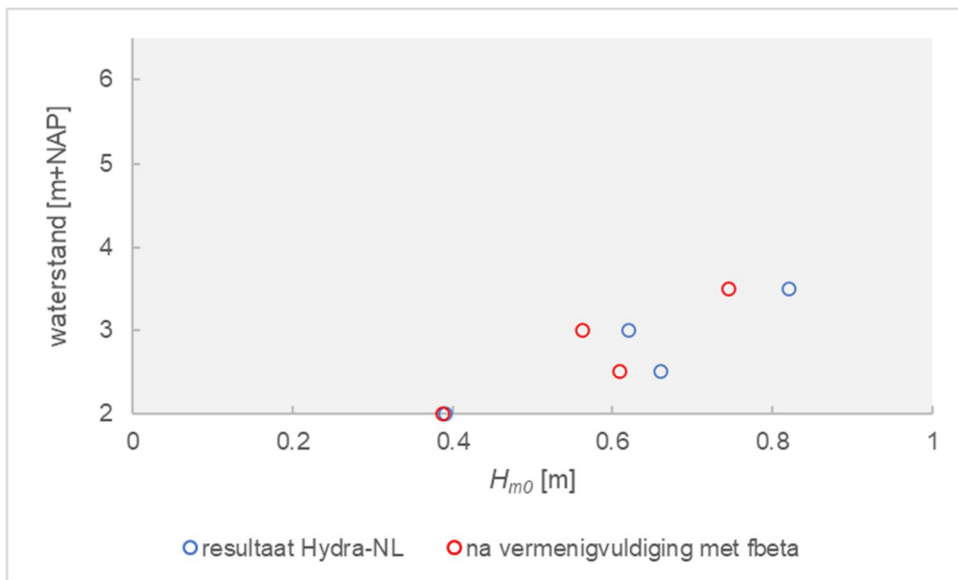
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00196 met profiel 204.prf



H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00204 met profiel 212.prf



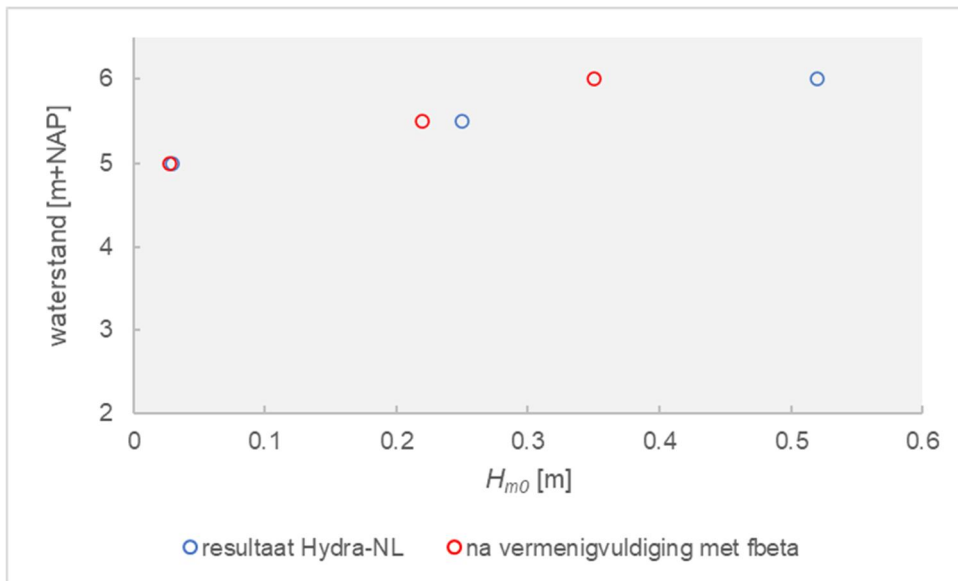
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00205 met profiel 2154.prf



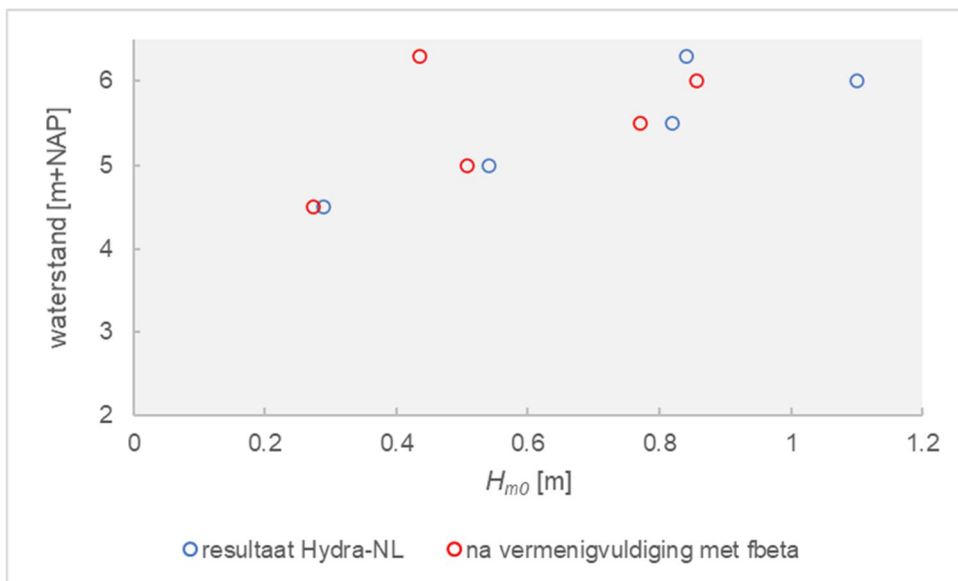
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_9-1_dk_00209 met profiel 2184.prf

A.10 Golfcondities golfklapzone 53-3

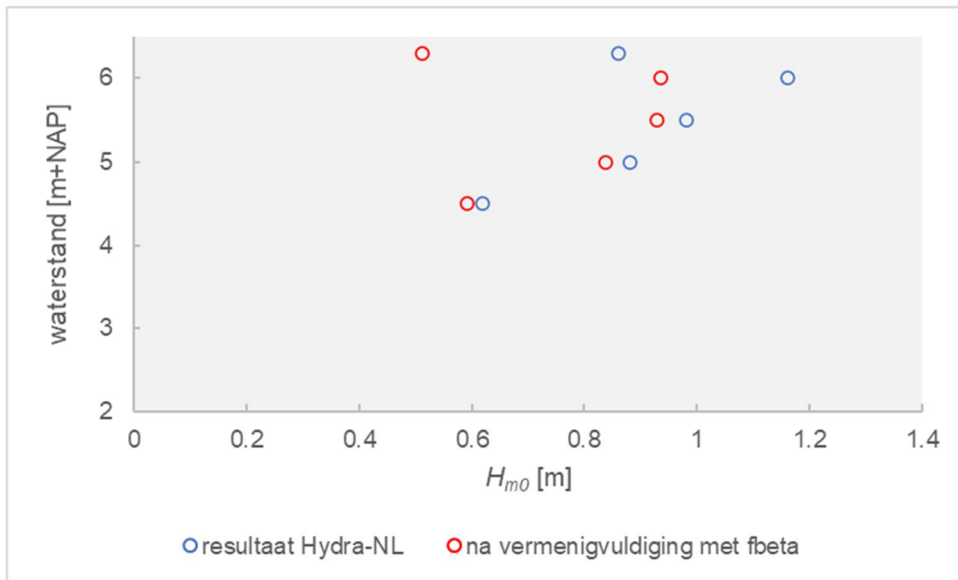
Alle in deze bijlage weergegeven figuren zijn gebaseerd op de met Hydra-NL berekende golfcondities voor het bekledingstype 'Grasmat golfklapzone (invloed golfinvalshoek, voor ToM)' en een terugkeertijd van 200.000 jaar.



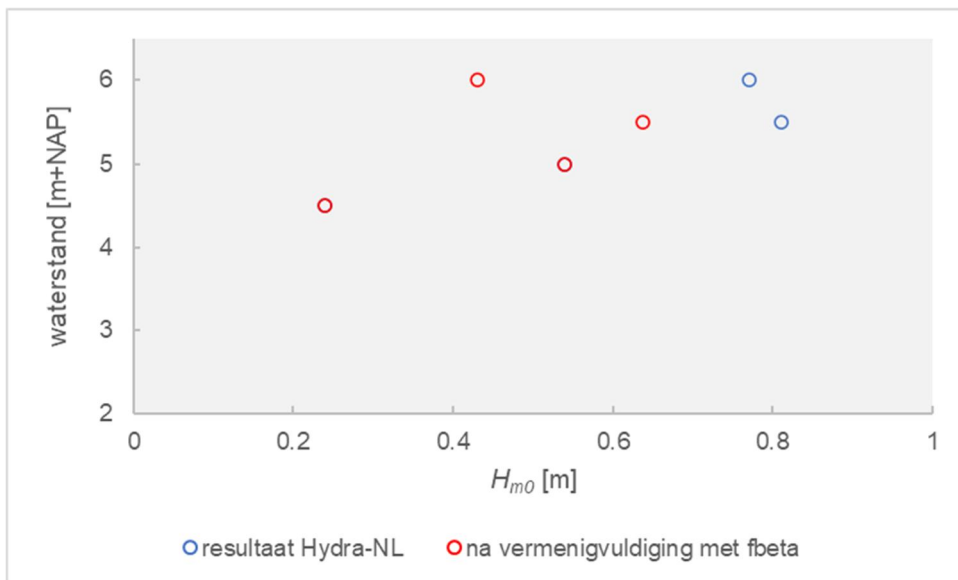
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00003 met profiel 1225.prf



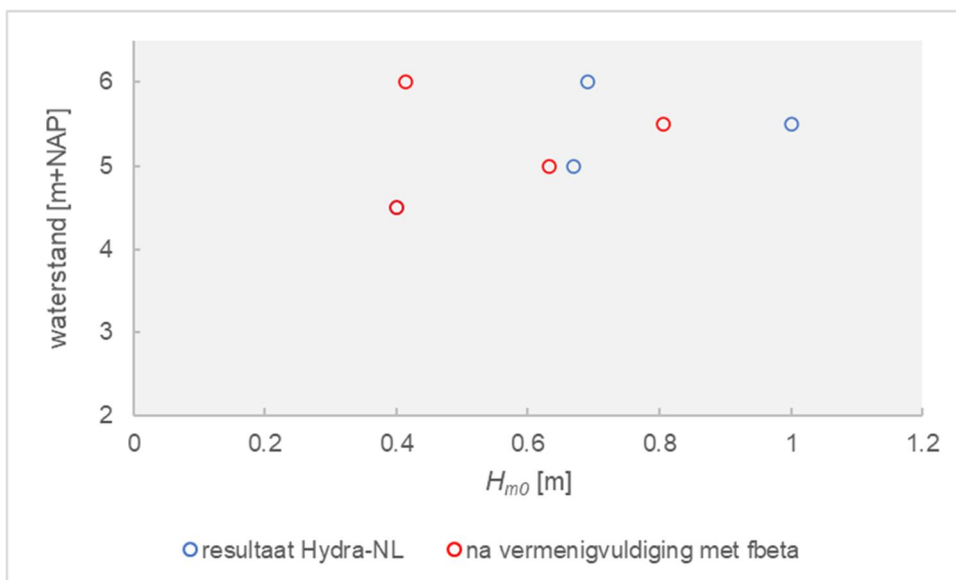
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00006 met profiel 1222.prf



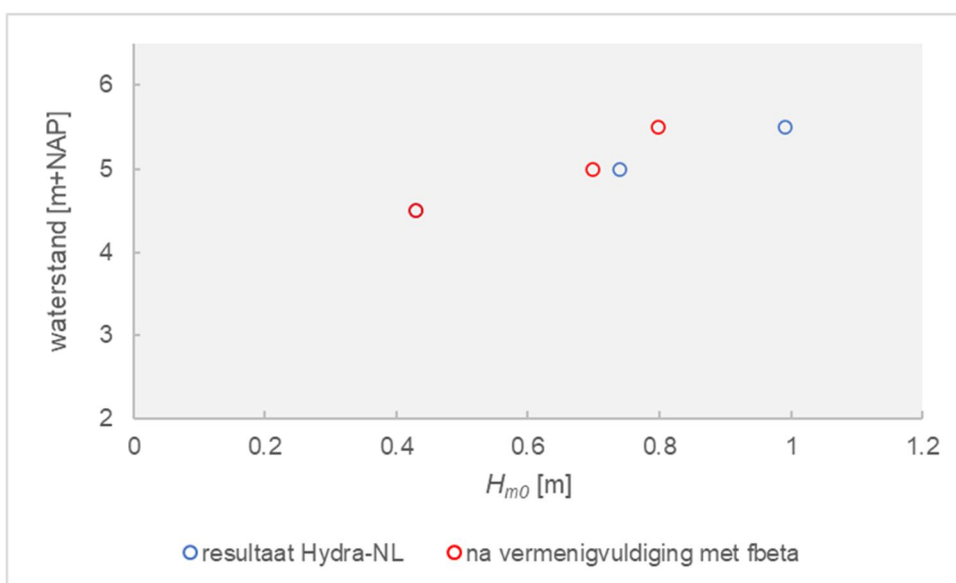
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00006 met profiel 1229.prf



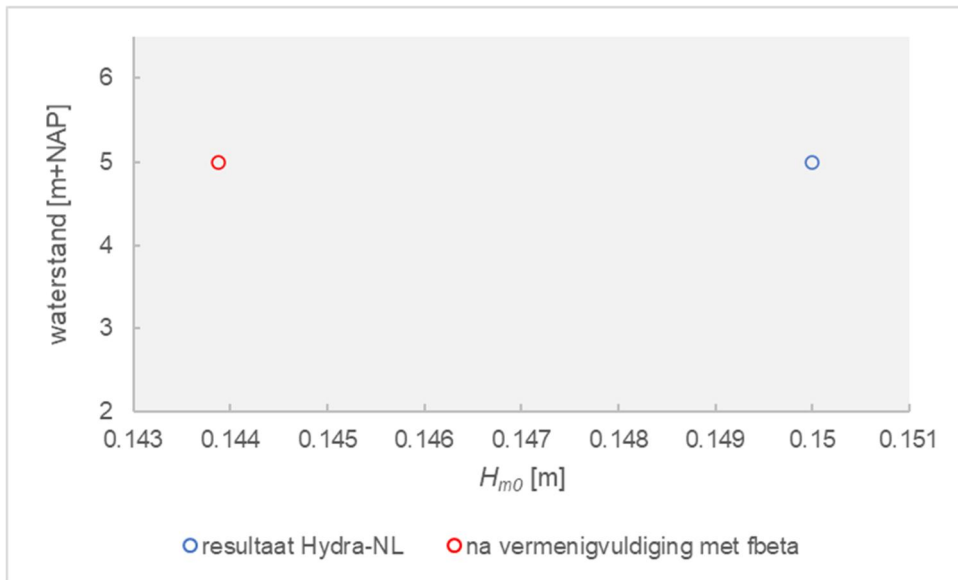
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00012 met profiel 1216.prf



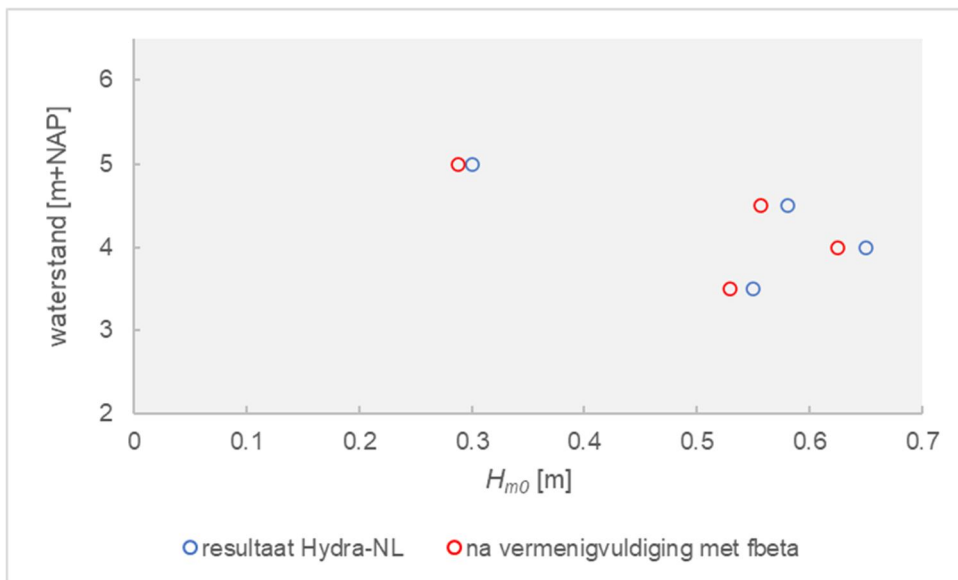
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00013 met profiel 1161.prf



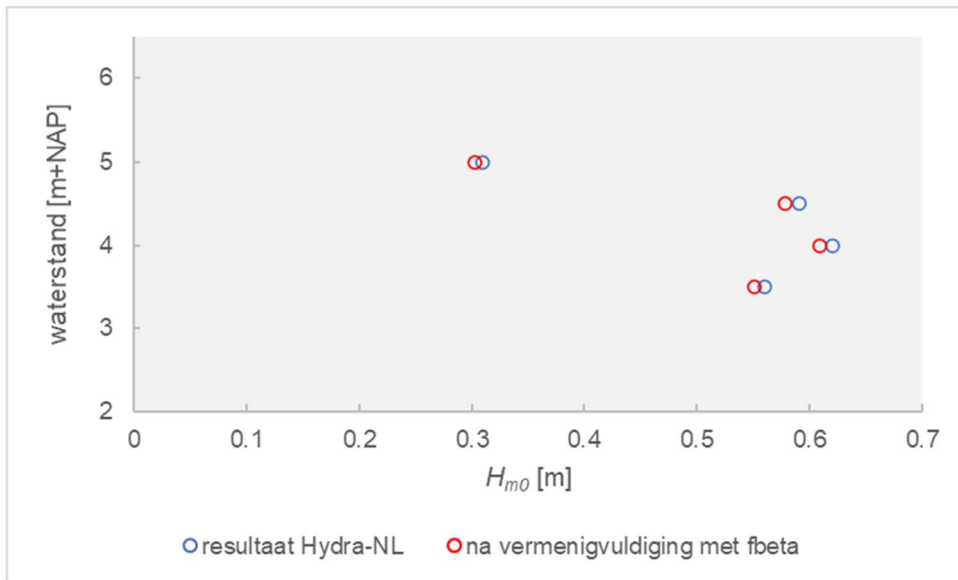
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00014 met profiel 1161.prf



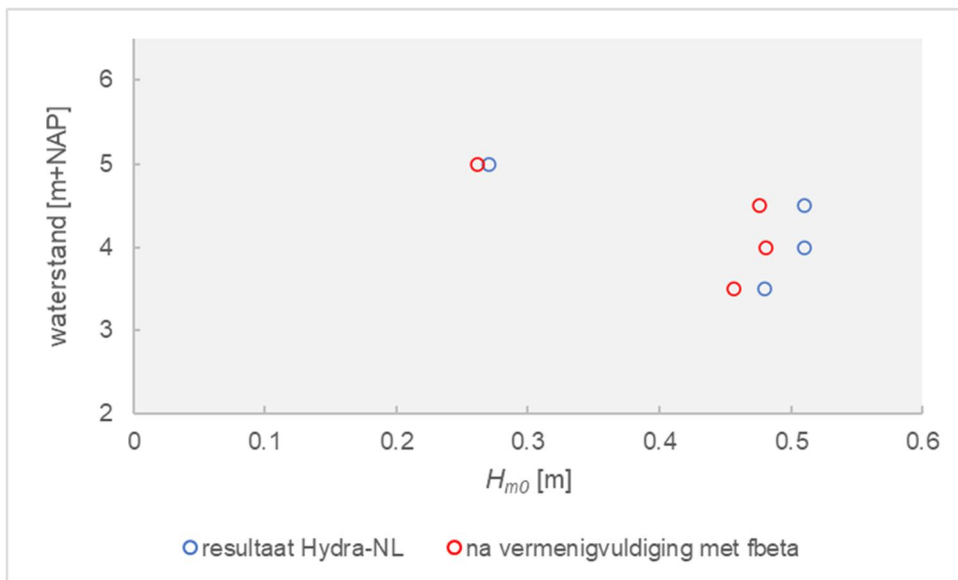
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00052 met profiel 1171.prf



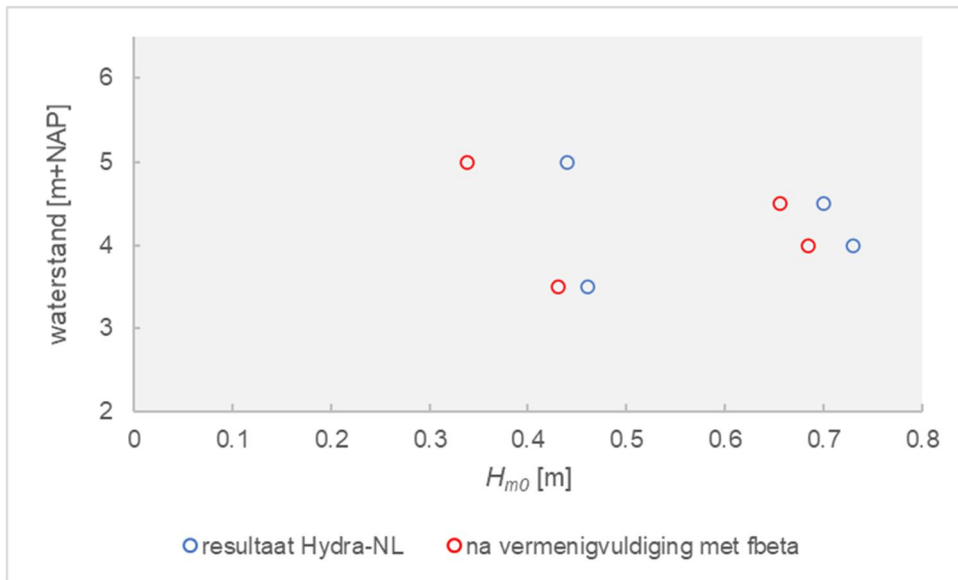
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00081 met profiel 1135prf



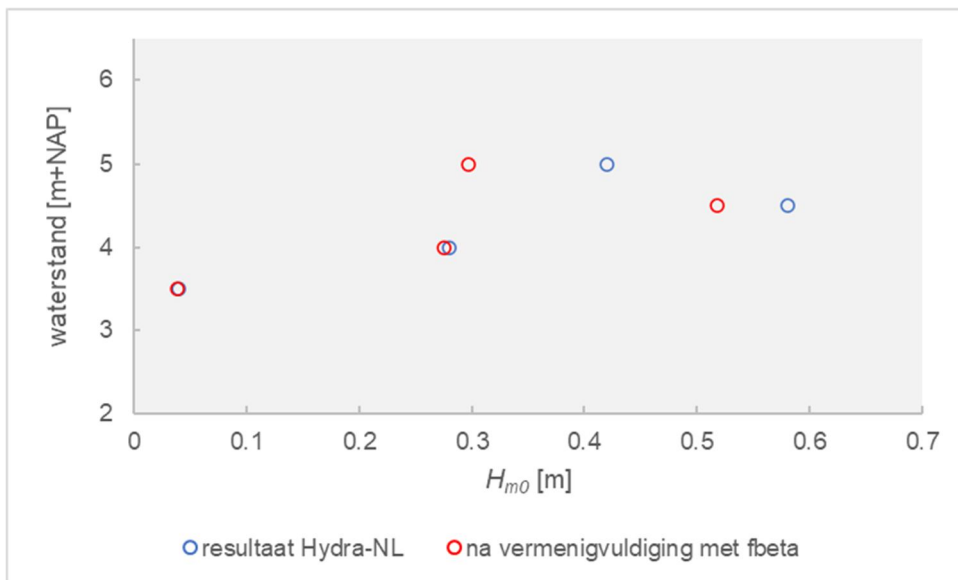
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00081 met profiel 390.prfl



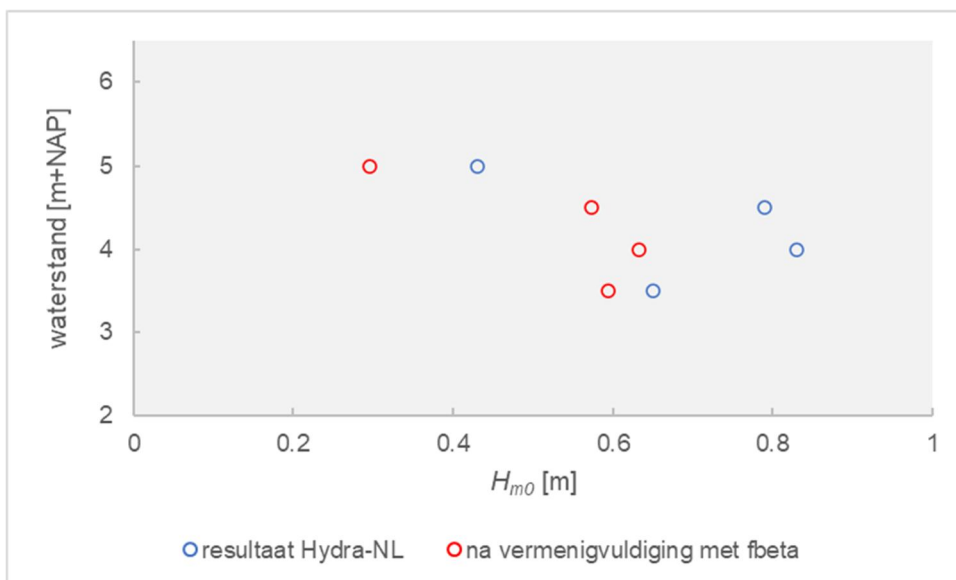
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00083 met profiel 360.prfl



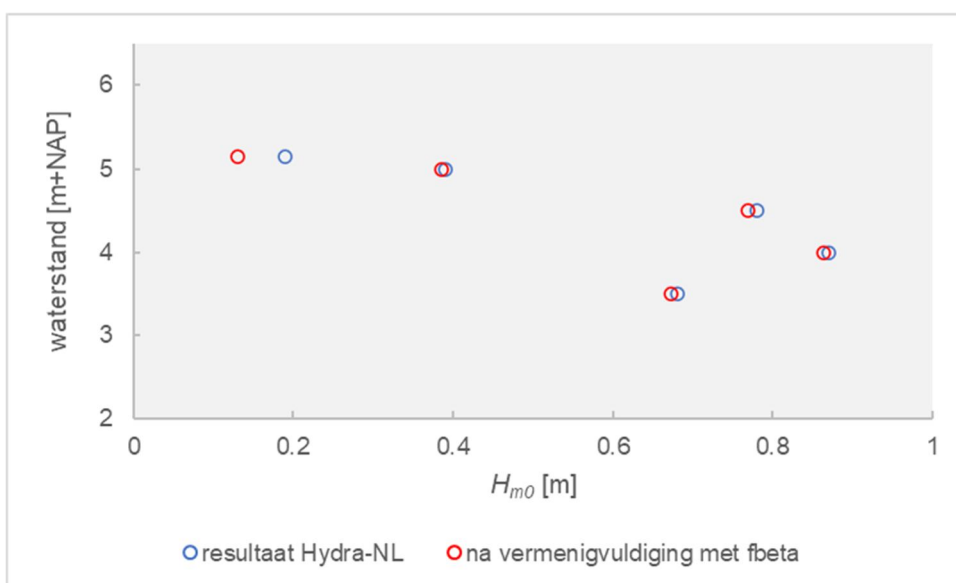
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00084 met profiel 1131.prf



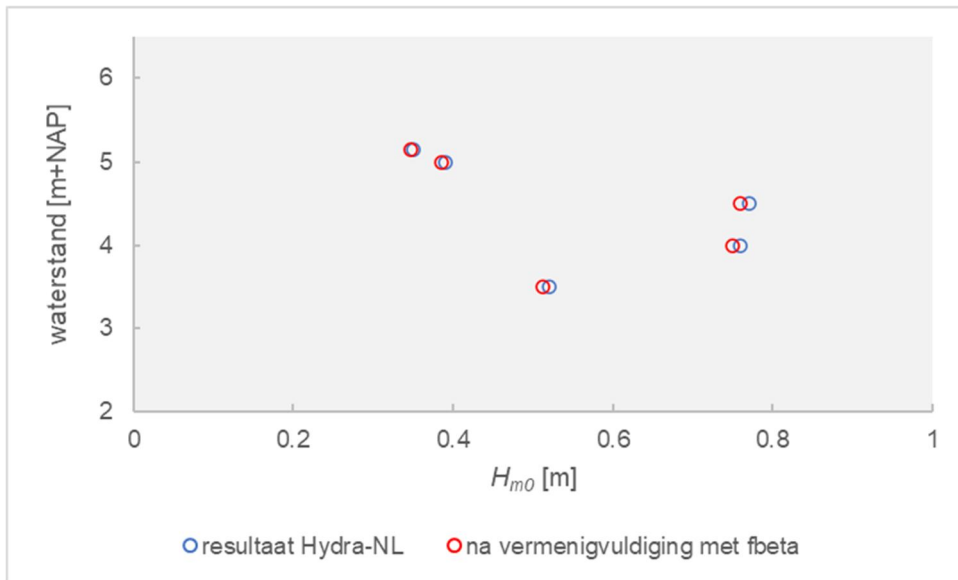
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00086 met profiel 334.prf



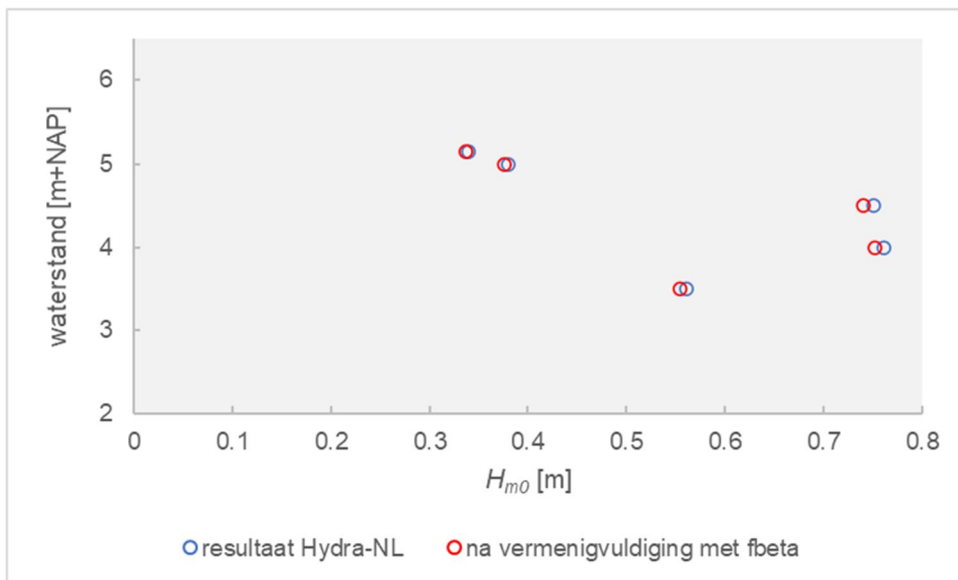
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00090 met profiel 299.prf1



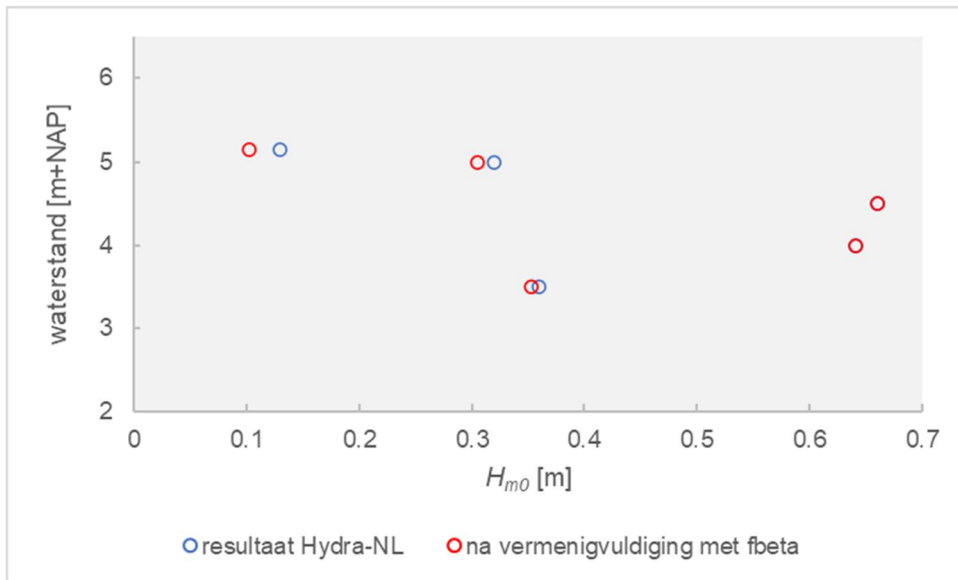
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00091 met profiel 293.prf1



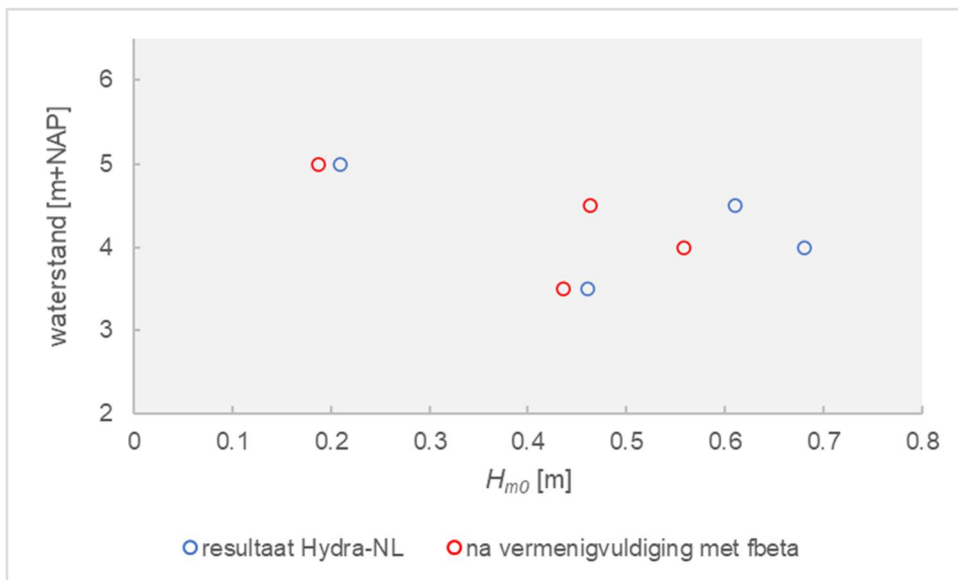
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00092 met profiel 1124.prf



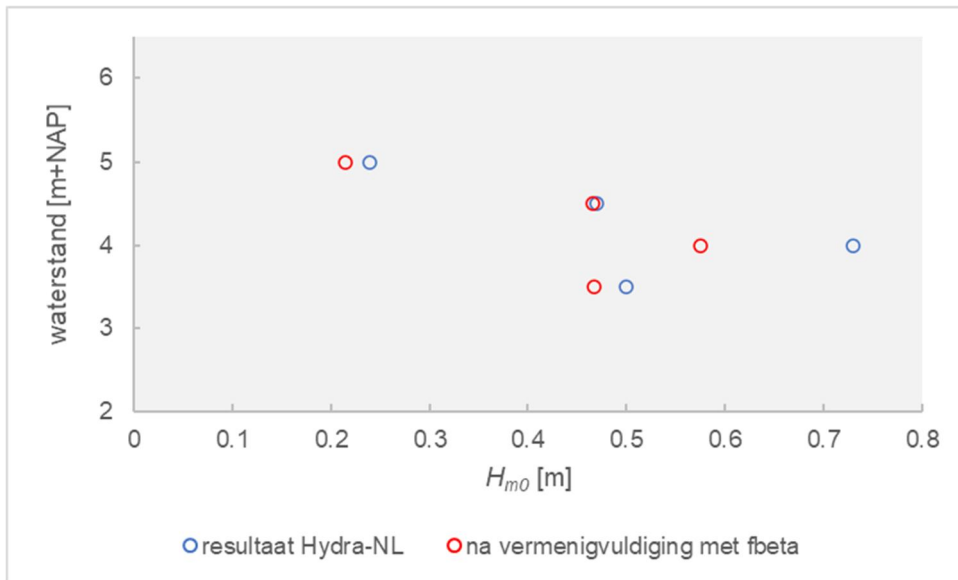
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00093 met profiel 268.prf



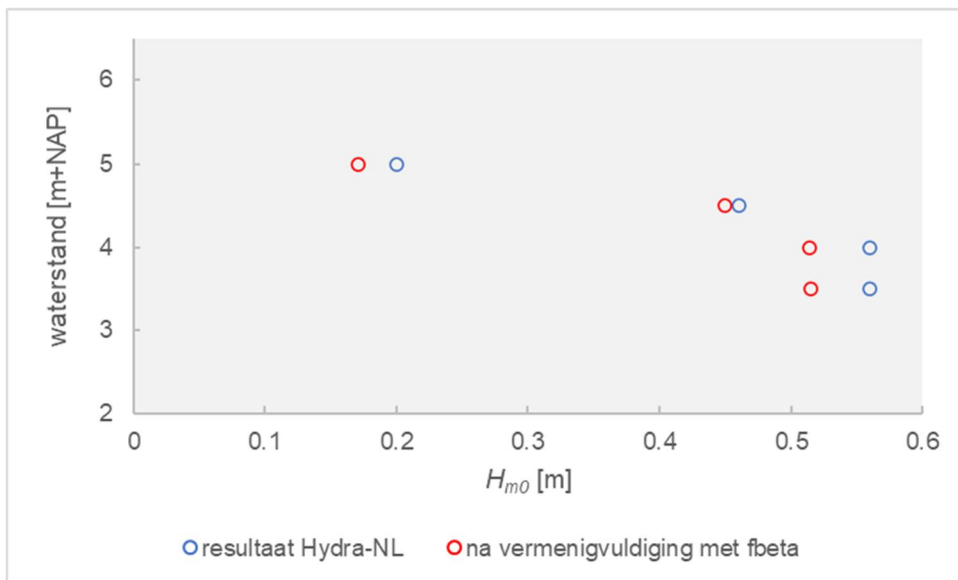
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00097 met profiel 234.prf



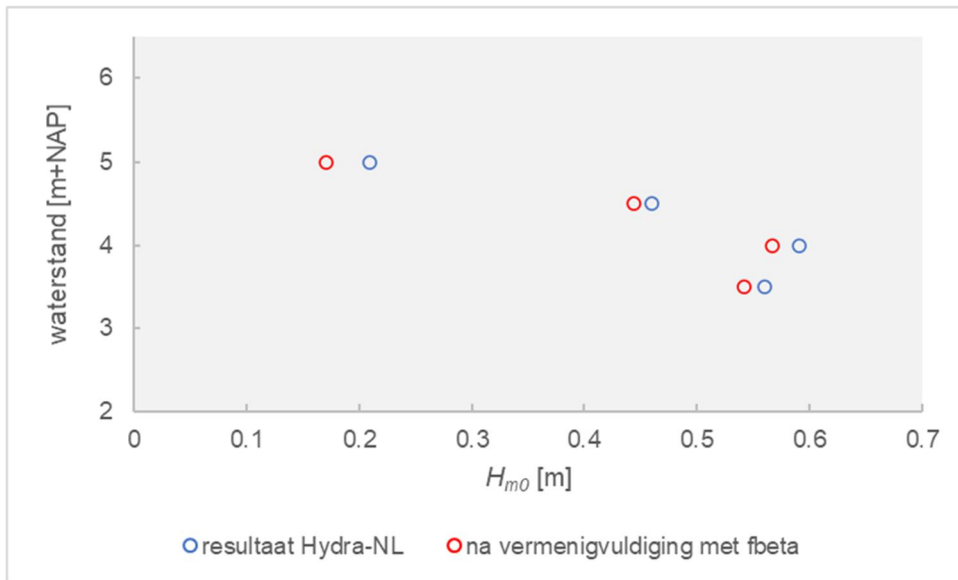
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00099 met profiel 201.prf



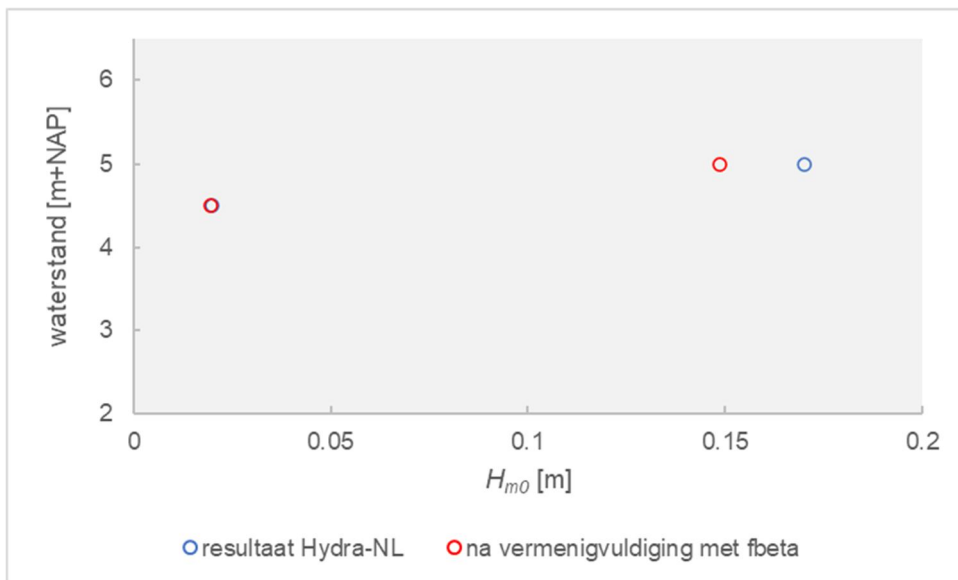
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00101 met profiel 188.prf



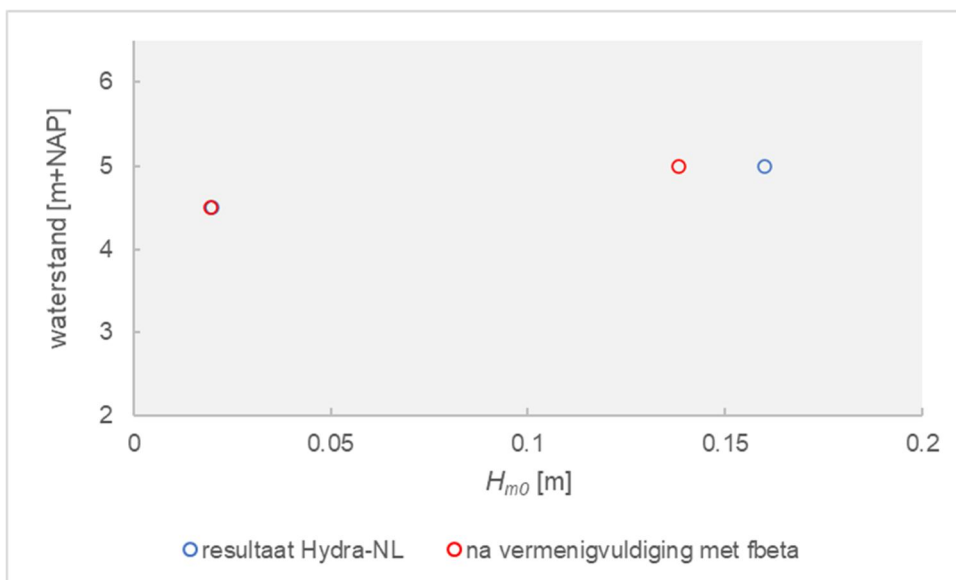
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00106 met profiel 1110.prf



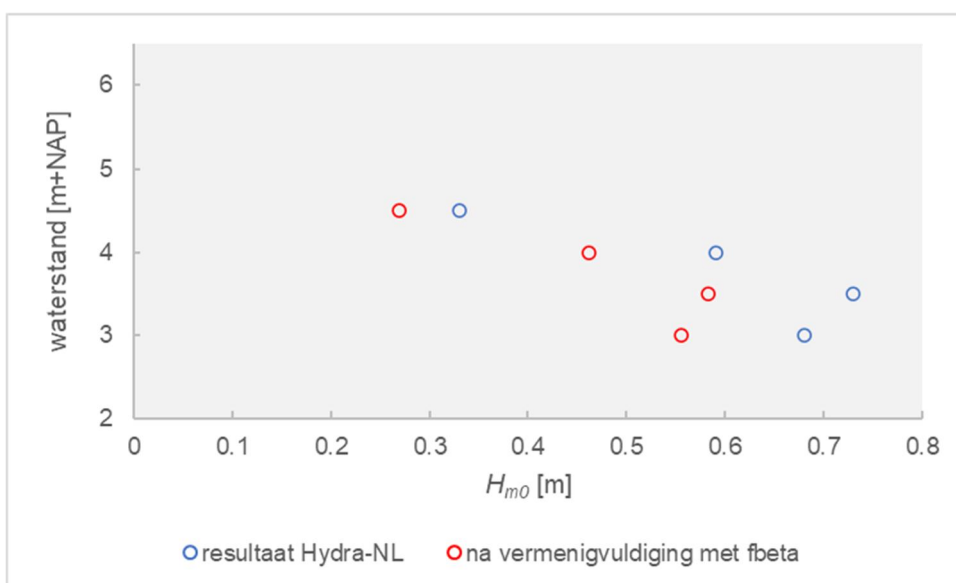
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00108 met profiel 136.prf1



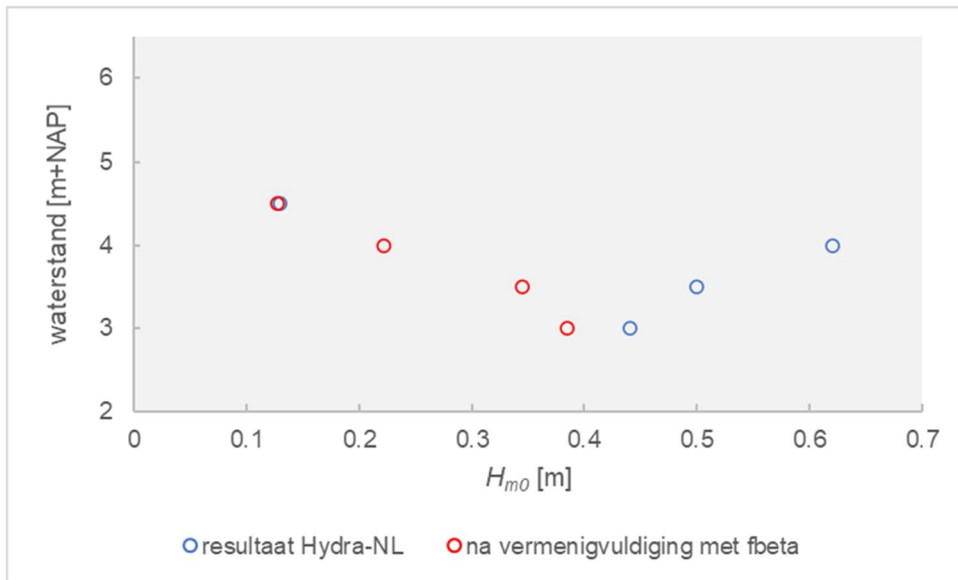
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00108 met profiel 101.prf1



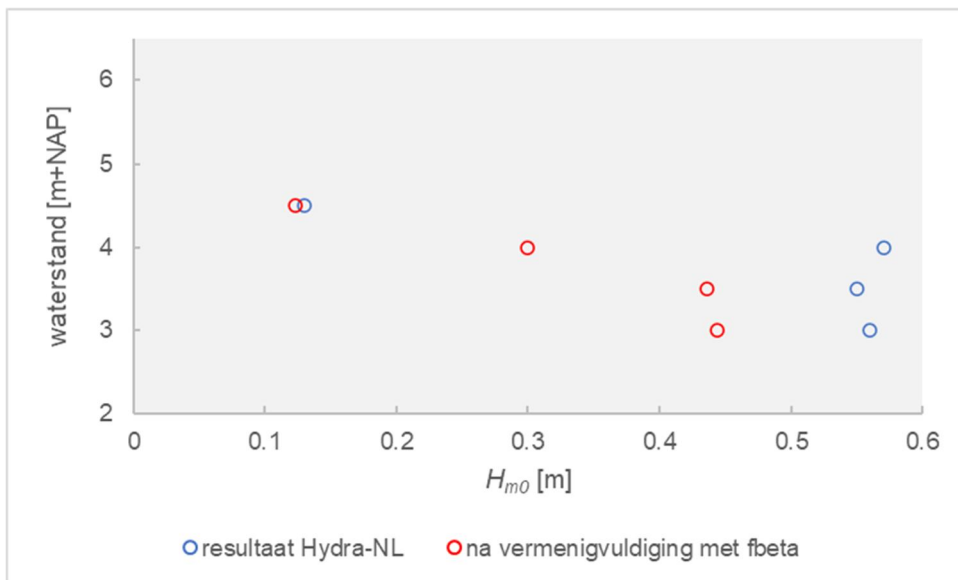
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00109 met profiel 101.prf



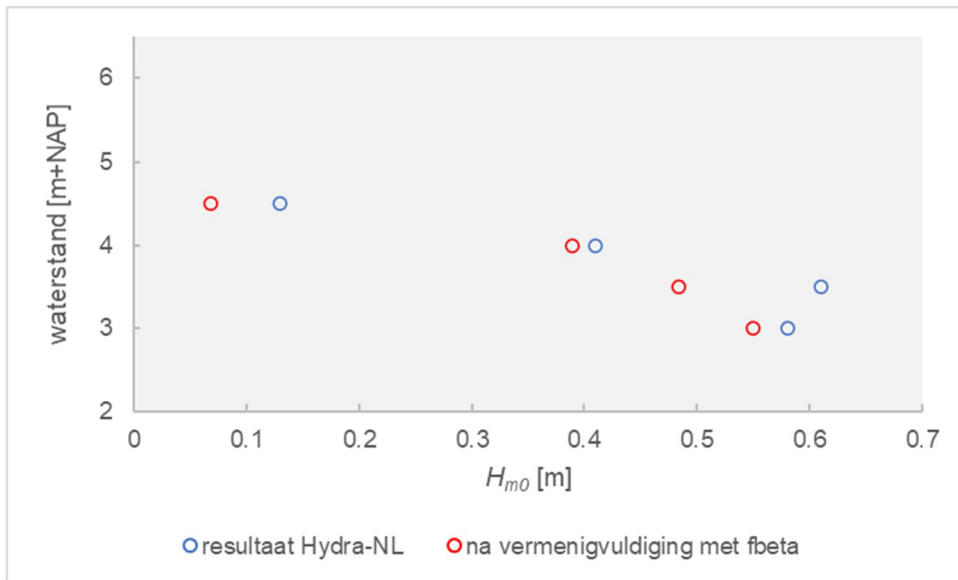
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00115 met profiel 1101.prf



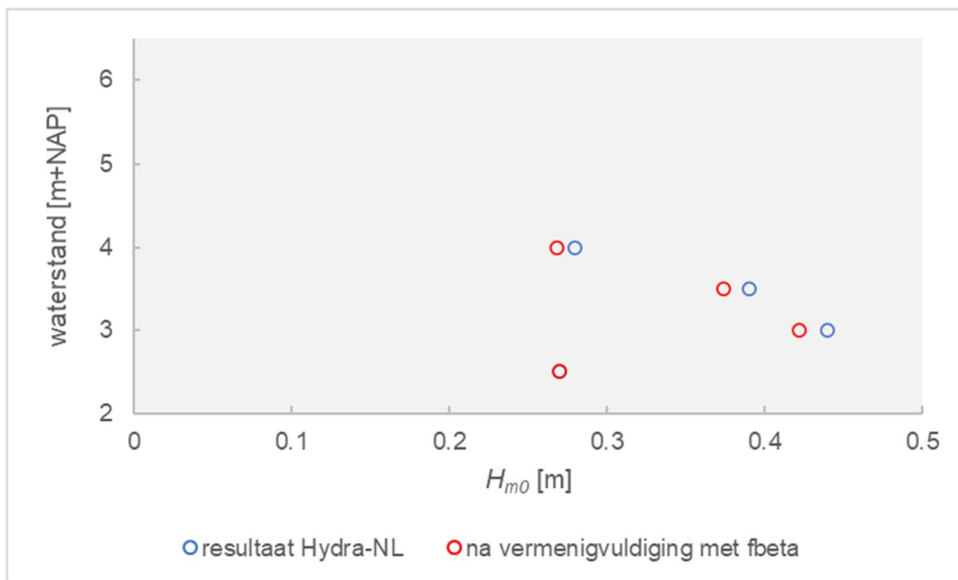
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00121 met profiel 1094.prf



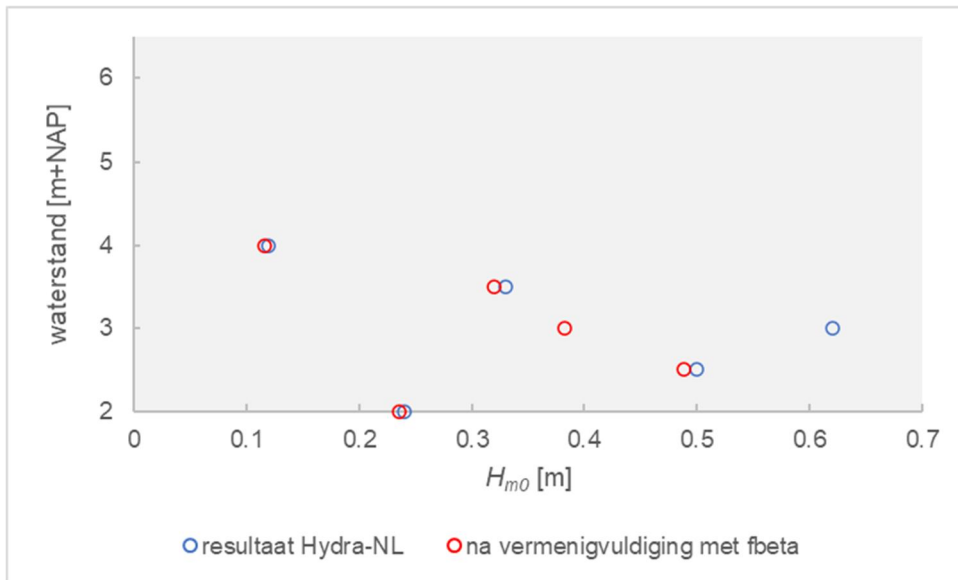
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00129 met profiel 1086.prf



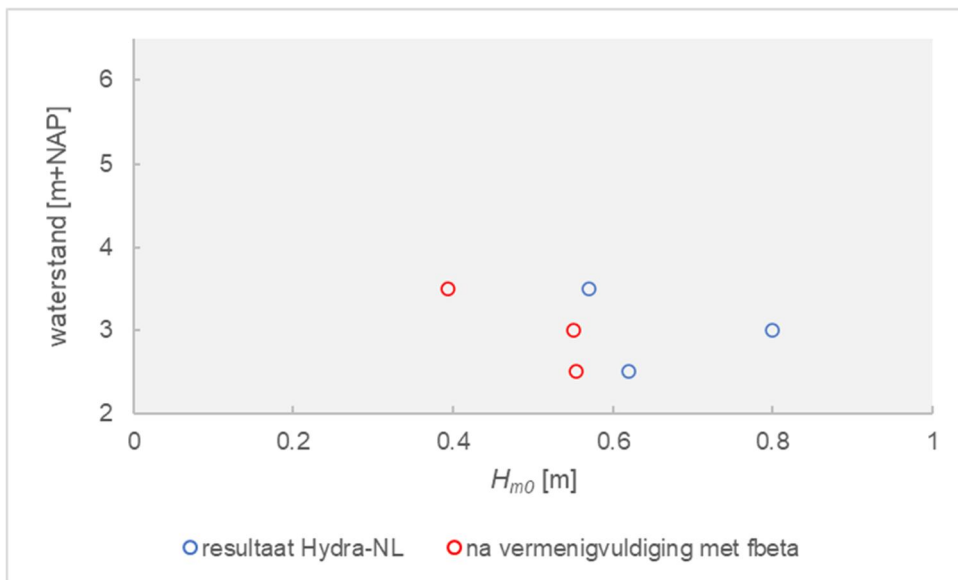
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00141 met profiel 1074.prf



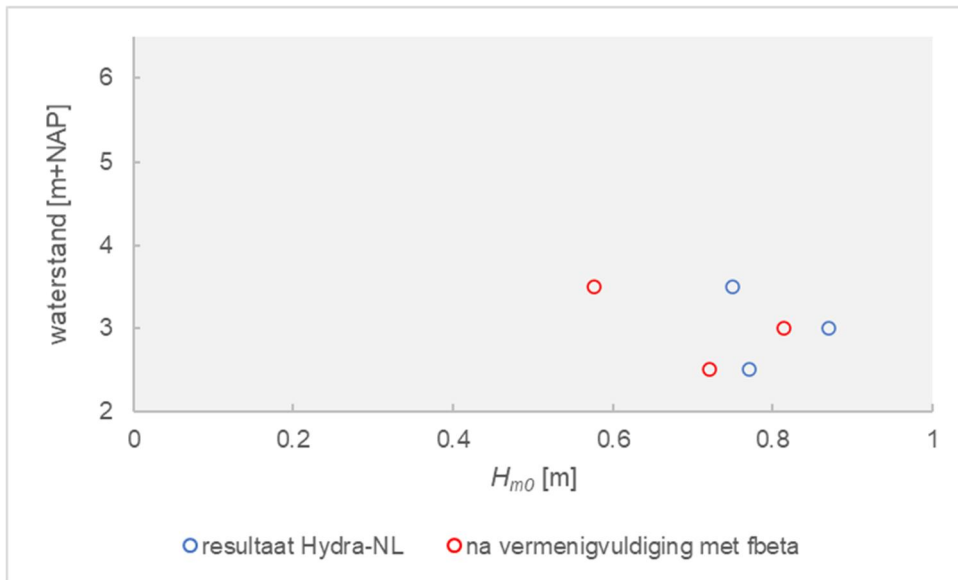
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00147 met profiel 1069.prf



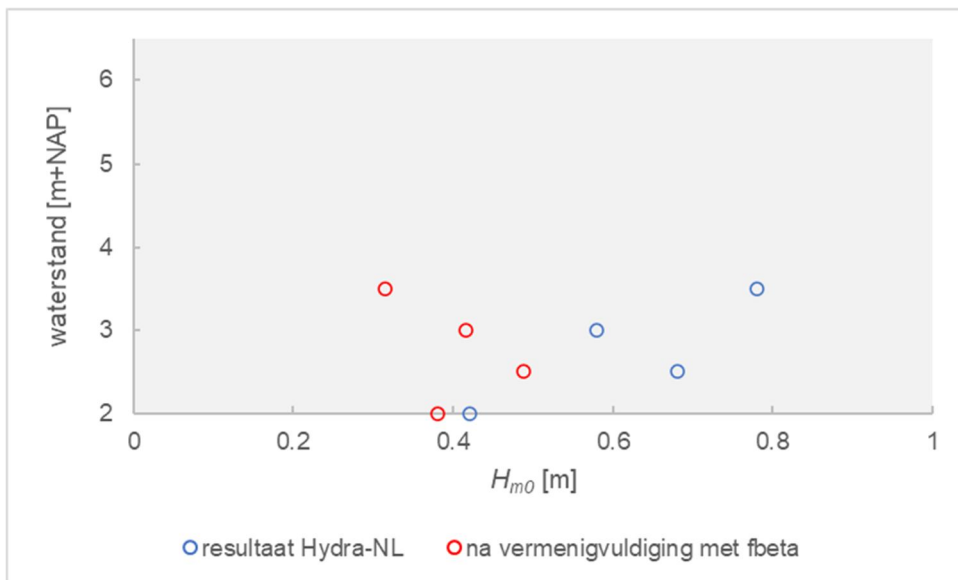
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00168 met profiel 1047.prf



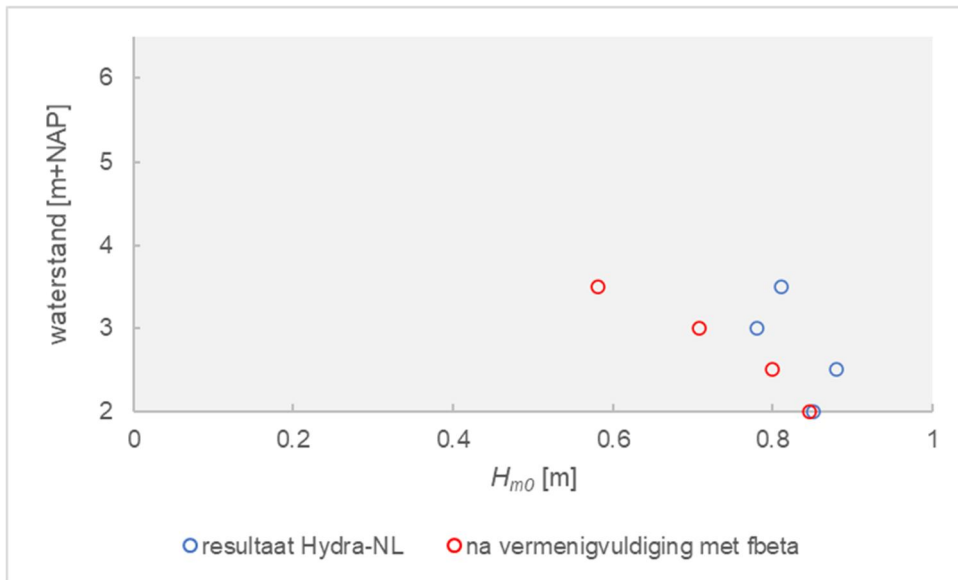
Hm0 vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00171 met profiel 1044.prf



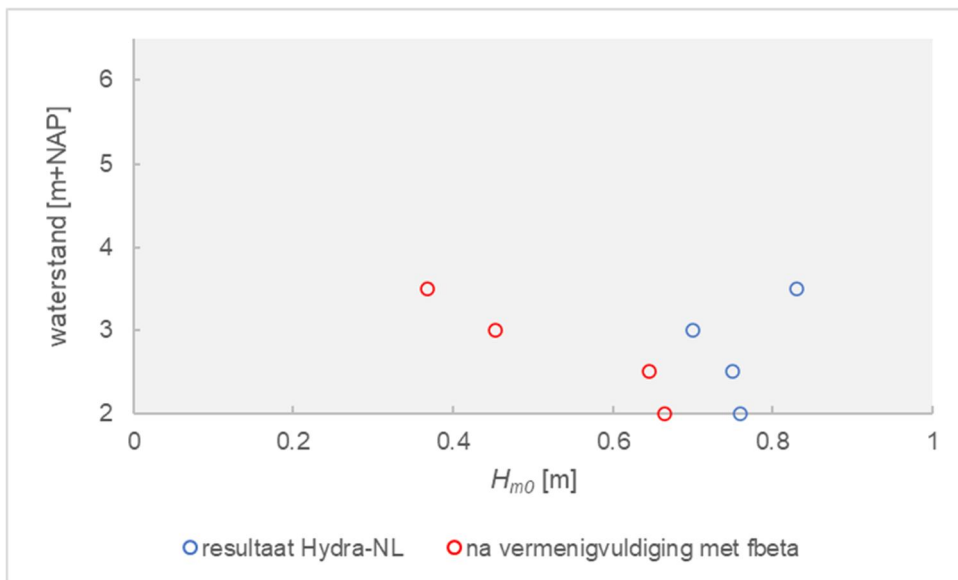
H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00176 met profiel 1040.prf



H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00188 met profiel 1027.prf



H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00197 met profiel 1019.prf



H_{m0} vs. waterstand voor uitvoerpunt OV_1_53-3_dk_00201 met profiel 1014.prf

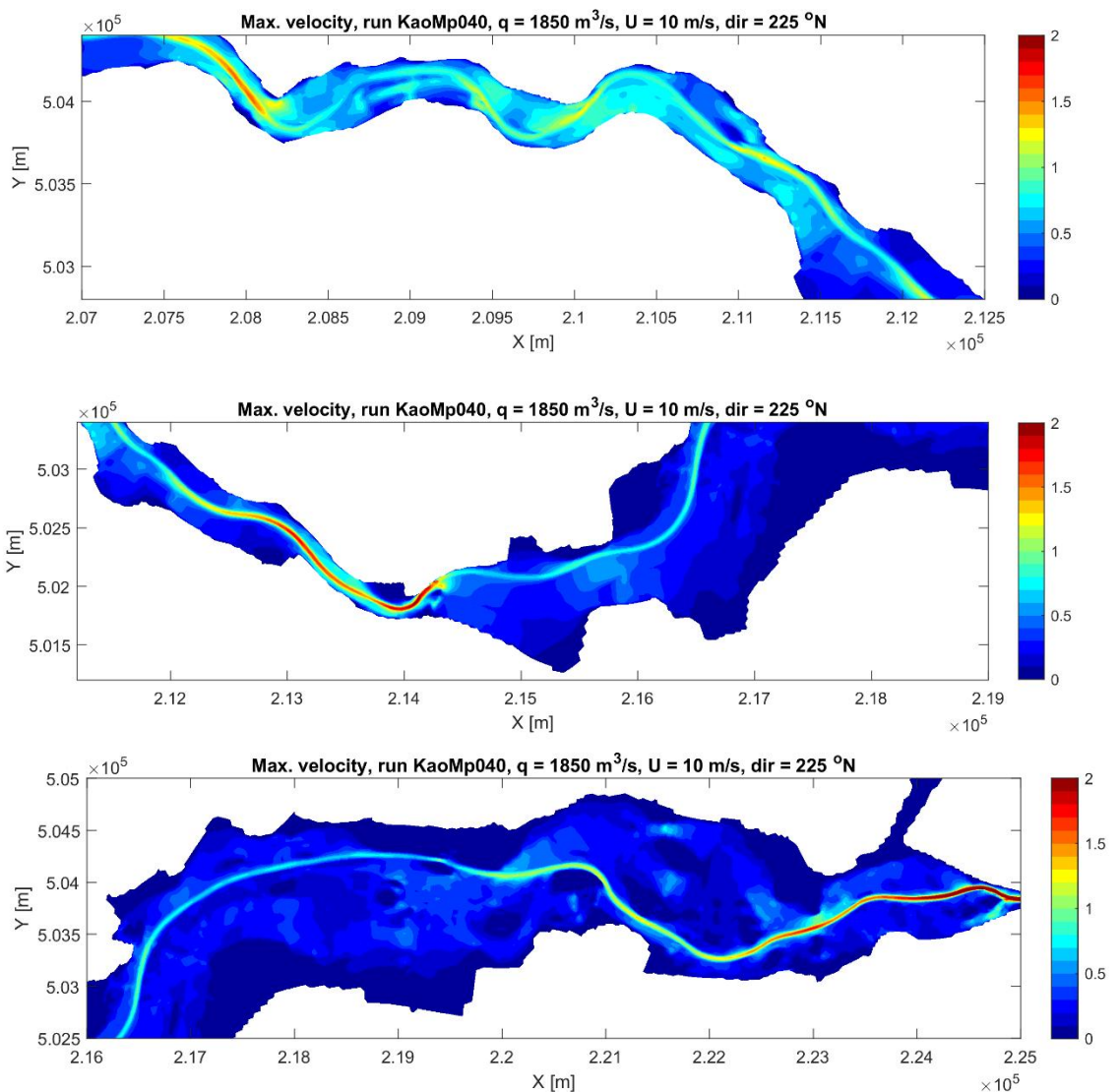
B Stroomsnelheden Vecht hoogwater

Voor de terugkeertijden van 1/1000 en 1/10000 zijn de maatgevende waterstanden bepaald op een aantal locaties langs de Vecht (noord- en zuidoever) en is gekeken wat de waarden voor basisstochasten wind, waterstand en meerpeil waren die tot die waterstanden hebben geleid. In het interessegebied is de Vechtafvoer en vanwege de correlatie het meerpeil, bepalend. Wind speelt nauwelijks een rol.

B.1 1/1.000

Rivierafvoer bij Dalfsen 550 m³/s (IJssel: 1850 m³/s) en meerpeil 0.4m +NAP. Windsnelheid 10 m/s, windrichting 225grN en Ramspolkering open.

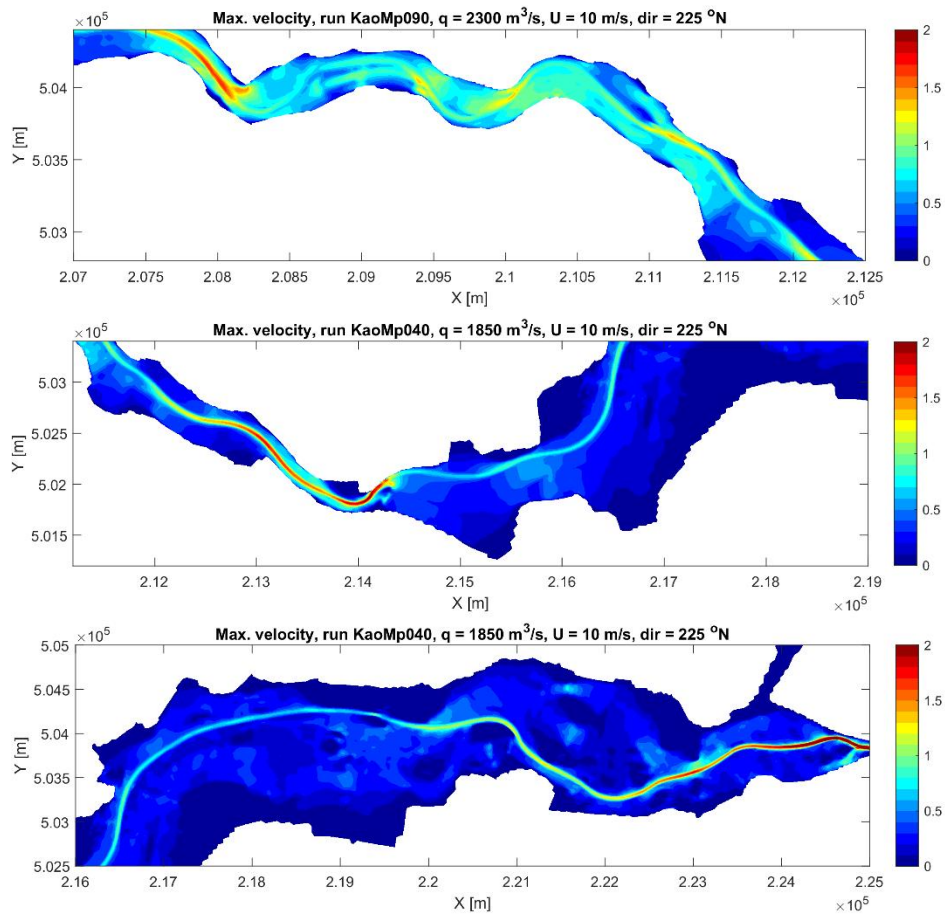
Figuren van west naar oost, van de A28 naar Ommen.



B.2 1/10.000

Rivierafvoer bij Dalfsen 700 m³/s (IJssel: 2300 m³/s) en meerpeil 0.9m +NAP. Windsnelheid 10 m/s, windrichting 225grN en Ramspolkering open.

Figuren van west naar oost, van de A28 naar Ommen.



C Schades aan grasbekleding in kader van risico gestuurd beheer en onderhoud

Memo

Datum

22 mei 2020

Contactpersoon

Wouter Jan Klerk

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 8390

E-mail

WouterJan.Klerk@deltares.nl

Aantal pagina's

1 van 19

Onderwerp

Relevantiestudie risicogestuurd B&O Vechtdijken

(Versie 12-8-2020 commentaar WDOD verwerkt)

1 Inleiding

Een groot deel van de dijken langs de Overijsselse Vecht is als onvoldoende beoordeeld en moet daarom versterkt worden. Omdat er weinig kennis is over dijken die vrijwel volledig uit zand bestaan, voert Waterschap Drents Overijsselse Delta onderzoek uit naar de sterkte van grasbekledingen op zanddijken.

Belangrijk aandachtspunt is dat de functie van de grasbekleding als bescherming tegen erosie groter is dan bij dijken waar zich onder het gras een erosiebestendige kleilaag bevindt: er is immers maar 1 verdedigingslinie voordat de zandkern begint te eroderen. Dit betekent ook dat het beheer en onderhoud van deze grasbekleding extra aandacht vereist vanuit het oogpunt van het overstromingsrisico. Aantasting van de grasbekleding leidt immers direct tot een potentieel significante veiligheidsafname en is daarom ook een belangrijk aandachtspunt binnen de zorgplicht.

In deze verkenning beschouwen we wat aandachtspunten en belangrijke onzekerheden zijn bij het risicogestuurd beheren van de grasbekleding op de dijken langs de Overijsselse Vecht. Het doel is om te bepalen van welke typen schades de sterktereductie het meest onzeker is en of en hoe dit kan worden verkleind met het slim kiezen van de locaties van erosieproeven.

Naderhand kan dit op basis van de resultaten van de erosieproeven gebruikt worden om nader te bepalen welke vormen van schade de grootste invloed hebben op het risicogestuurd inspecteren en beheren van de Vechtdijken, en hoe hiermee kan worden omgegaan binnen de context van risicogestuurd beheer & onderhoud.

2 Risicogestuurd beheer & onderhoud

2.1 Risicogestuurd beheer & onderhoud binnen de overstromingskansbenadering

In Nederland wordt periodiek beoordeeld of waterkeringen aan de in de wet gestelde eisen voldoen. Hiervoor wordt het WBI gebruikt, waarin voor verschillende faalmechanismen de veiligheid wordt berekend om zo te beschouwen of aan de overstromingskans wordt voldaan. Het is in de context van deze studie belangrijk om op te merken dat binnen het WBI weinig of geen mogelijkheden zijn voor het bepalen van de sterkte van waterkeringen wanneer afwijkingen optreden (denk aan schade door graverij, kale plekken of bijvoorbeeld slechte inwassing van een steenbekleding). Doorgaans wordt dit afgevangen door strikte toepassingsvoorwaarden te stellen aan de toepassing van het beoordelingsinstrumentarium. De vraag is of dit daadwerkelijk reëel is, aangezien bijvoorbeeld enkel voor de Vechtdijken in de afgelopen jaren in het voorjaar al ieder jaar pakweg 100 afwijkingen zijn gemeld bij de voorjaarsinspectie. Het strekt dus tot aanbeveling, zeker in dit specifieke geval van

grasbekledingen op zanddijken, om ook op basis van een risico-afweging te kijken naar beheer en onderhoud. Dit past ook binnen de geest van de zorgplicht, die van waterkeringbeheerders vereist dat zo continu in control zijn van de veiligheid van hun waterkeringen.

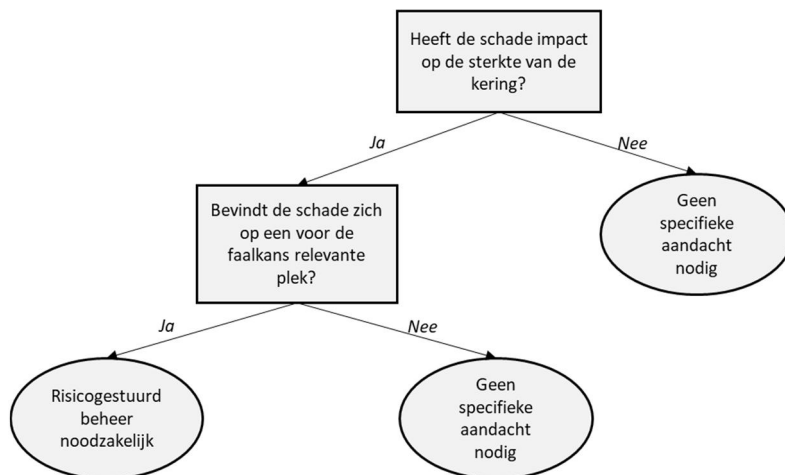
In Haak & Schoonderwaldt (2018) is een handreiking gedaan om te komen tot risicogestuurd beheer en onderhoud van waterkeringen. Hierbij is geen expliciete aandacht gegeven aan de verbinding met de overstromingskansen. In Klerk (2019) is op basis van deze aanpak, en de Risk Based Inspection aanpak zoals gehanteerd in de procesindustrie (NEN, 2018) een aanzet gegeven voor het bepalen van een risicogestuurd beheer en onderhoudsconcept binnen de context van de overstromingskansbenadering. Het karakter van deze aanpak is om van grof naar fijn te beschouwen welke onderdelen/schades vanuit risicoperspectief (extra) aandacht verdienen. Opgemerkt moet worden dat niet alle punten die gemeld worden als 'schade' ook daadwerkelijk een effect hoeven te hebben op de overstromingsveiligheid. We kunnen globaal onderscheid maken tussen 3 typen schades:

- Type 1: Schades die een directe invloed hebben op de faalkans van de kering. Bijvoorbeeld dierlijke graverij,
- Type 2: Schades die op termijn effect kunnen krijgen op de faalkans van de kering. Dit kan bijvoorbeeld door degradatie van de kwaliteit van de graszode als gevolg van afdekking, of door verminderende inspecteerbaarheid waardoor andere schades steeds moeilijker te detecteren worden, bijvoorbeeld als gevolg van ruigte.
- Type 3: Schades die niet of nauwelijks invloed hebben op de faalkans van de kering, maar om andere redenen onwenselijk zijn. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen de schade zelf die geen directe invloed heeft, bijvoorbeeld het ontbreken van dijkpalen, of schades die zich op een plek bevinden die onbelangrijk is voor de faalkans. Denk hierbij aan kale plekken op het binnentalud van een kering met overhoogte.

2.2 Samenhang tussen schades, kansen en maatregelen

Risicogestuurd beheer en onderhoud bestaat uit een zorgvuldige afweging tussen de soorten schades/afwijkingen die kunnen optreden, de kans/waarschijnlijkheid hiervan, het effect van schade op de faalkans, en welke maatregelen kunnen worden getroffen om de gevolgen te beperken.

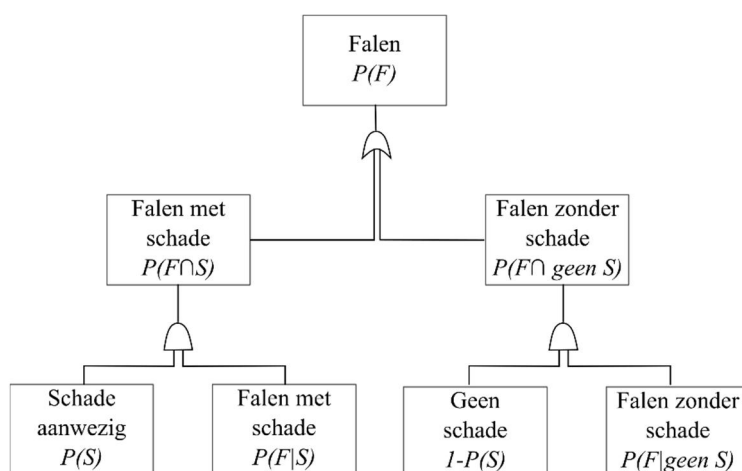
Het is belangrijk om deze context onderscheid te maken tussen incidentele schades (bijv. graverij) die van de ene op de andere dag kunnen optreden, en de lange termijn ontwikkeling van een kering. In de loop van jaren zal de graskwaliteit altijd enigszins variëren, afhankelijk van het gevoerde beheer. Uitgangspunt zou moeten zijn dat beheer dusdanig wordt gevoerd dat er in principe geen structurele achteruitgang van de grasmat is: het beheer zorgt ervoor dat, incidentele schades en gebeurtenissen buiten beschouwing gelaten, de grasmat voldoende sterk is om aan de veiligheidsbeoordeling te voldoen. Uitgaande van deze basisvorm van beheer, kan voor de incidentele schades en afwijkingen gebruik worden gemaakt van de beslisboom uit Figuur 1. Hiermee kan op eenvoudige wijze onderscheid gemaakt worden tussen de 3 typen schaden die in de vorige paragraaf zijn geïntroduceerd. Als eerste wordt de vraag gesteld of de schade impact heeft op de sterkte van de kering. Wanneer deze vraag met 'nee' wordt beantwoord betreft het een schade type 3 uit vorige paragraaf: de schade heeft geen directe of indirecte invloed op de faalkans en vereist daarom ook geen risicogestuurd beheer en onderhoud. Wanneer een schade wel invloed heeft kan dit zowel op korte (schade type 1) als op langere termijn zijn (schade type 2). De tweede vraag is echter of de schade zich op een relevante plaats bevindt: wanneer dit niet het geval is valt de schade onder type 3, en is geen risicogestuurd beheer en onderhoud nodig.



Figuur 1 Beslisboom voor bepalen noodzaak risicogestuurd beheer en onderhoud.

Binnen risicogestuurd beheer en onderhoud zijn dus enkel schades van belang die direct of indirect invloed hebben op de faalkans, en die zich op een relevante plaats bevinden. In het volgende hoofdstuk wordt dit concreet ingevuld voor de faalmechanismen GEBU en GEKB langs de Overijsselse Vecht.

Het is belangrijk om op te merken dat maatregelen binnen risicogestuurd beheer en onderhoud verder gaan dan vaker of op andere wijze inspecteren, en het repareren van schade. Ook binnen de procesindustrie is bijvoorbeeld herziening van het ontwerp, en inzet van crisisbeheersmaatregelen een belangrijke optie. In Figuur 2 is in een foutenboom weergegeven hoe de gebeurtenissen van falen met en zonder schade samen leiden tot de faalkans van een waterkering ($P(F)$). Falen wordt veroorzaakt door ofwel een faalgebeurtenis zonder dat schade is opgetreden (rechtertak van de foutenboom), ofwel met schade (linkertak). De rechtertak is grofweg de faalkans die binnen het WBI wordt uitgerekend.¹ De rechtertak geeft de kans op falen gegeven dat schade aanwezig is. Deze wordt bepaald door de vermenigvuldiging van de faalkans gegeven de schade ($P(F|S)$) en de kans dat een schade aanwezig is bij een hoogwater ($P(S)$). Merk op dat met name die laatste kans vaak lastig in te schatten is en dat dit dus sterk leunt op het oordeel en de inschatting van de beheerder. Onder schade verstaan we hier een schadeplek die voldoende impact heeft om de faalkans te beïnvloeden. Er is dus ook sprake van een bepaald niveau qua ernst/grootte wat moet worden overschreden (graverij van muizen is minder erg dan van bevers, maar heel erg veel muizen kunnen wel een probleem vormen).



Figuur 2 Foutenboom voor falen met en zonder schade aan de waterkering.

¹ Opgemerkt moet worden dat bij veel WBI faalmechanismen de status nog niet is dat daadwerkelijk alle stappen van het faalproces (reststerkte) worden meegenomen.

Alle maatregelen die invloed hebben op de kansen $P(S)$ of $P(F/S)$ zijn vanuit het oogpunt van risicogestuurd beheer en onderhoud relevant. Tabel 1 geeft ter illustratie een aantal voorbeelden van maatregelen die op een van beide kansen invloed hebben.

Tabel 1 Voorbeelden van maatregelen die als onderdeel van risicogestuurd beheer en onderhoud kunnen worden ingezet.

Maatregel	Effect	Toelichting
Frequenter inspecteren	$\downarrow P(S)$	Wanneer vaker wordt geïnspecteerd worden schades sneller opgemerkt en kunnen deze voor het eerstvolgende hoogwater worden gerepareerd.
Verbeteren nauwkeurigheid inspecties	$\downarrow P(S)$	Verbeteren van de inspectienauwkeurigheid voorkomt dat schades worden gemist
Aanbrengen erosiebestendige onderlaag	$\downarrow P(F/S)$	Door het aanbrengen van een erosiebestendige onderlaag (bijv. kleilaag of bentonietmat) wordt voor veel schadetypen de invloed van schade verminderd.
Vorbereiden bekrammingen t.b.v. noodsituaties	$\downarrow P(F/S)$	Met het voorbereiden van maatregelen bij calamiteiten kan de faalkans gegeven aanwezige schade worden verkleind. ²
Verlagen interventieniveau voor reparatie/onderhoud	$\downarrow P(S)$	Door bij beginnende schade sneller in te grijpen wordt de kans dat een schade zich ontwikkeld tot een veiligheidsprobleem verkleind.

Tot slot moet worden opgemerkt dat ook de keuze voor het 'basisbeheer' invloed heeft op de te treffen maatregelen. Wanneer bijvoorbeeld wordt ingezet op het ontwikkelen van een zeer droogtebestendige grasmat, wordt de kans op droogteschade kleiner. De kans op andere schades kan dan echter ook toenemen doordat andere factoren weer meer invloed krijgen.

3 Uitwerking risicogestuurd B&O voor de Vechtdijken

In dit hoofdstuk wordt voor de Vechtdijken nader uitgewerkt wat de benodigde inspanning is om voor zanddijken in control te zijn door middel van risicogestuurd beheer en onderhoud. Hiervoor wordt globaal het stappenplan vanuit het Risk Based Inspection Framework gehanteerd (NEN, 2018), toegespitst op de vraag welke typen schade relevant zijn om te beschouwen in de keuze van de erosieproeven.

3.1 Scope, criteria en doelstelling

Voor deze analyse beschouwen we in totaal 3 dijkvakken op de trajecten 9-1 (noordoever Vecht, $P_{eis}=1/300$, ondergrens) en 53-3 (o.a. zuidoever Vecht, $P_{eis}=1/3000$, ondergrens). We richten ons primair op het gedeelte tussen Dalfsen en de A28, aangezien bovenstrooms weinig problemen verwacht worden (i.v.m. beperkte belasting en hoog achterland). We kijken hoofdzakelijk naar de mechanismen Graserosie Buitentalud (GEBU - golfklap) en Graserosie Kruin en Binnentalud (GEKB). Overige mechanismen nemen we niet expliciet mee.

De doelstelling is om te bepalen in welke gevallen schade mogelijk leidt tot een toename van de faalkans. Omdat er veel onzeker is over het gedrag van gras op zand richten we ons primair op het bepalen van de voornaamste onzekerheden in de foutenboom in Figuur 2. Concreet: welke typen

² Merk op dat ook beschouwd moet worden hoe waarschijnlijk het is dat op alle relevante plekken tijdig bekrammingen geplaatst kunnen worden, en met welke betrouwbaarheid alle relevante plekken ook daadwerkelijk in beeld zijn. Zie ook het werk van bijv. Lendering et al. (2016).

schade/falen hebben mogelijk veel invloed, terwijl er nog weinig van weten. Opgemerkt moet worden dat uiteindelijk de scope wel breder is dan louter B&O: e.e.a. valt immers niet los te zien van ontwerp en crisisbeheersing.

3.2 Verzamelen en valideren data

Als basis voor het onderzoek zijn de volgende bronnen gebruikt:

- Graslandonderzoeken: in het verleden zijn er tal van graslandonderzoeken uitgevoerd op de zanddijken van WDOD en voorgangers. Dit geeft een globaal beeld van de ontwikkeling van de grasbekleding in de tijd.
- Inspectie- en onderhoudsdata van de jaren 2016-2020: dit betreft alle meldingen op de noordelijke en zuidelijke oever van de Vechtdijk.
- Wettelijke Beoordeling: de beoordeling van beide dijktrajecten.
- Input van de dijkbeheerder: er is tevens gesproken met de dijkbeheerder (Frank Jansen). Zie Bijlage A voor een verslag van het gesprek.

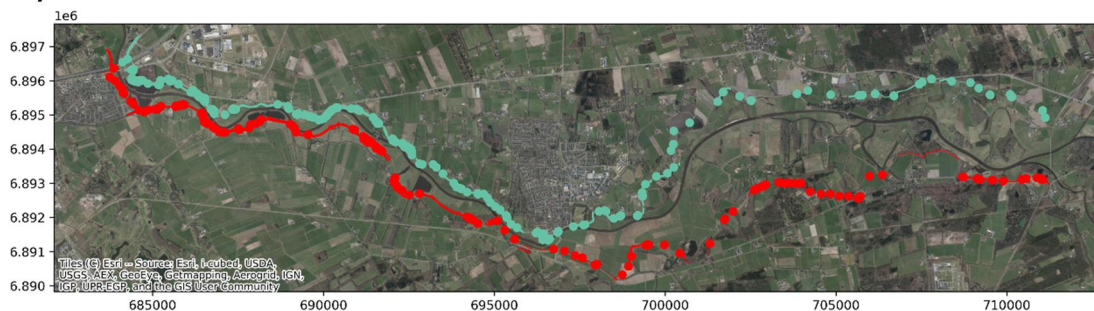
In de volgende paragrafen wordt kort de essentie van de verschillende bronnen weergegeven en wat dit betekent voor de analyse. De input van de dijkbeheerder wordt niet apart belicht maar indien relevant gebruikt om context te geven aan de andere bronnen.

3.2.1 Graslandonderzoeken

In 2003 heeft het toenmalige Waterschap Groot Salland besloten tot een andere vorm van beheer voor (onder andere) de dijken langs de Overijsselse Vecht (Waterschap Groot Salland, 2012). Kern van deze beheervorm is dat het gericht is op verschraling van de bodem, wat op termijn de diversiteit aan soorten en de natuurwaarde zeer ten goede komt. Uit onderzoek is gebleken dat dit tevens hand in hand gaat met een verhoogde erosiebestendigheid. Uit de rapportage van Waterschap Groot Salland (2012) blijkt dat inderdaad de erosiebestendigheid van de grasbekleding langs toenmalige dijkkring 9 is toegenomen, evenals de natuurwaarde. Uit Waterschap Groot Salland (2014) blijkt dat dit zich tot 2014 heeft doorgezet. Opvallend is dat de noordoever (9-1) in 2011 beduidend beter scoorde dan de zuidoever (53-3) van de Overijsselse Vecht. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door de oriëntatie en de aanwezigheid van bomen. Over het geheel gezien is de kwaliteit langs de zuidoever zelfs iets achteruitgegaan in de eerste periode van het onderzoek (tot 2011).

Uit het gesprek met de beheerder bleek dat sinds enkele jaren de grasmat dermate verschaald is dat deze in kwaliteit achteruit lijkt te gaan. De ervaring is dus globaal gezien dat de grasmat de eerste pakweg 15 jaar van het beleid verbeterd is, maar dat de afgelopen jaren een kentering heeft plaatsgevonden. Vermoedelijk is de verschraling dusdanig dat daardoor ook het herstel na bijvoorbeeld de droge zomer van 2018 moeizamer verloopt. Daarom wordt in de omgeving van Dalfsen momenteel een bemestingsproef uitgevoerd.

3.2.2 Inspectiedata



Figuur 3 Overzicht van meldingen in de inspectiedatabase in de periode 2016-2020.

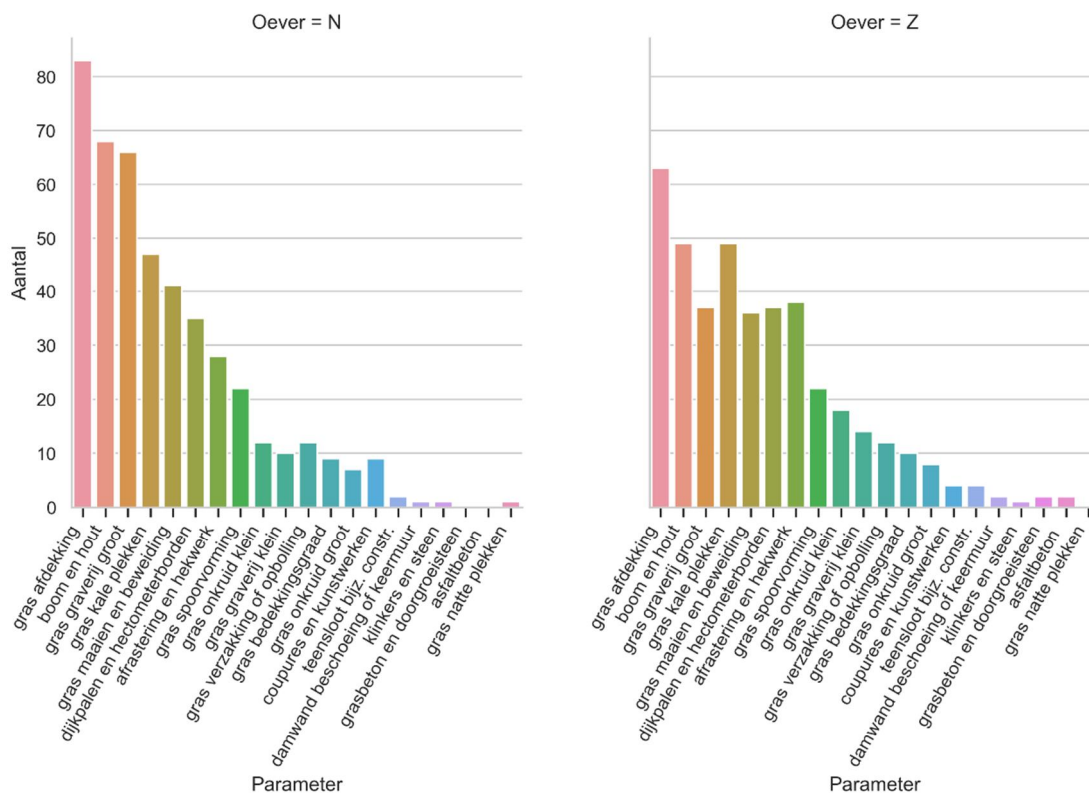
Vanuit WDOD is voor de jaren 2016-2020 inspectiedata aangeleverd. Dit betreft meldingen van schades/problemen/acties op zowel de zuid- als noordoever tussen de A28 en Ommen (zie Figuur 3). Dit strekt dus iets verder dan het focusgebied van de analyse, maar ook gegevens tussen Dalfsen en Ommen kunnen relevant zijn, aangezien de keringen qua opbouw en beheer op elkaar lijken. Omdat 2020 geen volledig jaar betreft heeft 2020 minder meldingen, het aantal meldingen per jaar en per periode gedurende het jaar is weergegeven in Tabel 2. Het betreft zowel punt- als lijn- en vlakmeldingen van schades. Deze gegevens kunnen nuttig zijn om de inzichten van de beheerder aan te vullen en te onderbouwen. Primair doel is om te bepalen welke typen schades/meldingen frequent voorkomen en mogelijk effect hebben op de overstromingskans. Opgemerkt moet worden dat doordat bij een inspectie niet alles wordt gedetecteerd de data enkel gebruikt kan worden op hoofdlijnen en er dus niet zonder meer conclusies kunnen worden getrokken over het optreden van schade op een specifieke locatie.

De schades worden gemeld met een hoofdparameter (bijv. gras afdekking, gras graverij groot) en een subparameter (bijv. maaisel, hond, konijn). Dit is grotendeels, maar niet helemaal conform Digigids. Meest belangrijke verschil is dat in de gehanteerde systematiek niet de waarneming en de vervolgacties worden gescheiden (dit is een keuze, die op zich prima is en voor goede samenhang tussen inspectie en vervolgacties kan zorgen). Sterk punt in dat licht is dat ook aandachtspunten bij noodsituaties worden bijgehouden (bijv. plaatsen waar een bekramming moet worden aangebracht).

Tabel 2 Aantal meldingen per periode. Voorjaar is tot 1-6, najaar is na 1-9.

	Jaar				
	2016	2017	2018	2019	2020
Voorjaar	97	69	80	64	79
Zomer	1	12	4	56	2
Najaar	136	100	75	87	-

In Bijlage B is een overzicht gegeven van het aantal meldingen per schade per jaar en per periode gedurende het jaar. Dit geeft een beeld van de meest voorkomende schades. Figuur 4 geeft de aantallen waarnemingen van verschillende hoofdparameters weer. Merk op dat het gaat om de periode van de eerste melding, het betekent niet dat de schade ook (in dat jaar) is opgelost. We beschouwen in de verdere analyse alleen de datum van eerste melding.

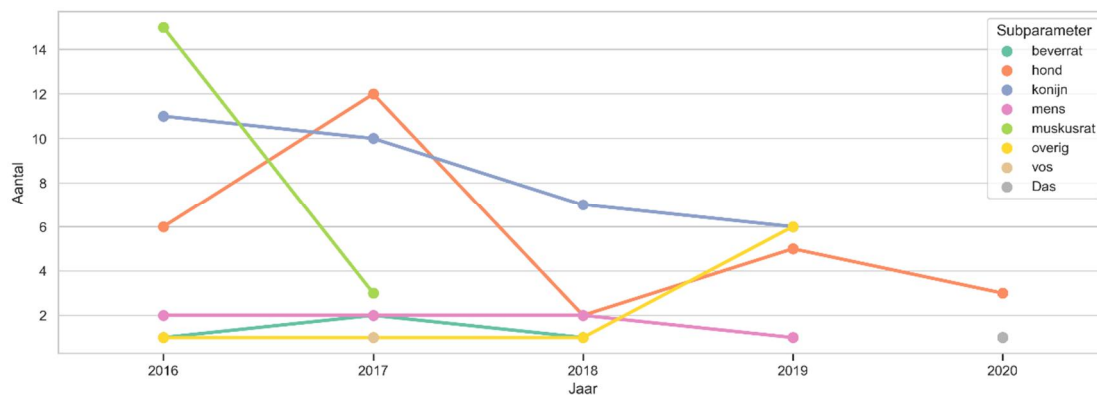


Figuur 4 Aantallen meldingen per hoofdparameter. Links voor 9-1, Rechts voor 53-3.

Op het eerste gezicht is er geen al te groot verschil tussen de twee oevers. In het algemeen is op de zuidoever minder sprake van afdekking, graverij, en 'boom en hout', maar zijn er relatief iets meer meldingen van problemen met hekwerken, afrasteringen en dijkpalen. Dit zijn geen zaken met directe invloed op de waterveiligheid. Bij de vergelijking tussen de trajecten wordt opgemerkt dat het aantal meldingen een vertekend beeld kan geven. Een lijn of vlak kan meerdere schades aangeven. Bijvoorbeeld één lijnelement voor honderden meters beschadigde grasmat. Wanneer we nader kijken naar de 3 meest voorkomende schades geeft dat het volgende beeld:

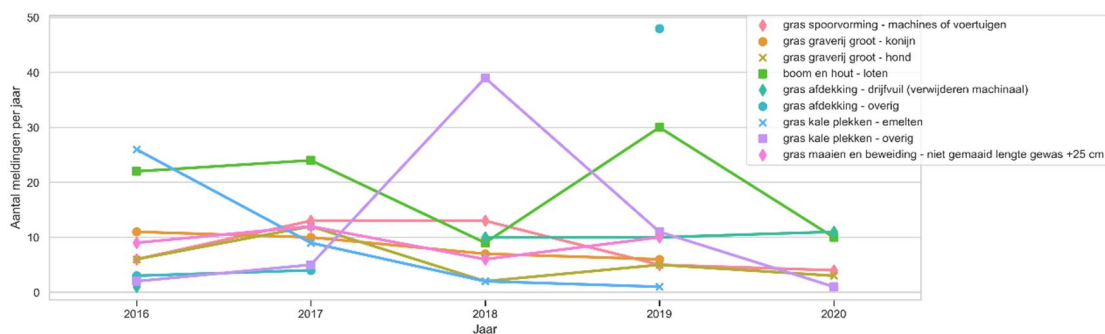
- **Gras afdekking** wordt het meest gemeld en slaat doorgaans op twee zaken:
 - Een opmerking dat de dijk door begroeiing of bebouwing slecht inspecteerbaar is³
 - Aanwezigheid van drijfvuil.
- **Boom en hout** gaat eigenlijk enkel om loten die door de bekleding groeien en verwijderd moeten worden.
- **Gras graverij groot** slaat op graverij van alles wat gelijk aan of groter is dan een konijn. Figuur 5 laat het verloop van meldingen in de tijd zien. Hieraan is te zien dat de meeste graverij wordt veroorzaakt door konijnen, maar dat een toenemend aantal meldingen onder onbekend is geschaard. Daarbij is dus niet bekend tot welke soort de dader behoort. Opgemerkt moet worden dat er dassen voorkomen in het gebied en dat ook bevers vaker gesignaleerd worden. Dat heeft nog niet tot schade geleid, maar vormt wel een groot potentieel risico.

³ Deze meldingen zijn vrijwel allemaal gemaakt in juni/juli 2019. Vermoedelijk een update om deze kennis in het systeem te krijgen.



Figuur 5 Meldingen van graverij groot uitgesplitst per hoofdparameter per jaar.

Buiten de 3 meest voorkomende hoofdschadetypes, is het ook interessant om te zien of er mogelijk subparameters bovengemiddeld vaak voorkomen. Dit wordt weergegeven in Figuur 6. Naast de al bekende parameters zien we hier schade door emelten/engerlingen en overige kale plekken voorkomen. Daarnaast is spoorvorming een continu probleem. Opvallend is dat het aantal engertingen de laatste jaren sterk afneemt, de reden is niet bekend, de ervaring was dat de actieve bestrijding niet erg succesvol was (bron: beheerder). De meldingen onder 'gras kale plekken – overig' zijn met name in september 2018 gedaan. Dit slaat vermoedelijk op droogteschade uit dat jaar, en meldingen dat moet worden doorgezaaid.



Figuur 6 Hoofd/subparameter combinaties die het meeste voorkomen. Uitgesplitst per jaar.

Samenvattend kan op basis van de inspectiedata vastgesteld worden welke schades frequent voorkomen. Deze zijn met toelichting benoemd in Tabel 3, indicatief is aangegeven onder welk type schade (zie paragraaf 2.2) de schade valt en waarom.

Tabel 3 Overzicht van meest voorkomende typen schades en toelichting van hun effecten op de faalkans.

Schadeparameter	Type	Toelichting
gras afdekking (a.g.v. begroeiing/bebouwing)	2	Slechte inspecteerbaarheid leidt tot afname betrouwbaarheid inspecties en tot grotere kans op missen belangrijke schades
gras afdekking (a.g.v. drijfvuil)	2	Geen direct probleem, maar niet verwijderen leidt op termijn tot afsterven en kale plekken
loten	2	Geen direct probleem, maar houtige gewassen kunnen leiden tot preferente erosiepaden of slechte begaanbaarheid en inspecteerbaarheid
gras graverij groot	1	Graverij leidt tot rechtstreekse aantasting van de grasmat. Diepte en omvang bepaalt, naast de plaats op het talud de gevolgen voor de overstromingskans. Bij zeer grote graverij kunnen ook andere mechanismen dan GEBU/GEKB worden beïnvloed

gras kale plekken – emelten	1	Op relatief korte termijn kunnen emelten leiden tot een zeer losse en aangetaste graszode door vernietiging van wortels.
gras kale plekken (a.g.v. droogte)	1	Door droogte kan de graszode afsterven. Opgemerkt moet worden dat uit de analyse van de droogte van 2018 herstel nog lang nodig is.

Opgemerkt moet worden dat dit gaat om typen schade die frequent voorkomen. Op schade door bijvoorbeeld bevers is zeker kans aangezien bevers momenteel veel worden waargenomen, maar schade door bevers is in de afgelopen jaren in dit deel van het beheersgebied nog niet waargenomen. De tijdreeks is met 5 jaar echter zeer kort, dus deze typen schade moeten wel worden meegenomen in een eventuele risicoanalyse.

Afgezien van de afdekking zijn de andere schadepunten ook benoemd door de beheerder (zie Bijlage A).

3.2.3 WBI Beoordeling Waterschap Drents Overijsselse Delta

3.2.3.1 Traject 9-1

Voor traject 9-1 is het gedeelte tussen hm 9-12.2 en hm 9-22.0 het meest relevant (Dalfsen tot A28). De beoordeling voor GEBU is hier op vakniveau voor de meeste dijkvakken IIIv, de faalkans van de grasbekleding in een dijkvak is kleiner dan doorsnede-eis signaleringswaarde, maar groter dan de doorsnede-eis ondergrenswaarde. Voor GEKB worden de meeste dijkvakken beoordeeld in categorie IV, de faalkans GEKB is veel kleiner dan de doorsnede-eis signaleringswaarde. Een klein gedeelte valt in de categorie IVv (voor de betekenis van de categorieën, zie Figuur 7).

Cat.	Aanduiding categorie toetsoordeel per vak per toetspoor	Begrenzing categorie
		$P_{f,dsn}$ Faalkans per vak (doorsnede of kunstwerk) [1/jaar]. $P_{eis;sig}$ Signaleringswaarde van het dijktraject [1/jaar]. $P_{eis;ond}$ Ondergrens van het dijktraject [1/jaar]. $P_{eis;sig;dsn}$ Faalkans per doorsnede of kunstwerk [1/ jaar]
Iv	voldoet ruim aan de signaleringswaarde	$P_{f,dsn} < \frac{1}{30} P_{eis;sig;dsn}$
IIv	voldoet aan de signaleringswaarde	$\frac{1}{30} P_{eis;sig;dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis;sig;dsn}$
IIIv	voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde	$P_{eis;sig;dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis;ond;dsn}$
IVv	voldoet mogelijk aan de ondergrens of aan de signaleringswaarde	$P_{eis;ond;dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis;ond}$
Vv	voldoet niet aan de ondergrens	$P_{eis;ond} < P_{f,dsn} < 30 P_{eis;ond}$
VIv	voldoet ruim niet aan de ondergrens	$P_{f,dsn} > 30 P_{eis;ond}$
VIIv	nog geen oordeel	

Figuur 7 Overzicht van categorieën in de beoordeling.

Voor GEBU is eigenlijk een beoordeling niet goed mogelijk, omdat de beoordelingsregels zijn opgesteld voor gras op een kleilaag. Ten aanzien van de beoordeling zijn er verder 2 aandachtspunten in het licht van deze analyse:

1. In het beschouwde gedeelte wordt de waterstand hoofdzakelijk gedomineerd door afvoer van de Vecht en waterstand op het IJsselmeer, maar niet door de wind. Bij de beoordeling is voor het waterstandsverloop echter gebruik gemaakt van een trapezium horend bij een storm op het IJsselmeer. Waarschijnlijk is een constante waterstand van 12 uur gecombineerd met golven gebaseerd op basis van Riskeer hier een betere schematisering. Dit is dan ook het uitgangspunt voor de voorbeeldsituaties die in de volgende paragraaf zullen worden doorgerekend.

2. Voor het gehele gedeelte is met een gesloten graszode op klei gerekend, waarbij de onderlaag een hoge (90%) zandfractie is toegekend. Gezien de huidige staat van de bekleding, en het beeld wat volgt uit de inspecties is dat optimistisch.

3.2.4 Traject 53-3

Voor traject 53-3 is het gedeelte tussen hm 53-100.8 en 53-110.6 het meest relevant. Dit gedeelte is echter i.v.m de aanmelding bij het HWBP niet beoordeeld en is overal in categorie Iv geplaatst. Bovenstrooms van dit gedeelte (dus bovenstrooms van Daltsen) heeft GEBU het oordeel Vv gekregen. Het benedenstroomse gedeelte zal onder gelijke aannames naar verwachting niet beter uit de beoordeling komen. Voor GEKB geldt dat hier afhankelijk van de oriëntatie wordt gekomen tot IIv of IIIv. Opgemerkt moet worden dat de twee aandachtspunten van traject 9-1 ook hier gelden:

1. Er is voor traject 53-3 gerekend met een waterstandsverloop wat hoort bij het meerpeil van het IJsselmeer (trapezium met een basisduur van 444 uur). Dit is zelfs voor het IJsselmeer zelf te pessimistisch en verklaart waarom zelfs bij relatief lage golfhoogtes de bekleding al ruimschoots in categorie Vv valt. Ook hier rekenen we verder met een constante waterstand van 12 uur. Wellicht dat in de omgeving van de A28 een trapezium (met duur van 35 uur) wel een betere benadering geeft.
2. Ook voor traject 53-3 is gerekend met de standtijdlijn voor een gesloten graszode op een kleilaag (met hoog zandgehalte).

3.3 Analyse overstromingskans gegeven schade

Met deze analyse wordt gekeken of niet gedetecteerde type 1 schade en/ of niet gerepareerde type 1 schade direct leidt tot een significante verhoging van de overstromingskans. Eerder in dit memo is onderscheid gemaakt tussen 3 typen schade. Daarbij heeft enkel schadetype 1 direct invloed op de faalkans en daarmee het overstromingsrisico. In deze paragraaf beschouwen we de invloed van schade aan de grasbekleding voor 4 voorbeeldlocaties langs de Vecht. Deze zijn weergegeven in Tabel 4. De schade aan de grasbekleding kan zich bevinden op het buitentalud, kruin of binnentalud van de dijk.

Tabel 4 Geanalyseerde locaties met gehanteerde randvoorwaardenpunten, oriëntaties en de beschouwde categoriegrenzen.

Locatie	Traject	Randvoorwaardenpunt	Oriëntatie	Beschouwde categoriegrens
A	9-1	OV_1_9-1_dk_00196	210	IIIv – doorsnede-eis ondergrens
B	9-1	OV_1_9-1_dk_00148	270	IIIv – doorsnede-eis ondergrens
C	53-3	OV_1_53-3_dk_00197	345	IIv & IIIv doorsnede-eis signaleringswaarde en doorsnede-eis ondergrens
D	53-3	OV_1_53-3_dk_00092	280	IIv & IIIv doorsnede-eis signaleringswaarde en doorsnede-eis ondergrens

Voor alle locaties worden met Ringtoets uitgevoerd:

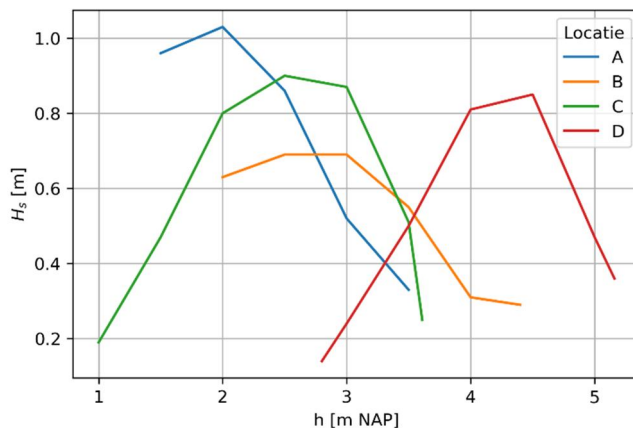
- GEKB berekeningen om de faalkans en het kritisch overslagdebiet bij doorsnede-eis te bepalen. De faalkans is berekend uitgaande van kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet ($\mu=5.6$ l/m/s, $\sigma = 1.1$ l/m/s). Deze waarden zijn een indicatie van de erosiebestendigheid zonder schades, enkel gebaseerd op eerdere golfoverslagproeven op de Vechtdijk in 2010.
- Een berekening van het afslagprofiel voor elk van de bij GEBU berekende golf randvoorwaarden en waterstanden.

Wanneer we een schade type 1 (directe invloed op de faalkans) beschouwen kunnen we dat voor een beperkte schade op het buitentalud modelleren door bijvoorbeeld een minder gunstige

standtijdlijn te hanteren. Voor grote kale plekken, zonder doorworteling van betekenis, is er geen sprake van een verminderde sterkte, van de grasbekleding, maar helemaal geen sterkte. In dat geval treedt direct erosie van de onderlagen op. Tussen deze uitersten zijn uiteraard veel andere scenario's denkbaar. Voor gras op zanddijken rekenen we hier met de conservatieve aanname dat de grasmat gegeven een schade geen enkele sterkte heeft. Omdat er ook geen klei aanwezig is worden voor schatting van het afslagprofiel de formules voor een zandkern uit Klein Breteler et al. (2012) gebruikt. Hierbij gelden de volgende aandachtspunten (zie ook Hoofdstuk 4):

- De toepassingsvoorwaarden van het model geven een minimale significante golfhoogte van 0,7 meter. In veel gevallen is de significante golfhoogte wat lager. De verwachting is dat het erosievolume met een lagere golfhoogte wel blijft afnemen, maar dat de onnauwkeurigheid van het model hier toeneemt..
- De korreldiameter van het zand van de Vechtdijk is aan de kleine kant misschien gemiddeld iets lager dan 0,18 mm, soms wat grover, soms ook aanzienlijk fijner. Mogelijk leidt dit tot een onderschatting van de voorspelde erosie.
- Aangenomen wordt dat de dijk faalt wanneer de kerende breedte op waterstandsniveau kleiner dan circa 1 meter is.
- De taludhelling van locatie C ligt rond de ondergrens van de toepassingsvoorwaarden van de rekenregel (1:4,5).
- Het model is bedoeld voor recht inkomende golven in een 2D-situatie, zonder stroming. Wel wordt er vanuit gegaan dat het erosievolume uit de kern, geen terras vormt voor de dijk. Dit komt overeen met een situatie waarbij het materiaal verdwijnt naar dieper water of zijdelings wordt meegevoerd door langstroming.

In het algemeen geldt voor alle locaties dat de combinatie van waterstand-golfhoogte, bij een gelijke kans van optreden, verloopt als in Figuur 8, met de hoogste golven voor waterstanden enkele meters onder de kruin. Te verwachten is dus dat op die hoogte het erosievolume het grootst is, maar niet noodzakelijk de kans op een overstroming, omdat de dijkbreedte en daarmee het benodigde erosievolume voor een doorbraak veel groter is.



Figuur 8 Voorbeeld van het verloop van de relatie tussen waterstand en significante golfhoogte bij gelijke kans (categorie IIIv).

Voor de 4 locaties zijn de resultaten van de achtereenvolgende berekeningen weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5 Resultaten berekeningen voor 4 locaties.

		Locatie			
		A	B	C	D
Geometrie	Kruinhoogte [m] NAP]	3.77	4.52	3.8	5.24
GEKB	$P_{f,GEKB}$ [-]	1/20,000	1/8,000	$3 \cdot 10^{-6}$	1/45,000

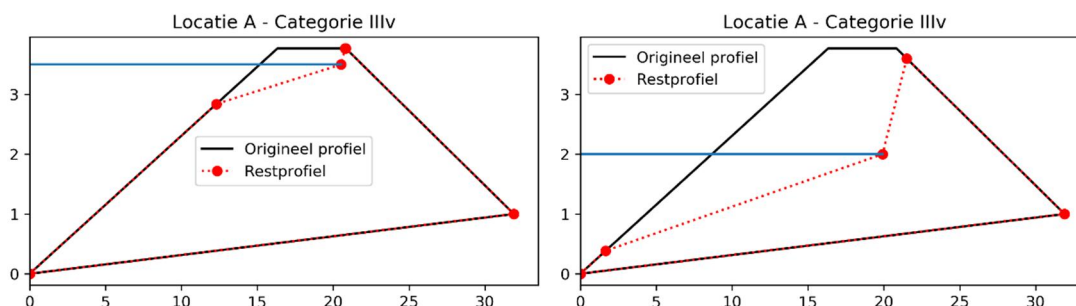
	$Q_{\text{overslag,dsn}}$ [l/m/s]	0.03	0.15	0.09			4.73
GEBU Afslagprofiel	Categorie belasting	IIIv	IIIv	IIIv	IIv	IIIv	IIv
	Tijd tot falen ongunstigste belastingcombinatie [uur]	-	11	-	7	7	7
	Minimale restbreedte [m]	1.4	-	2.44	-	-	-
	Waterstand bij minimale restbreedte NAP [m]	3.5	4.4	3.5	3.5	5.16	5.16
	Restbreedte bij waterstand lager dan ongunstigste combinatie [m]	4.8	5.6	5.2	3.2	4.2	3.8

Voor locatie A geldt dat voor geen van de randvoorwaarden dijkfalen wordt berekend, uitgaande van een niet gedetecteerde en/of niet gerepareerde schade (op het buitentalud). De locatie voldoet ook redelijk ruim voor GEKB ($P_{f,eis} = 1/2500$). De meest kritische randvoorwaardencombinatie voor het buitentalud is bij de hoogste waterstand met een relatief kleine golf, hoewel bij grotere golven lager op het talud veel meer erosie optreedt (zie Figuur 9). De combinatie met hoge waterstand geeft echter de kleinste resulterende restbreedte omdat de dijk bij de kruin nu eenmaal smaller is.

Locatie B faalt rekenkundig na 11 uur storm, gegeven een niet gedetecteerde en/of gerepareerde schade op het buitentalud, . Dit is net voor het einde van de rekenwaarde van de stormduur van 12 uur. De faalkans voor overslag is hier ook hoger, dus er is relatief minder overhoogte en daarmee ook minder dijkbreedte.

Bij locatie C is voor zowel belasting categorie IIv als IIIv gerekend. Deze locatie heeft een zeer geringe kans op golfoverslag, minder dan 0,1 l/s per m bij de doorsnede-eis, ondergrens.. Dat is terug te zien in de relatief grote minimale restbreedte bij belasting IIIv. Bij een categorie hogere belasting (signaleringswaarde in plaats van ondergrenswaarde) treedt wel rekenkundig falen op.

Voor locatie D geldt dat in beide belastingcategorieën rekenkundig falen optreedt gegeven een niet gedetecteerde en/of gerepareerde schade. Ook deze dijk is aan de lage kant, ofwel heeft een grotere kans op golfoverslag..



Figuur 9 Restprofielen voor locatie A. Links de belastingcombinatie met de kleinste restbreedte. Rechts het erosieprofiel bij de grootste golf.

3.3.1 Praktische betekenis en duiding resultaten

Met bovenstaande analyse is een indicatie verkregen van het effect van schades aan grasbekledingen op zanddijken op de overstromingsveiligheid. Uit de analyse blijkt dat het in de meeste gevallen enige tijd duurt eer golfaanval op de gemodelleerde kale dijk tot een doorbraak leidt, en dat dit sterk afhangt van de plaats van de golfaanval op het talud (hoger/lager). Schade aan

de bekleding leidt dus niet per definitie tot snel catastrofaal falen. Bij interpretatie van de resultaten moet in ogenschouw worden genomen dat de modellering op sommige punten conservatief, en op sommige punten wellicht optimistisch is. Zo is bijvoorbeeld geen rekening gehouden met erosie door langsstroming (optimistisch), maar is ook geen rekening gehouden met de mogelijkheid erosie te stoppen door noodmaatregelen (conservatief) en eventuele resterende sterkte van de beschadigde grasmat (conservatief). Daarnaast is rekening gehouden met een intact talud: bij grootschalige graverij (bijv. door bevers) zal het erosiepatroon vermoedelijk anders verlopen dan hier gemodelleerd. Er bestaat dan ook de mogelijkheid van interactie met/invloed op andere mechanismen (zie ook Taccari & Van Der Meij (2016)).

In de resultaten is een aantal trends waar te nemen die van belang zijn voor de keuze welke locaties te beproeven en hoe hier mee om te gaan in beheer en onderhoud (en evt. ontwerp):

- De plaats op het talud heeft veel invloed op het effect op de veiligheid. In de meeste doorgerekende gevallen is de restbreedte dicht bij de kruin kleiner dan lager op het talud. Deze informatie kan ook worden benut om het risicogestuurd beheer en onderhoud te verbeteren: plaatsen met minder restbreedte kunnen dan bijvoorbeeld intensiever worden geïnspecteerd of hoger geprioriteerd bij de uitrol van noodmaatregelen tijdens hoogwater.
- Er lijkt een verband te zijn tussen restbreedte en overslag: dijken met lage overslagdebiëten hebben in het algemeen meer restbreedte. Daarom is het van belang om in het uiteindelijke ontwerp beide mechanismen in samenhang te beschouwen, ook in relatie tot de omgang met schade aan het talud.
- Er is voor veel locaties kans op een overstroming bij schade aan het buitentalud. Het is daarom van belang om voor veelvoorkomende schades de sterkte van het buitentalud te beproeven. Het gaat dan met name om veelvoorkomende schades als graverij door honden/konijnen en kale plekken (droogte/emelten)⁴. De keuze voor de beproeving van kale plekken door droogte en/of emelten is lastig, omdat dit soort schade in veel gradaties voorkomt. Voor overslag zijn geen berekeningen met schade uitgevoerd, maar in het algemeen geldt dat de kans dat schade hier invloed krijgt kleiner is: voor overslag moet immers eerst het water over de kruin komen. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat bij overslag minder mogelijkheden tot noodmaatregelen zijn, en dat de verwachting is dat het erosieproces sneller verloopt. Daarnaast hangt het relatieve belang van GEKB ten opzichte van GEBU ook af van de locatiespecifieke situatie en eventuele later te maken ontwerpkeuzes.

In de volgende paragraaf zijn een aantal praktische afwegingen t.a.v. het handelingsperspectief binnen beheer & onderhoud gegeven.

3.3.2 Handelingsperspectieven

In deze paragraaf worden kort een aantal afwegingen gegeven hoe de bevindingen uit voorgaande paragraaf kunnen worden vertaald naar de invulling van de zorgplicht.

Uit de analyses van de inspectiedata volgt een helder beeld van veel voorkomende schades. De erosieprofielen op verschillende locaties kunnen worden gebruikt voor het beter prioriteren van inspecties, met een hogere intensiteit op risicovolle plaatsen.

Uit ander onderzoek (bij onder andere Waterschap Rivierenland) blijkt dat bij visuele inspecties van waterkeringen regelmatig schades gemist worden of anders beoordeeld door verschillende inspecteurs. Dit is van belang bij het implementeren van risicogestuurd beheer en onderhoud, vooral bij schades die niet vaak voorkomen en moeilijk te detecteren zijn, met name grote graverij door bijvoorbeeld bevers. Aandachtspunten zijn in ieder geval het voorkomen dat locaties onbegaanbaar of moeilijk te inspecteren worden (bijv. door veel struikgewas bij de teen), en de mogelijkheid tot

⁴ Meer in algemene termen kan dit ook onderscheiden worden als een 'puntschade', bijvoorbeeld een konijnenhol, en een 'vlakschade' bijv. een plaats waar lokaal veel aantasting is door emelten of kale plekken. Dit onderscheid is wel belangrijk omdat beide typen schade waarschijnlijk een ander effect hebben op het faalgedrag van de grasmat.

inzet van drones met infraroodbeelden of sonarapparatuur om zo de betrouwbaarheid van inspecties te vergroten.

Bij WDOD is een behoorlijk goede integratie tussen het dagelijks beheer en onderhoud en de vertaling naar crisismaatregelen (met name bekrammingsen). Aandachtspunt is dat er weinig bekend is over de daadwerkelijke sterkte van bekrammingsen, iets wat wel bekend moet zijn om deze goed mee te kunnen nemen in een risicogestuurde afweging.

Ook in ontwerp zijn er mogelijkheden om de effecten van schades op de sterkte mee te nemen. Het blijkt dat in sommige gevallen en op sommige plaatsen op het talud de restbreedte onvoldoende is, het is dan ook zeker te overwegen of lokaal toepassen van erosiebestendige lagen (bijv klei of bentonietmatten) kansrijk is. Dit is zeker niet overal langs de Vecht nodig. De uit te voeren erosieproeven zullen nog meer licht werpen op de sterkte van een aangetaste toplaag en geven dan een scherper beeld van de noodzaak van het toevoegen van erosiebestendige lagen.

Belangrijke conclusie op basis van de resultaten is dat een tekort aan restbreedte om golfaanval van buiten op te vangen vaak gepaard gaat met relatief grotere overslagdebieten. Het toestaan van grote overslagdebieten ligt op basis daarvan niet voor de hand.

4 Conclusies

In dit memo is een beeld geschetst van de veelvoorkomende schades aan de waterkeringen langs de Overijsselse Vecht en de effecten daarvan op de overstromingskans. Dit leidt tot de volgende conclusies:

- De meest 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. Om de sterkte van de grasmat bij schade beter te kunnen inschatten wordt geadviseerd om deze schades tijdens het erosieonderzoek te beproeven met de golfklapsimulator.
- Aanvullend dient in het risicogestuurd beheer en onderhoud ook rekening te worden gehouden met schades die minder vaak voorkomen (met name grootschalige graverij door bevers/dassen). Omdat deze schades nu niet voorkomen zouden deze voor proeven nagemaakt moeten worden. De vraag is echter hoe zinvol dit is omdat a) de vraag is hoe goed een dergelijke schade kan worden nagemaakt en b) de vraag is in hoeverre het mogelijk is om de situatie met een golfklapsimulator op realistische wijze te beproeven.
- De sterkte bij golfaanval op het buitentalud is onderzocht met een afslagmodel. Dit leidt tot de volgende conclusies:
 - Op de onderzochte locaties is een verband gevonden tussen het overslagdebiet en de restbreedte na golfaanval op het buitentalud.
 - De restbreedtes die worden gevonden in de berekeningen laten zien dat met een zanddijk bekleed met gras, gecombineerd met gericht risicogestuurd beheer en onderhoud het voldoen aan de overstromingskansen reëel is.
- Wanneer meer bekend is over de sterkte van grasbekledingen op zanddijken kan nader geanalyseerd worden wat nodig is om vanuit risicogestuurd beheer en onderhoud de overstromingskans te beheersen door keuzes in ontwerp, inspectie, onderhoud en crisismanagement integraal af te wegen.

5 Referenties

Haak, A., & Schoonderwaldt, D. (2018). *Risicogestuurd beheer en onderhoud van waterkeringen*.

Klein Breteler, M., Capel, A., Kruse, G., Mourik, G., & Kaste, D. (2012). *Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven*.

Klerk, W. J. (2019). *Risicogestuurd beheer en onderhoud van dijkbekledingen*.

Lendering, K. T., Jonkman, S. N., & Kok, M. (2016). Effectiveness of emergency measures for

- flood prevention. *Journal of Flood Risk Management*, 9(4), 320–334.
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12185>
- NEN. (2018). *NEN-EN 16991:2018 Risk Based Inspection Framework*.
- Taccari, M. L., & Van Der Meij, R. (2016). Study of the effect of burrows of European Badgers (*Meles meles*) on the initiation of breaching in dikes. *E3S Web of Conferences*, 7.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160703001>
- Waterschap Groot Salland. (2012). *Erosiebestendigheid en natuurwaarde van dijkgraslanden - een samenvatting van 9 jaar onderzoek*.
- Waterschap Groot Salland. (2014). *Vervolgrapport 10 Monitoring Vegetatiedek dijken - Dijkkring gebied 9 gedeelte Vechterweerd-Zwartsuis*.

A Gesprek met Frank Jansen (WDOD) – beheerder Vechtdijk

Verslag gesprek van 8 juni 2020, locatie Vechtdijk bij Dalfsen (noordoever).

Organisatie van het beheer en onderhoud

Bij WDOD zijn 4 beheerders elk verantwoordelijk voor ca. 250 van de 1000 km primaire, regionale en overige keringen. De beheerders wisselen ongeveer iedere 5 a 6 jaar van beheersgebied, maar bekijken ook elk elkaars gebied. Ze zien dus iedere 2 jaar iedere kering wel minstens 1x. De beheerders inspecteren de keringen alleen en hebben tegenwoordig ook de beschikking over een drone met warmtecamera en er is ook een sonarboot beschikbaar. Het grootste deel van de keringen bij de Vecht is eigendom van WDOD. Overal waar WDOD eigenaar is, zijn de keringen opengesteld voor wandelaars. Op de waterkeringen waar niet gewandeld mag worden, worden verbodsborden geplaatst.

De keringen worden elk voor- en najaar geschouwd. Dit jaar hebben de beheerders alle keringen zelf geïnspecteerd, dat gebeurt niet ieder jaar en men wil een deel van de overige keringen uit de vaste schouw halen. Dit geeft meer capaciteit voor het beheer van de meer belangrijke primaire en regionale keringen. Daarnaast is er het plan om muskusrattenbestrijders de overige keringen te laten inspecteren. Inspecties zijn gebaseerd op, maar niet volledig conform de Digigids.

Staat van de Vechtdijken

Vanaf ~2000 is op de zandige Vechtdijken, natuurtechnisch beheer toegepast. Met deze vorm van beheer krijg je diverse grassen en kruiden die samen zorgen voor een erosiebestendige grasmat. Van 2000 tot ongeveer 2015 gaf deze vorm van beheer goede resultaten. Na 2015 zag je kwaliteit iets afnemen waarschijnlijk omdat de waterkeringen te weinig voedingsstoffen meer hebben. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de (te) schrale bodem, die weer een gevolg is van het natuurtechnisch beheer. Al ongeveer 20 jaar wordt de grasmat gemaaid (tussen 15 juni en 15 juli) en daarna afgevoerd (op het binnentalud mogen nadien ook schapen grazen). Dit leidde in eerste instantie tot een goede en diverse grasmat, maar de bodem is dermate schraal geworden (bijna stoffig zand) dat het gras onvoldoende voedingsstoffen krijgt. Daarom is men bij Dalfsen bezig met een mestproef waar op 3 vakken struviet, bokashi en drijfmest wordt toegepast als bemesting. De inschatting van de beheerder is dat er enige vorm van bemesting nodig gaat zijn om het gras op de dijken langs de Vecht op orde te houden. De droogte heeft wel beduidend meer effect op zuidhellingen, ook dit jaar is het alweer erg droog, zeker door de opeenvolgende droge jaren, gecombineerd met de schrale bodem heeft het gras geen kans zich goed te herstellen.

Andere schades die veel voorkomen zijn alle soorten graverij (met name door honden neemt sterk toe), groei van loten/houtige planten (met name in rasters), Japanse duizendknoop en engerlingen. De werkpraktijk is dat bij een inspectie alle soorten graverij behalve van mollen en muizen worden gemeld (extremen hierin worden wel gemeld). Na inspectie komt circa 1,5^e week erna de aannemer om de schades te repareren. Mollen en muizen wordt in principe niks mee gedaan, tenzij het 'te erg' wordt. Mollen worden wel gevangen. Loten en duizendknoop worden weggehaald, hoewel duizendknoop ook gemonitord wordt aangezien verwijderen erg lastig is. De bestrijding van duizendknoop is nog in een experimentele fase. Engerlingen/emelten hebben de grasmat in het verleden ook aardig aangetast. Er is toen wel een beheersmaatregel getroffen (zaaien van wilde peen), maar dit werkte niet. De engerlingen verdwenen vanzelf weer, of waren in elk geval in mindere mate aanwezig. Deze bevonden zich overigens hoofdzakelijk op de schaduwhellingen.

Doordat de beheerders zelf de dijken inspecteren hebben ze een goed beeld van de algehele ontwikkeling. Wanneer er verrassingen zijn is dit meestal door menselijke activiteiten (graverij/vergunningen etc).

Zorgwekkende ontwikkeling is dat in het gebied van de Vecht tegenwoordig ook bevers en beverratten voorkomen. Er zijn al tests geweest met het detecteren en in kaart brengen van

graafschade met behulp van drones, een camera in het hol en een schoorsteenvegerset. Dit is echter een groot aandachtspunt. In Drenthe zit een dassenburcht, daar wil men met een grondradar de boel gaan monitoren. Daarnaast zijn de sonarboot en het uitwerpen van een sonarbal mogelijke oplossingen. Lastige bij bevers is dat holen vaak beginnen onder struikgewas en onder de waterlijn. Dat maakt ze onvoorspelbaar en lastig te vinden.

Omdat in 1998 het voor het laatst echt hoogwater was bij de Vecht is er weinig geheugen over de schades die toen optraden. Er zijn wel meerdere wellen gezien, maar er is weinig bekend over toen opgetreden schade aan de grasmat. Langs de IJssel is wel (regelmatig) schade door afkalving en een aanvaring met een schip opgetreden.

Omgang met schades en inzet noodmaatregelen

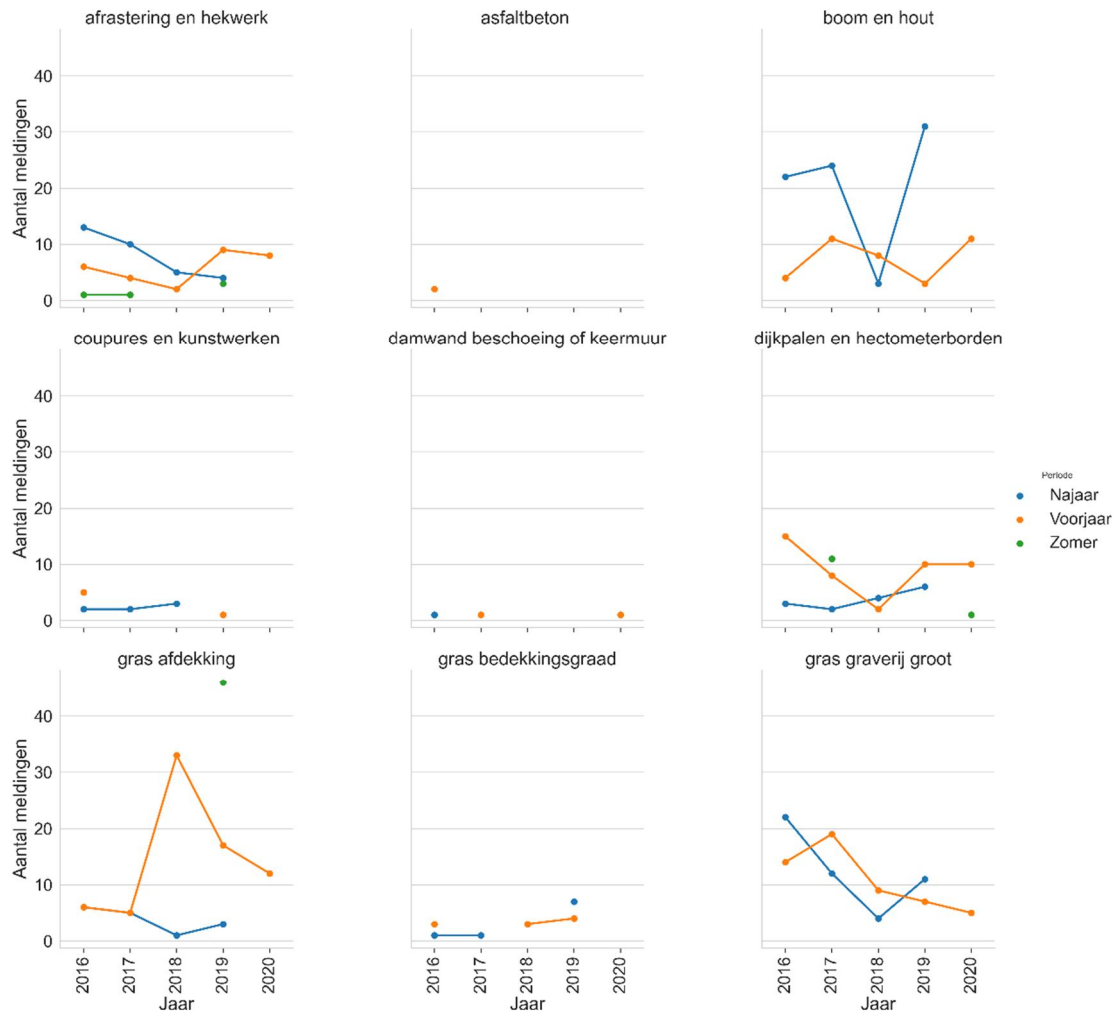
Een belangrijk onderdeel bij WDOD zijn periodieke evaluaties van het beheer & onderhoud ihkv de PDCA-cyclus. Er worden ook stappen gezet naar het ontsluiten van risico-informatie met dashboards voor tijdens noodsituaties en informatie over hoogwaterstanden om zo goede beheersmaatregelen te kunnen treffen. Hierbij is veel aandacht voor het treffen van noodmaatregelen, met name bekrammingen. Wanneer een slechte plek in de grasmat wordt gezien bij een inspectie wordt dit aangegeven en wordt er ook bepaald hoeveel capaciteit (materieel & tijd) nodig is om de bekramming aan te brengen. Zo wordt eigenlijk bij elke schade afgewogen of hiervoor iets in het calamiteitenplan moet worden opgenomen. Dit is een duidelijk voorbeeld van het risicogestuurd inzetten van noodmaatregelen en daarmee een belangrijke pijler in het totaal van maatregelen om aan de overstromingskansen langs de Vecht te voldoen.

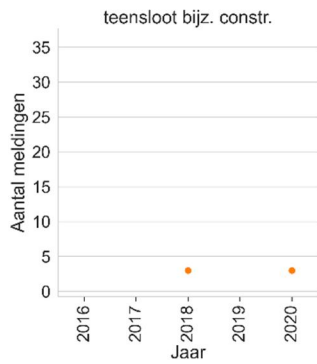
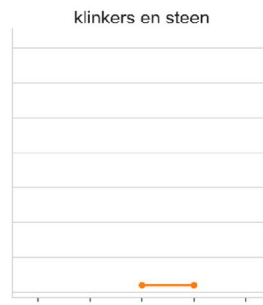
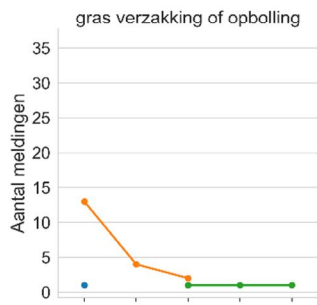
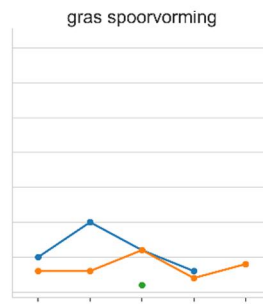
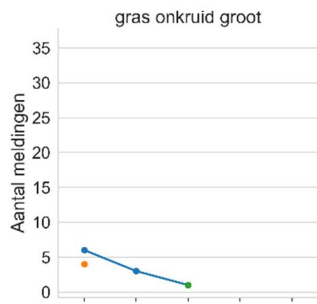
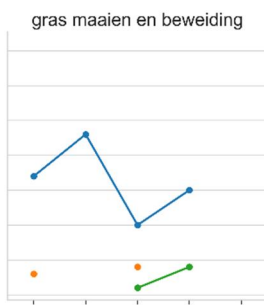
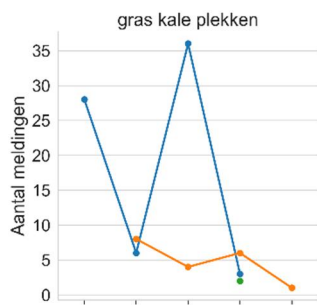
In het verleden werden bekrammingen aangebracht door normaal worteldoek met pinnen vast te slaan en te stabiliseren met zandzakken. Dat was arbeidsintensief en relatief zwaar werk. Tegenwoordig wordt gebruik gemaakt van Tensar doeken, een product ook gebruikt bij wegfunderingen. De ervaringen hiermee zijn zeer goed, het is licht materiaal, eenvoudig uit te rollen en het hoeft enkel vastgepind te worden. Bij Deventer heeft een winter een dergelijke doek gelegen en het gras eronder was daarna langer dan ernaast: klaarblijkelijk is het gebruikelijke nadeel dat gras onder een bekramming afsterft niet van toepassing op Tensardoeken. Over de sterkte van Tensardoeken bij golfbelasting is weinig bekend. Wanneer Tensardoeken een belangrijk onderdeel zijn van de noodmaatregelen om gevolgen van een slechte grasmat te beperken kan dit een belangrijke onzekere factor worden.

Een meer permanente oplossing zou kunnen zijn om bentonietmatten aan te brengen onder de grasmat. Vraag is nog wel of en hoe dit kan worden aangetast door gravers.

B Frequentie van voorkomen verschillende schadeparameters

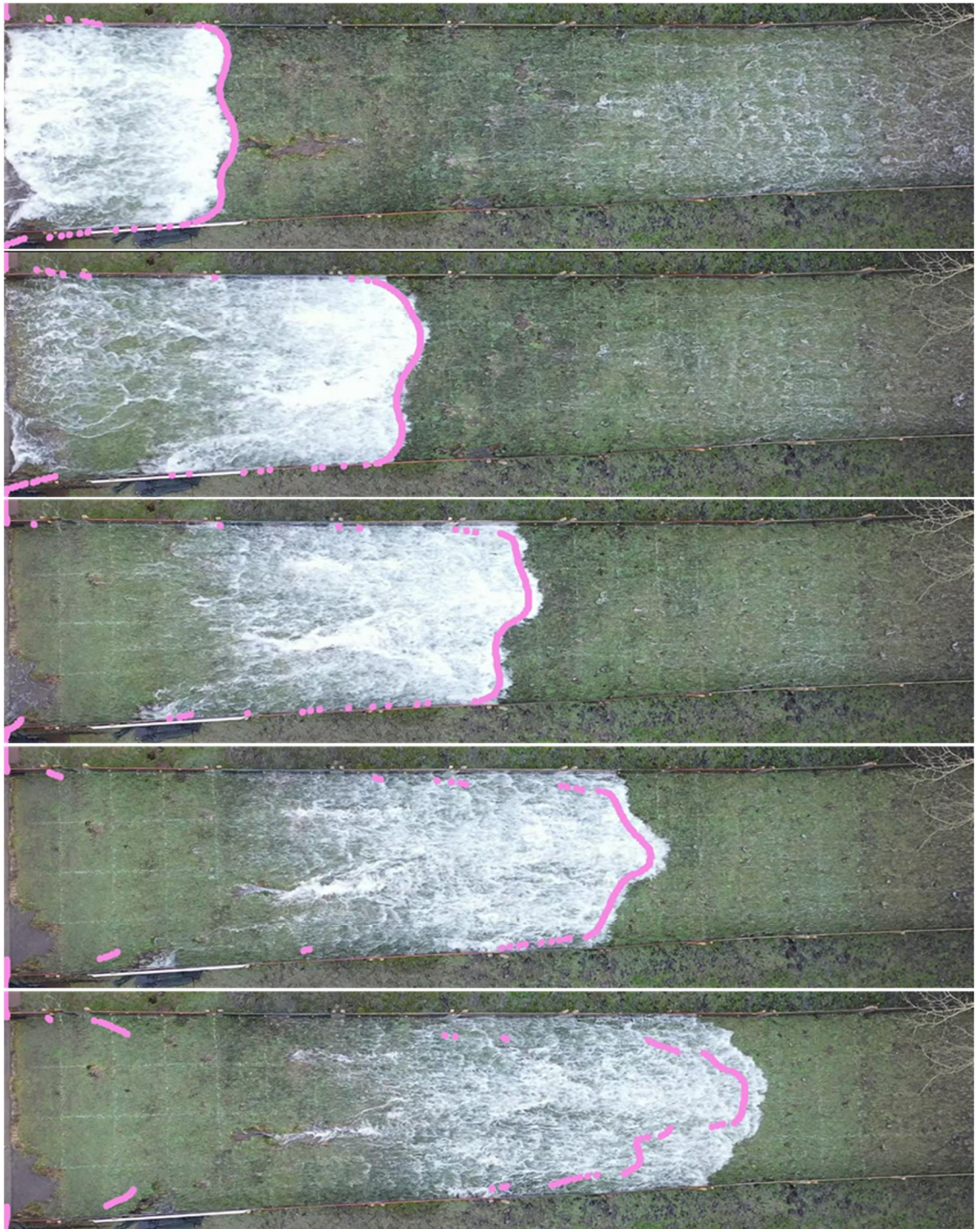
In onderstaande figuren is voor iedere schadeparameter het aantal meldingen per jaar en per periode weergegeven. Najaar is hierbij tot 1 juni, zomer van 1 juni – 1 september, najaar na 1 september.





D Meting frontsnelheden met beeldherkenning

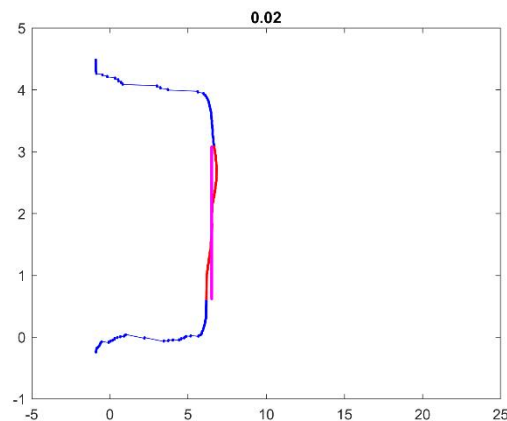
Door Van der Meer Consulting zijn drone beelden aangeleverd waarop de teststrook bij een golfverslagproef bij Zwolle Olst is te zien gedurende het loslaten van 15 golfvolumes. Met behulp van beeldherkenning en machine learning kunnen de fronten worden gevolgd. Voor de achtergrond wordt verwezen naar [11] (zie referenties in hoofdrapport). Een voorbeeld van het volgen van het front wordt gegeven in de onderstaande Figuur D.1.



Figuur D.1 Voorbeeld volgen front overslaand golfvolume

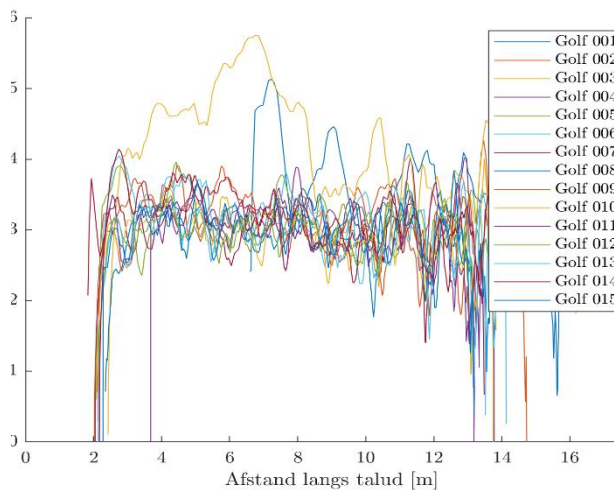
De methode heeft op de kruin van de dijk, bij de linkerkant van het beeld en bij de teen van de dijk moeite om het front te volgen. Hier is nog een optimalisatieslag nodig. De drone hangt niet volstrekt stil en referenties op het taludoppervlak zouden verbeterd kunnen worden. Dit zou de nauwkeurigheid kunnen verbeteren.

Zoals te zien in het voorbeeld is de vorm van het front grillig. Voor de karakterisering van de frontsnelheid is in dit geval gekozen voor een middeling, zoals aangegeven in Figuur D.2. Vanwege randeffecten wordt alleen het middelste deel van het front beschouwd, van de punten in dit middendeel wordt een gemiddelde genomen. De procedure van middeling kan eenvoudig worden aangepast als dat nodig wordt geacht.



Figuur D.2 Middeling van de frontgeometrie (blauwe lijn), beschouwde fontdeel (rode lijn) tot gemiddeld front (roze lijn).

Het resultaat in termen van frontsnelheden voor de 15 golven staat in Figuur D.3.



Figuur D.3 Overzicht frontsnelheid (m/s) tegen afstand langs het talud voor 15 golfvolumes.

Het doel van deze bijlage is om de methode en resultaten inzichtelijk te maken, zodat deze in de projectgroep kunnen worden besproken en kan worden besloten of, en indien zo, hoe hiermee verder kan worden gegaan. Belangrijk daarbij is of de methode voldoende nauwkeurig en betrouwbaar is om het meten van de frontsnelheid op een aparte teststrook te laten vervallen ten gunst van extra tijd voor erosieproeven.

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