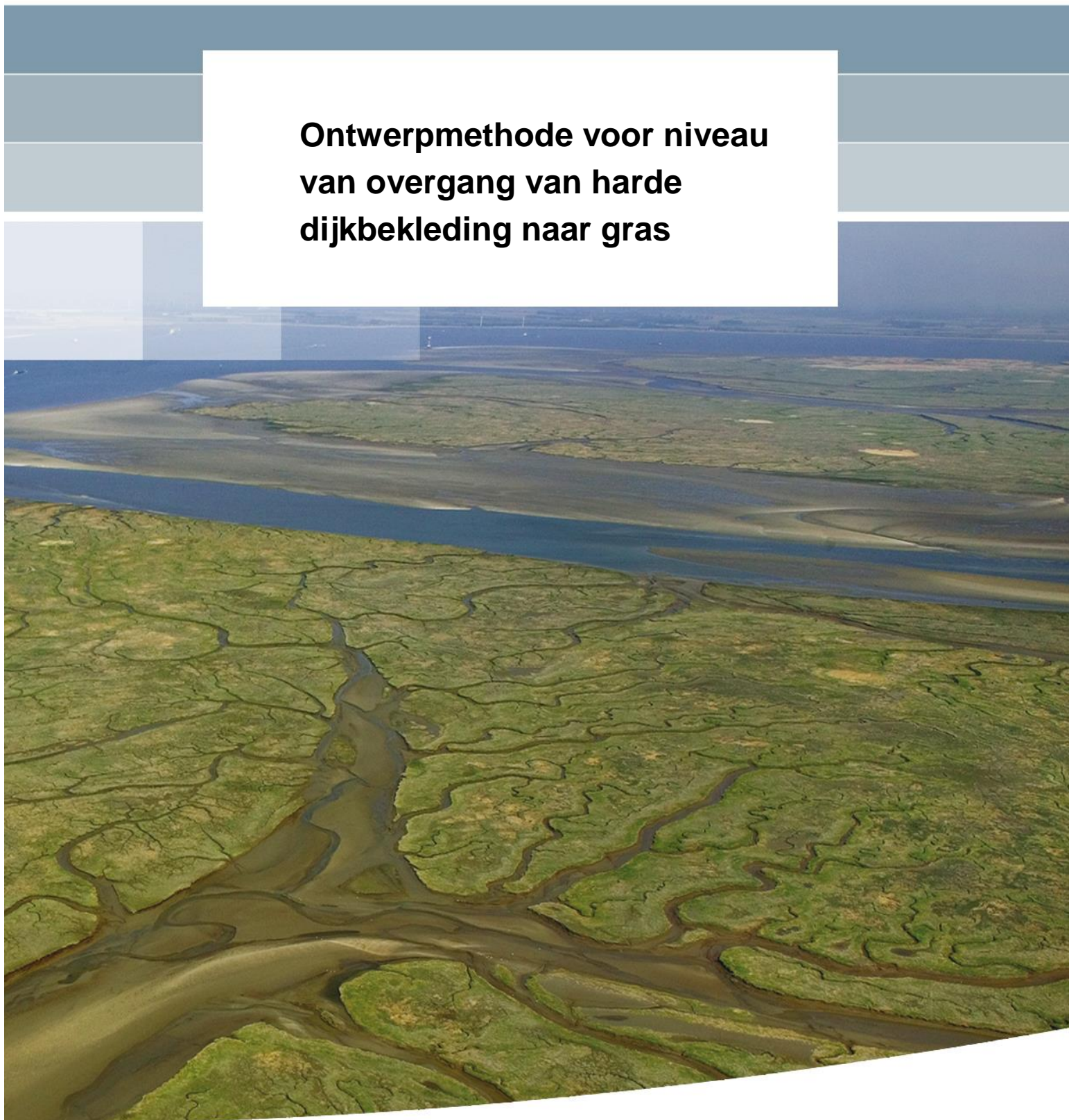


**Ontwerpmethode voor niveau
van overgang van harde
dijkbekleding naar gras**



Ontwerpmethode voor niveau van overgang van harde dijkbekleding naar gras

10.2.e



1221197-000

Titel

Ontwerpmethode voor niveau van overgang van harde dijkbekleding naar gras

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat, WVL	1221197-000	1221197-000-HYE-0015	121

Trefwoorden

Dijkbekleding, gras, probabilistische berekeningen

Samenvatting

In dit project is een semi-probabilistische ontwerpmethode afgeleid voor het niveau van de overgang tussen de harde bekleding en gras op primaire waterkeringen. Het niveau van deze overgang op het talud moet dusdanig zijn dat de kans op schade tijdens extreme omstandigheden acceptabel klein is.

De ontwerpmethode is afgeleid uit de resultaten van probabilistische berekeningen voor 23 cases. Er is gekozen voor cases op uiteenlopende locaties:

- zeedijken: Eemshaven – Delfzijl, Lauwersmeerdijk, Harlingen, Ossensisse, Vlissingen
- meerdijken: Urk, Edam, Enkhuizen

De hydraulische randvoorwaarden zijn ontleend aan Hydra-K (kustlocaties) en Hydra-Zoet (meren), maar verder zijn het fictieve cases. In alle gevallen is er gerekend met loodrechte golfaanval en een talud van 1:4 zonder berm. Gezien de wijze waarop het resultaat tot stand gekomen is, is het naar alle waarschijnlijkheid ook toepasbaar op andere taludhellingen en situaties met scheve golfaanval en wellicht ook op taluds met een berm.

Het project heeft geresulteerd in een semi-probabilistische rekenmethode waarmee het niveau van de grens tussen de harde bekleding en het gras kan worden berekend op basis van de hydraulische randvoorwaarden uit Hydra-K of Hydra-Zoet.

Opgemerkt moet worden dat in oktober 2016 de beoordelingsmethode van gras in de oploopzone is aangepast. Sindsdien moet de golfoploop met de randvoorwaarden bij een overschrijdingskans P_T beschouwd worden (met aangepast veiligheidsfactoren) in plaats van P_{max} . Deze wijziging is in dit rapport nog niet doorgevoerd.

Summary

This project is about the required level of the transition from a hard revetment (like blocks or asphalt) to grass. The level should be such that the probability of damage to the grass during an extreme storm is sufficiently low. A semi-probabilistic calculation method has been derived, based on full probabilistic calculations.

The design method has been derived from results of probabilistic calculations for 23 cases:

- Sea dikes: Eemshaven – Delfzijl, Lauwersmeerdijk, Harlingen, Ossensisse, Vlissingen
- Dikes along lakes: Urk, Edam, Enkhuizen

All cases were fictitious, although the hydraulic boundary conditions were based on calculations with Hydra-K (coastal areas) and Hydra-Zoet (lakes) for the specific locations. The calculations have been carried out with perpendicular wave attack on a slope of 1:4 without a berm.

Based on the physical background of the derived design method it was concluded that the method is probably also valid for other slope angles and oblique wave attack. It could even be valid for slopes with a berm.

Note that the method for the safety assessment of grass in the run-up zone recently has changed. Now the assessment must be carried out with the hydraulic conditions with

Titel

Ontwerpmethode voor niveau van overgang van harde dijkbekleding naar gras

Opdrachtgever Rijkswaterstaat, WVL	Project 1221197-000	Kenmerk 1221197-000-HYE-0015	Pagina's 121
--	-------------------------------	--	------------------------

exceedence probability P_T and adjusted safety factors. This has not yet been included in this report.

Referenties

Zeedijken:

- Opdrachtdatum: 15-10-2015
- Bestelnummer: 4500242908
- Zaaknummer: 31110012

Meerdijken:

- KPP project 1230090.012, BOA Waterkeren & Implementatie Nieuwe Normering 2016

Contactpersoon opdrachtgever: 10.2.e

Versie	Datum
1	feb. 2016
2	apr. 2016
3	aug. 2016
5	feb. 2016

10.2.e

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Aanpak	5
2.1 Sterkte	6
2.2 Hydraulische belasting	7
2.3 Probabilistische berekeningen	10
2.3.1 Inleiding	10
2.3.2 Probabilistische berekeningen met de Monte Carlo methode	12
2.3.3 Toelaatbare faalkans	14
2.3.4 Cases	15
3 Hydraulische randvoorwaarden zeedijken	17
3.1 Algemeen	17
3.2 Beschouwde locaties en herhalingstijden	17
3.3 Afleiding tijdreeksen gegeven trekking van piekwaterstand en afwijking u_{10}	17
3.4 Hydraulische randvoorwaarden per faalmechanisme	20
4 Resultaten probabilistische berekeningen voor zeedijken	23
4.1 Hydraulische randvoorwaarden voor de doorgerkende cases	23
4.2 Faalkans van de grasbekleding	26
5 Afleiding ontwerpmethodologie voor zeedijken	31
5.1 Criteria uit de literatuur	31
5.1.1 Handboek Dimensioneren van Gezette Taludbekledingen	31
5.1.2 Technisch Rapport Steenzettingen	33
5.1.3 Ontwerpinstrumentarium OI-2014v3	36
5.1.4 Voorlopige beoordelingsmethode voor WBI-2017	38
5.2 Afleiding ontwerpmethodologie	40
5.2.1 Inleiding	40
5.2.2 Afleiding semi-probabilistische rekenmethode	40
5.2.3 Veiligheidsmarge	44
6 Uitbreiding ontwerpmethodologie voor toepassing op meerdijken	47
6.1 Hydraulische randvoorwaarden	47
6.1.1 Algemeen	47
6.1.2 Beschouwde locaties en herhalingstijden	47
6.1.3 Afleiding tijdreeksen op basis van statistiek van waterstand en windrichting	48
6.1.4 Afleiding tijdreeksen op basis van marginale statistiek van waterstand en golven	49
6.1.5 Hydraulische randvoorwaarden per faalmechanisme	51
6.2 Resultaten van probabilistische berekeningen	52
6.2.1 Probabilistische berekeningen op basis van getrokken waterstand en windrichting	53
6.2.2 Probabilistische berekeningen op basis van marginale statistiek van waterstand en golfhoogte	57
6.3 Ontwerpmethodologie voor meerdijken	59

7 Conclusies	65
8 Referenties	69
Bijlage(n)	
A Gebruikte formules en parameters voor de sterkteberekeningen	A-1
A.1 Golfklapmechanisme	A-1
A.2 Golfoploopmechanisme	A-3
A.3 Golfoverslagformules voor probabilistische berekeningen	A-5
A.4 Parameters in de probabilistische berekeningen	A-5
B Theoretisch raamwerk	B-1
B.1 Faalmechanismebeschrijving: golfklap en golfoploop	B-1
B.2 Betrouwbaarheidseis	B-2
B.3 Probabilistische analyse	B-4
B.4 Eerste aanknopingspunten voor het semi-probabilistische ontwerp	B-7
C Importance sampling for Monte Carlo simulations	C-1
D Figuren	D-1
D.1 Eemshaven – Delfzijl	D-1
D.2 Harlingen	D-6
D.3 Lauwersmeerdijk	D-10
D.4 Ossensisse	D-13
D.5 Vlissingen	D-16
D.6 Urk	D-17
D.7 Edam op basis van trekking van waterstand en windrichting	D-19
D.8 Edam op basis van marginale statistiek van waterstand en golfhoogte	D-21
D.9 Enkhuizen op basis van trekking van waterstand en windrichting	D-22
D.10 Enkhuizen op basis van marginale statistiek van waterstand en golfhoogte	D-24
E Werkwijze in voorgestelde rekenmethode	E-1
E.1 Stap 1: overschrijdingskansen bepalen	E-1
E.2 Stap 2: hydraulische randvoorwaarden bij P_{\max} en P_T	E-1
E.3 Stap 3: controle of gras voldoet ten aanzien van het golfklapmechanisme bij hydraulische randvoorwaarden bij P_T	E-2
E.4 Stap 4: berekening minimale hoogte van overgang van harde bekledingen naar gras	E-2
E.5 Stap 5: Controle voor belastingen bij lagere waterstanden dan die bij P_{\max}	E-3
F Probabilistische berekeningen op basis van de statistiek van het HBN	F-1
G Voorbeeldberekening	G-1

Symbolenlijst

a, b, c	= parameters afhankelijk van de graskwaliteit
C_d	= correctiefactor voor het zandgehalte van de klei (-)
C_u	= coëfficiënt voor golfoploopsnelheid (= 1,1) (-)
D	= cumulatieve overbelasting (schade aan het gras) (m^2/s^2)
d_c	= dikte van de kleilaag (m)
f()	= werkelijke overschrijdingsverdeling van h_{max}
$F_{f,storm,j}$	= failure fraction voor gras op niveau j voor de gehele storm (-)
F_{zand}	= zandgehalte in de klei (-)
g	= versnelling als gevolg van de zwaartekracht (m/s^2)
h	= waterstand ten opzichte van NAP (m)
h()	= in de simulatie toegepaste overschrijdingsverdeling van h_{max}
h_{HBN}	= waterstand voor het ontwerpen van de kruinhoogte van de dijk (HBN) (m+NAP)
h_k	= kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
h_{Pmax}	= waterstand met overschrijdingskans gelijk aan maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (P_{max}) (m+NAP)
h_{PT}	= waterstand met overschrijdingskans gelijk aan P_T (m+NAP)
h_{top}	= maximale waterstand in de storm (m+NAP)
H_{m0}	= significante golfhoogte, bepaald uit het spectrum, bij de teen van de dijk (m)
m	= modelfactor met normale verdeling (-)
P_{HBN}	= faalkans die wordt gehanteerd voor het berekenen van het belastingsniveau voor het dimensioneren van de kruinhoogte (/jaar)
P_{Max}	= maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (/jaar)
P_T	= maximaal toelaatbare faalkans van graserosie in de beschouwde doorsnede (/jaar)
P_S	= signaalwaarde van de normfaalkans op trajectniveau (/jaar)
p	= overschrijdingskans van de golf in het golfveld (-)
q	= gemiddelde golfoverslagdebiet ($m^3/m/s$)
S_{om}	= $H_{m0}/(gT_{m-1,0}^2/(2\pi))$ = golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$ (-)
$t_{RS,gras}$	= Reststerkte van het gras (uur)
$t_{RS,gras}$	= reststerkte bij de belasting in de tijdstap (hr)
t_{schade}	= duur tot falen van het gras (uur)
t_{schade}	= tijdsduur (sterkte) tot initiële schade gras bij de belasting in de tijdstap (hr)
t_{stap}	= stapgrootte waarmee de storm doorlopen wordt (hr)
T, T_1, T_2	= herhalingstijd
$T_{m-1,0}$	= spectrale golfperiode (-)
T_p	= golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
U_{10}	= windsnelheid op een hoogte van 10 m boven vlak terrein (m/s)
U_i	= watersnelheid in het front van de golfloop van golf i (m/s)
U_c	= kritieke watersnelheid, waarboven schade begint (sterkteparameter van de gras-zode) (m/s)
w	= wegingsfactor
X_1	= waarde bij herhalingstijd T_1
X_2	= waarde bij herhalingstijd T_2
X_T	= waarde bij herhalingstijd T
$Z_{overgang}$	= niveau vanaf waar gras kan worden toegepast op het buitentalud (m+NAP)
$Z_{oploop,Pmax}$	= niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de formules voor het golfoploop-mechanisme bij golfcondities met overschrijdingskans P_{max} (m+NAP)
Z_{oploop}	= niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de formules voor het golfoploop-mechanisme bij golfcondities met overschrijdingskans P_{max} (m+NAP)

- Z_p = golfploophoogte van golf i op een glad talud ten opzichte van de stilwaterlijn die door $p\%$ van de golven wordt overschreden (m).
- $Z_{voldoet}$ = niveau vanaf waar de faalkans kleiner is dan P_T volgens de probabilistische berekeningen (m+NAP)
- $Z_{2\%}$ = golfploophoogte op een glad talud ten opzichte van de stilwaterlijn die door 2% van de golven wordt overschreden (m).
-
- α = taludhelling ($^\circ$)
- α_M = invloedsfactor voor overgangsconstructies (lokale belastingverhoging) (-)
- α_S = invloedsfactor voor overgangsconstructies (lokale sterkteverlaging) (-)
- γ_f = ruwheidscoëfficiënt (= 1 in dit geval) (-)
- γ_b = factor voor de invloed van een berm (= 1 in dit geval) (-)
- γ_β = factor voor de invloed van de hoek van golfinval (= 1 in dit geval) (-)
- ξ_{om} = $\tan\alpha/\sqrt{s_{om}}$ = brekerparameter (-)
- θ = windrichting ($^\circ$)

1 Inleiding

Bij het ontwerpen van nieuwe bekledingen van dijken is het nodig om de benodigde hoogte van de overgang tussen de harde dijkbekleding en gras te bepalen. De oude rekenmethode voor het bepalen van dit niveau sluit echter niet meer aan op de huidige werkwijze in de overstromingskansbenadering. De oude rekenmethode gaat uit van stabiliteitsberekeningen met een storm die als hoogste waterstand het ontwerppeil heeft. Waterstanden boven het ontwerppeil worden niet beschouwd.

Doordat er gewerkt werd met één vooraf vastgesteld ontwerppeil, met bijbehorende golfcondities, was er sprake van een duidelijke grens tussen de golfklapzone (onder het ontwerppeil) en de golfploopzone (boven het ontwerppeil). Dit sluit echter niet aan op het huidige werken met faalkansen. Hierbij is er geen harde grens tussen de golfklapzone en de golfploopzone, omdat er altijd een kans is op een iets hogere of iets lagere waterstand, waarmee direct ook deze zones verschuiven.

Getracht is het probleem op te lossen met een rekenrecept dat opgenomen is in het Ontwerpinstrumentarium OI-2014v3. Dit blijkt echter in de praktijk vrij conservatief uit te pakken.

Het doel van het huidige project is om een adequate methode op te stellen voor het OI-2014v4, en een aanbeveling voor het Wettelijk Beoordelingsinstrument WBI-2017. In eerste instantie is dit uitgevoerd voor zeedijken zonder berm en vervolgens is het uitgebreid richting meerdijken. In een vervolgproject kan dit verder uitgebreid worden naar rivierdijken en naar dijken met een berm.



Figuur 1.1 Gras op waterkering langs Westerschelde

In het kader van het project WBI-2017 is een nieuwe beoordelingsmethode opgesteld voor gras, die nu ook gebruikt is voor het berekenen van de benodigde hoogte van de overgang van een harde bekleding naar gras. Voor het buitentalud is dit een semi-probabilistische beoordelingsmethode, die gekalibreerd is met probabilistische berekeningen, zodat het semi-probabilistische recept uitkomt op de juiste faalkans. Deze semi-probabilistische beoordelingsmethode laat zien dat er niet op de traditionele manier gewerkt kan worden met een golfklapzone en een golfploopzone. Voor elk deel van het buitentalud is er een kans dat het

in een storm in de golfklapzone zit en een kans dat het alleen in de golfoploopzone zit. Daarom is het nodig om probabilistische berekeningen uit te voeren, omdat daarmee goed rekening gehouden kan worden met de kans dat een bepaalde strook gras belast wordt door golfklappen of alleen door golfoploop. Deze probabilistische berekeningen zijn in het huidige project gebruikt als basis voor het afleiden van een praktisch bruikbare rekenregel (semi-probabilistische rekenmethode) waarmee in de praktijk gemakkelijk het benodigde niveau van de overgang van een harde bekleding naar gras kan worden berekend.

Een semi-probabilistische methode werkt met veiligheidsfactoren die zijn afgeleid van probabilistische berekeningen. Met deze veiligheidsfactoren is de rekenmethode zodanig gecorrigeerd dat het ontwerpen hiermee leidt tot constructies met een acceptabel kleine faalkans.

De afgeleide ontwerpmethode is erop gericht dat de faalkans van het gras op het buitentalud voldoet aan de norm. Dat maakt dat alleen de sterkte en belasting van het gras beschouwd wordt en de stabiliteit van de harde bekleding buiten beschouwing kan blijven.

Opgemerkt wordt dat de gehanteerde methodiek van dit project in principe ook hanteerbaar is voor het ontwikkelen van een ontwerpmethode voor het niveau vanaf waar een steenzetting dunner kan worden uitgevoerd.

Voor het theoretische raamwerk van deze problematiek wordt verwezen naar bijlage B.

Dit project is uitgevoerd in het kader van de ontwikkeling van het ontwerpinstrumentarium OI-2014 in opdracht van Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS-WVL). De resultaten zijn afgestemd op de ontwikkelingen bij het Wettelijk Beoordelingsinstrument WBI-2017 dat ontwikkeld wordt voor de periodieke wettelijke beoordeling van primaire waterkeringen in het kader van de Waterwet. Vooruitlopend op het huidige project is er in 2015 een voorlopige beoordelingsmethode opgesteld voor WBI-2017:

- Neem als grens tussen de golfklapzone en golfoploopzone het “toetspeil-plus-één-decimeringshoogte”.
- Bereken onder deze grens of het gras in staat is de golfklappen te weerstaan. Is dat zo, dan voldoet het gras op het gehele talud.
- Is dat niet zo, dan moet met het toetspeil en de daarbij behorende golven berekend worden vanaf welk niveau het gras in staat is de belasting door golfoploop te weerstaan (met een overschrijdingskans gelijk aan de norm). Dat niveau, eventueel met veiligheidsmarge, is bepalend voor het niveau vanaf waar het gras voldoet.

Bij het afleiden van de ontwerpmethode in het huidige project is de systematiek van deze voorlopige methode overgenomen, maar is dit aangescherpt op basis van probabilistische berekeningen.

Tijdens dit project is nauwgezet overleg geweest met WBI-2017, zodat in de huidige studie dezelfde rekenregels voor de faalmechanismen zijn toegepast (tot en met de wijzigingen in maart 2016). Er is afgesproken om de resultaten van dit project te gebruiken om na afloop een voorstel op te stellen voor een beoordelingsmethode. Dit voorstel zal worden voorgelegd aan de projectmanagementorganisatie (PMO) van WBI-2017. In oktober 2016 is nog een belangrijke wijziging in het beoordelen van gras in de oploopzone doorgevoerd. Vanaf dat moment wordt niet meer gerekend met de belasting bij de norm op trajectniveau, maar met de belasting bij de norm op doorsnedeniveau met aangepaste veiligheidsfactoren. Die wijziging is in dit rapport nog niet verwerkt.

Opgemerkt wordt dat de software, die toegepast is in het huidige project voor het uitvoeren van de probabilistische berekeningen, later ook gebruikt kan worden voor de 'Toets op Maat' in het kader van de eerste wettelijke beoordelingsronde vanaf 2017.

Dit rapport start met twee algemene hoofdstukken, namelijk deze inleiding en de aanpak in hoofdstuk 2. Vervolgens wordt de aandacht geconcentreerd op zeedijken, waarbij eerst de hydraulische randvoorwaarden worden beschreven (hoofdstuk 3), gevolgd door de resultaten van de probabilistische berekeningen (hoofdstuk 4) en ten slotte wordt een ontwerpmethode voor zeedijken afgeleid (hoofdstuk 5). In hoofdstuk 6 wordt de methode uitgebreid voor toepassing op meerdijken, op basis van vergelijkbare probabilistische berekeningen. In hoofdstuk 7 zijn de conclusies en aanbevelingen gegeven.

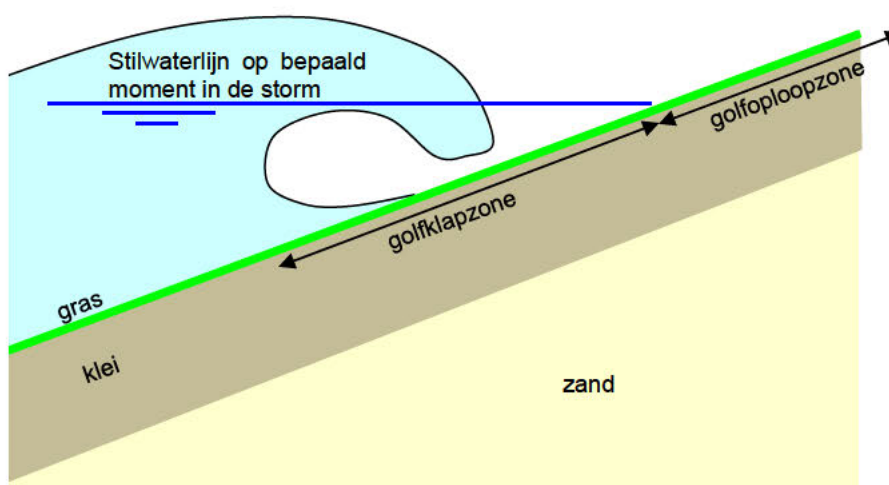
2 Aanpak

Als uitgangspunt voor de aanpak van dit project is gekozen voor de eis dat de kans van falen van de dijk door het falen van het gras kleiner moet zijn dan de faalkanseis. Het theoretische raamwerk hierbij is gegeven in bijlage B. Daar is vanuit de theorie redenerend het verloop van de faalkans van het gras als functie van de hoogte op het talud beschouwd, opgesplitst in het mechanisme als gevolg van golfklappen en het mechanisme als gevolg van golfoploop (zie Figuur 2.1).

In dit hoofdstuk is uitgewerkt hoe dit theoretische raamwerk kan worden toegepast voor concrete gevallen. Eerst wordt stilgestaan bij de beschikbare sterktemodellen en de hydraulische belasting en daarna wordt uiteengezet hoe met behulp van probabilistische berekeningen de faalkans van het gras als functie van de hoogte op het talud kan worden berekend.

De probabilistische berekeningen zijn nodig omdat zo de onzekerheid in zowel belasting als de sterkte van het gras mee te kunnen nemen. Daardoor is er voor elke strook gras op het talud een bepaalde kans dat deze belast wordt door golfoploop en is er een kans dat er een golfklapbelasting optreedt. Met probabilistische berekeningen kan goed rekening gehouden worden met deze kansen en wordt een zo nauwkeurig mogelijk resultaat verkregen. Dit resultaat is de hoogte vanaf waar gras kan worden toegepast op het dijktaalud, gegeven een normfaalkans.

Deze probabilistische berekeningen zijn in het huidige project gebruikt als basis voor het afleiden van een praktisch bruikbare rekenregel (semi-probabilistische rekenmethode) waarmee gemakkelijk het benodigde niveau van de overgang van een harde bekleding naar gras kan worden berekend. In de probabilistische berekeningen worden weliswaar alle onzekerheden op de juiste manier meegewogen, waardoor dit tot het beste resultaat leidt, maar de berekeningen zijn gecompliceerd. Daarom wordt voor de praktijk een eenvoudig toe te passen semi-probabilistische rekenmethode afgeleid (zie paragraaf 5.2).



Figuur 2.1 Golfklapzone en golfoploopzone op een bepaald moment in de storm.

2.1 Sterkte

Voor het beoordelen van gras op het buitentalud van dijken zijn twee rekenmodellen voor de sterkte beschikbaar:

- standduur bij belasting door golfklappen
- standduur bij belasting door golfoploop (cumulatieve overbelastingmethode)

Met deze rekenmodellen kan berekend worden hoe lang het gras standhoudt bij een gegeven belasting: de standduur. Het is oorspronkelijk ontwikkeld voor een constante waterstand en constante golfcondities, waarbij de golfklappen onder de waterlijn plaatsvinden en de golfoploop erboven. De rekenmethode is vervolgens toepasbaar gemaakt voor een variërende waterstand tijdens een storm waarbij ook de golfcondities variëren.

De belangrijkste formules en parameters uit deze rekenmethodes voor de sterkte zijn gegeven in bijlage A.

Bij het beoordelen van bekledingen werd in het verleden onderscheid gemaakt tussen een zone van de dijk die bij maatgevende omstandigheden belast kan worden door golfklappen, en de zone daarboven die alleen door golfoploop wordt belast. Onder het ontwerppeil werd gesproken over de golfklapzone (onder de waterlijn) en daarboven over de golfoploopzone (boven de waterlijn).



Figuur 2.2 Zeedyk bij Den Helder

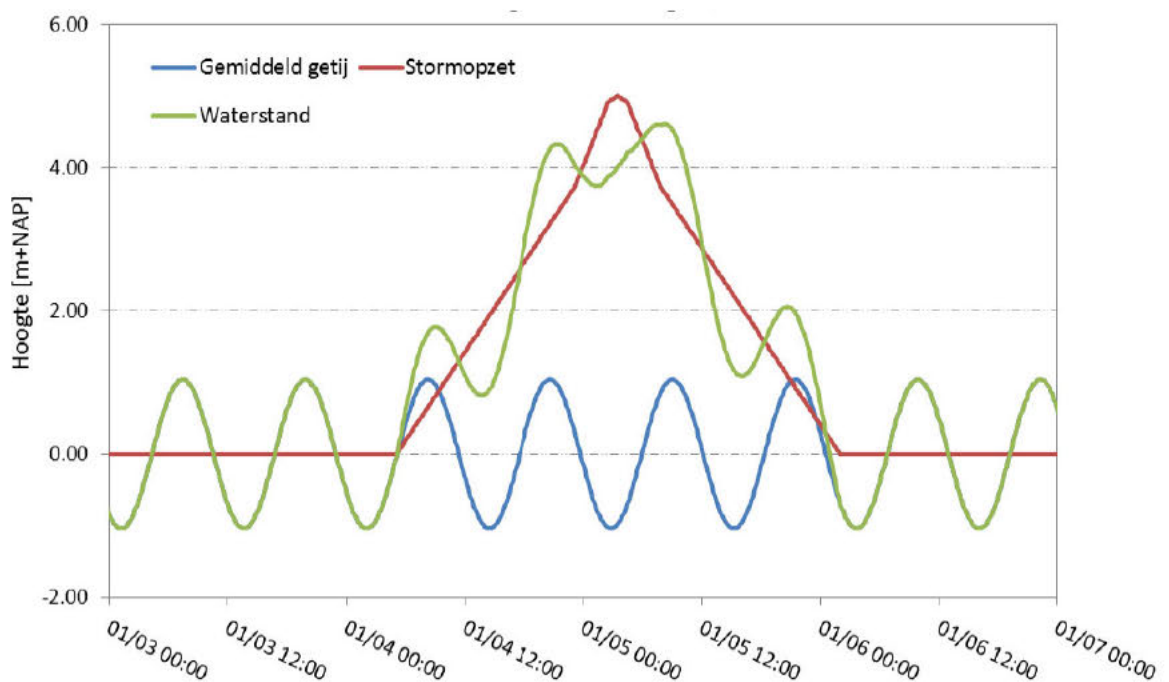
In werkelijkheid is er bij elke stormgebeurtenis een zone waar vooral de belasting door golfklappen relevant is (normaliter het lagere deel van het talud), en een zone waar vooral de belasting door golfoploop relevant is (normaliter het hogere deel van het talud). Omdat er verschillende stormgebeurtenissen mogelijk zijn, is het verstandig om in kanstermen te spreken over de zones waar vooral de golfklappen en waar vooral de golfoplopen relevant zijn. Daarom wordt er in het vervolg niet meer gesproken over golfklap- en golfoploopzone, maar van het golfklapmechanisme en het golfoploopmechanisme. Een bepaald punt op de dijk kan tijdens de ene storm uitsluitend te maken hebben met het golfoploopmechanisme (omdat het gedurende de gehele storm boven de waterlijn ligt), maar bij een zwaardere storm tijdelijk te maken hebben met het golfklapmechanisme.

Voor het beoordeling van het buitentalud is ook het golfoverslagdebiet relevant. Als namelijk de waterstand en golfcondities zo hoog zijn dat de dijk faalt door golfoverslag (kruin en/of binnentalud faalt), dan is het niet meer relevant of het buitentalud stabiel is of niet. In dit project wordt gesteld dat wanneer de kruin en/of het binnentalud faalt, het buitentalud per definitie niet faalt (zie ook bijlage B).

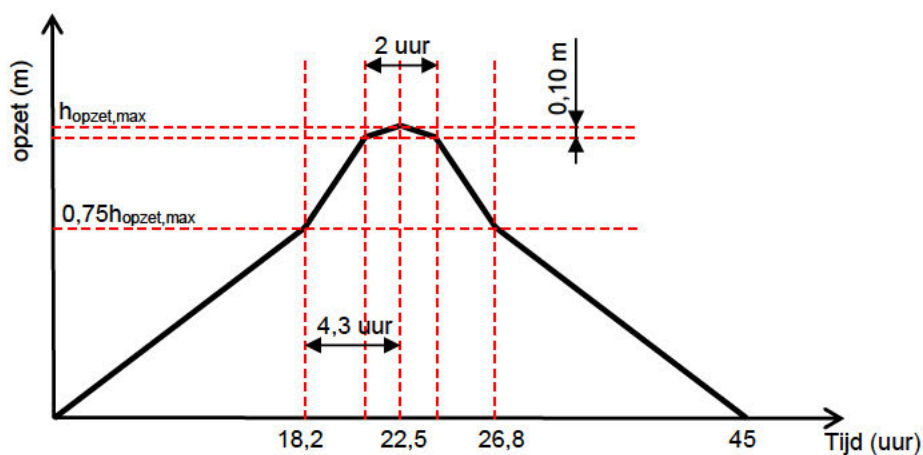
De formules voor het beoordelen van de kruin en het binnentalud zijn ook gegeven in bijlage A.

2.2 Hydraulische belasting

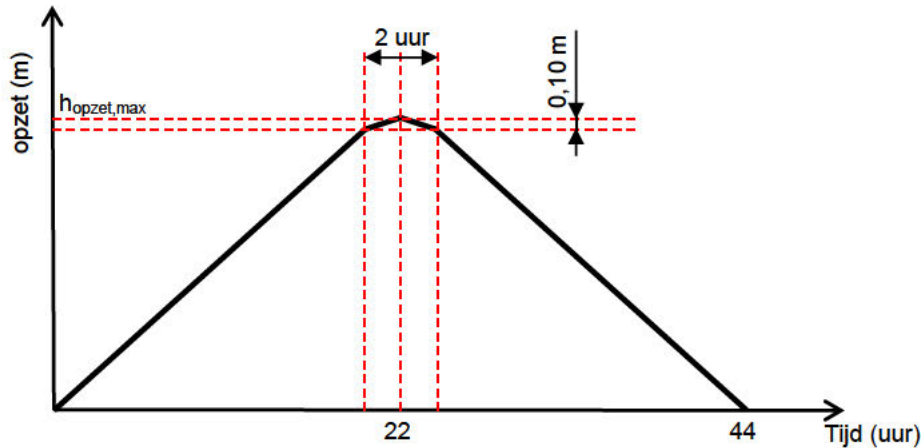
De belasting wordt bepaald door de optredende waterstanden en golfcondities. Daarbij is ook het verloop hiervan tijdens de storm relevant, omdat het al dan niet falen van het gras ook bepaald wordt door de belastingduur. In Figuur 2.3 is een voorbeeld gegeven van het standaard waterstandsverloop voor zeedijkten dat gehanteerd gaat worden in het WBI-2017 (Chbab 2015).



Figuur 2.3 Voorbeeld van waterstandsverloop tijdens een extreme storm (Waddenzee)(Chbab 2015)



Figuur 2.4 Standaard stormopzet voor Waddengebied (Chbab 2015)



Figuur 2.5 Standaard stormopzet voor Westerschelde (Chbab 2015)

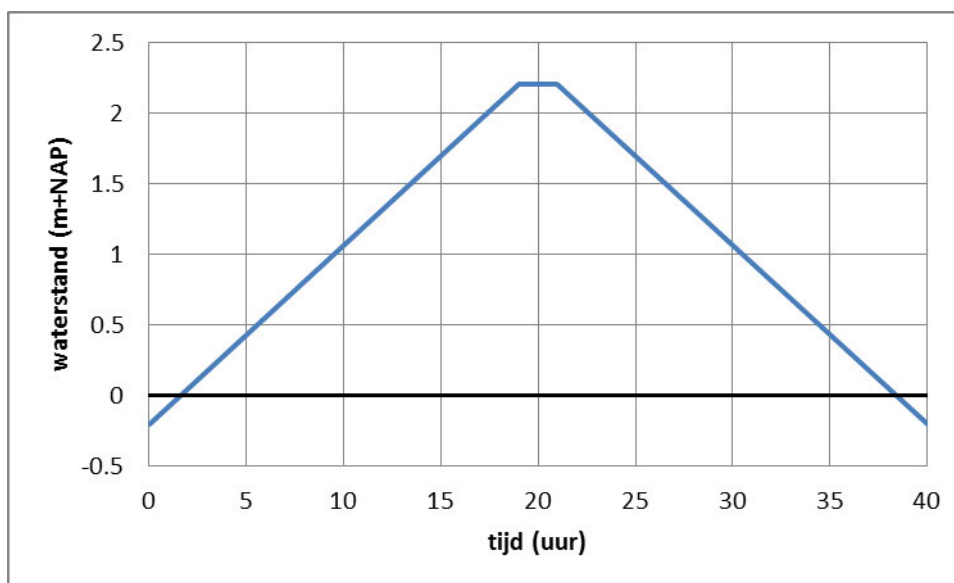
Het standaardverloop van de opzet is voor het waddengebied en de Westerschelde niet hetzelfde (Chbab, 2015), zie Figuur 2.4 en Figuur 2.5. Dit geldt ook voor het faseverschil tussen de top van de opzet en hoogwater:

- Waddengebied: hoogwater is 5,5 uur later dan de top van de opzet
- Westerschelde: hoogwater is 2,5 uur later dan de top van de opzet

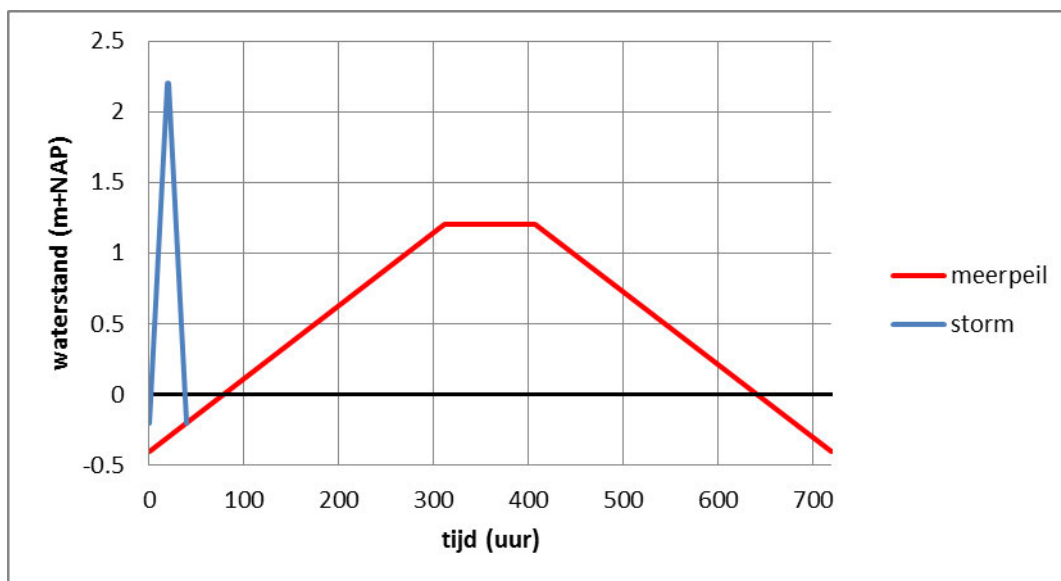
De maximale hoogte van de opzet, h_{max} , is in de berekeningen steeds zo aangepast dat de som van de opzet en het getij op het moment van de hoogste waterstand overeenkomt met de gewenste topwaterstand.

Op de meren wordt onderscheid gemaakt tussen het meerpeil (met variaties op een tijdschaal van orde tientallen dagen) en een tijdelijke verhoging of verlaging van de waterstand als gevolg van storm gedurende enkele tientallen uren. Het meerpeil wordt vooral bepaald door de neerslag, de mogelijkheden om te lozen op de Waddenzee en de aanvoer van water vanuit onder andere de IJssel. Een storm zorgt ervoor dat de waterspiegel van het meer scheef gaat staan, met een waterstandsverlaging aan de bovenwindse kant en een waterstandverhoging aan de benedenwindse kant. De waterstand kan onder extreme omstandigheden gedomineerd zijn door een verhoogd meerpeil (zonder storm) of door de windopzet bij storm (zonder verhoogd meerpeil) of een combinatie van beide. Voor de locaties aan de oostzijde van de meren is er meestal sprake van een storm gedomineerd waterstandsverloop. Voor deze locaties is het verloop gehanteerd dat gehanteerd gaat worden in het WBI-2017 (Chbab 2012), zie Figuur 2.6. Het verloop begint op $t = 0$ uur bij het dan aanwezige meerpeil, dat normaal in de winter op NAP-0,4 m ligt, maar door toeval wat hoger kan liggen. Het verloop eindigt ook weer op dit meerpeil op $t = 40$ uur.

Aan de westzijde van de meren wordt een extreem hoge waterstand meestal bereikt door een sterk verhoogd meerpeil, zonder storm. Voor zo'n meerpeilgedomineerde situatie wordt voor het beoordelen van de bekledingen hier gebruikgemaakt van een lineair oplopende en aflopende waterstand over 30 dagen met een top van vier dagen, zie Figuur 2.7. Dit is een van de scenario's die gegeven zijn door Chbab (2012).



Figuur 2.6 Stormgedomineerd waterstandsverloop op de meren



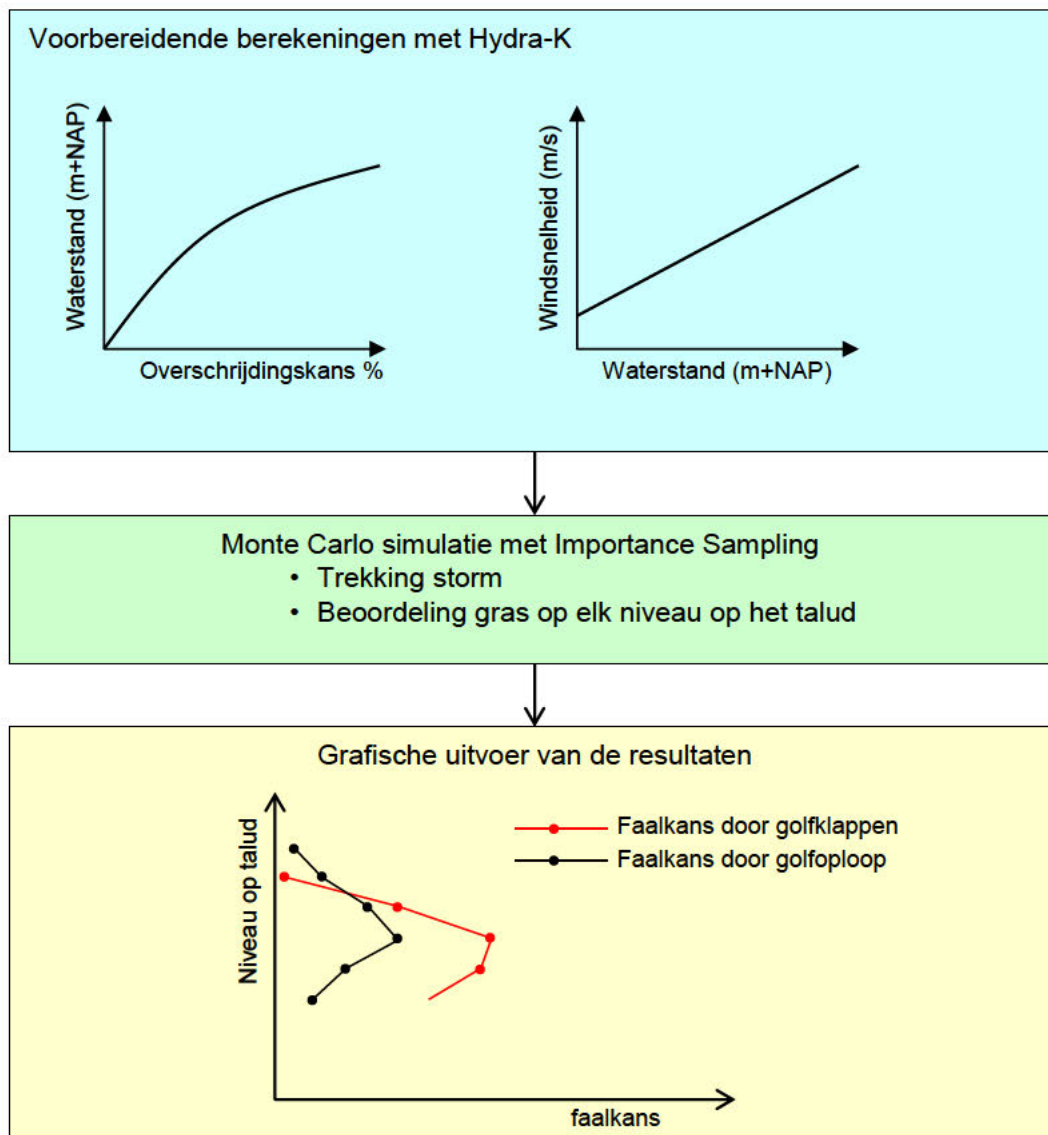
Figuur 2.7 Meerpeilgedomineerd waterstandsverloop op de meren met als vergelijk het stormgedomineerde waterstandsverloop

Voor het uitvoeren van de probabilistische berekeningen is statistische informatie nodig over de topwaterstand tijdens de storm, de bijbehorende golfcondities (significante golfhoogte H_{m0} , spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ en golfrichting θ) en het verloop van de golfcondities bij lagere waterstanden. Deze gegevens zijn voor een aantal voorbeeldlocaties voor de zeedijken berekend met Hydra-K. Dit is in detail beschreven in paragraaf 3.3. Voor de semi-probabilistische rekenmethode, die wordt afgeleid van de probabilistische berekeningen, zijn de hydraulische randvoorwaarden nodig bij specifieke overschrijdingskansen en diverse waterstanden. Dat is nader toegelicht in paragraaf 3.4. Voor de meerdijken is gebruik gemaakt van Hydra-Zoet (zie paragraaf 6.1).

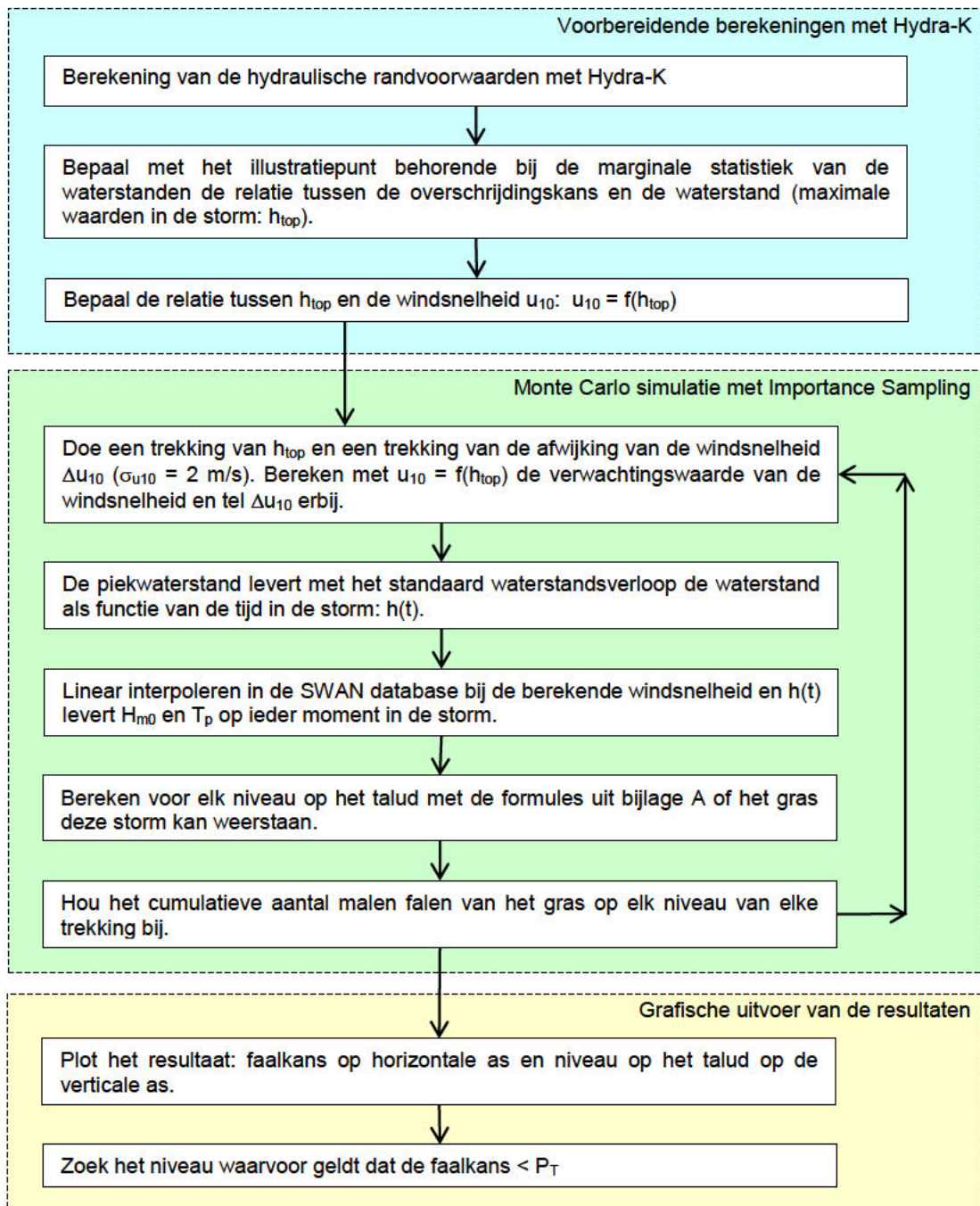
2.3 Probabilistische berekeningen

2.3.1 Inleiding

De overgang van een steenzetting naar gras moet zodanig hoog liggen dat de faalkans van het gras voldoet aan de criteria die voortvloeien uit de norm. Daarbij moeten alle waterstanden met hun kans van voorkomen en de bijbehorende golfcondities worden beschouwd. Een paar meter lagere waterstand dan het ontwerppeil komt weliswaar veel voor, maar de verwachting voor de meeste locaties is dat de bijbehorende golven een relatief lage belasting geven ter hoogte van de overgang. Bij een waterstand boven het ontwerppeil is de afstand tot de overgang relatief klein en is de verwachting dat de golven een grote belasting geven, maar de kans op zo'n hoge waterstand is klein.



Figuur 2.8 Globaal stroomschema van de probabilistische berekeningen (storm gedomineerde locaties)



Figuur 2.9 Gedetailleerd stroomschema van de probabilistische berekeningen

In een probabilistische berekening worden alle mogelijke hydraulische belastingen met hun kans van voorkomen meegewogen om de faalkans van het gras bij de overgang te bepalen. Zo kan de benodigde hoogte bepaald worden. Op basis van het probabilistisch doorrekenen van een aantal cases voor zeedijken is in paragraaf 5.2 een algemene richtlijn opgesteld voor het minimale niveau van deze overgang. De algemene opzet van deze probabilistische berekeningen is voor storm gedomineerde locaties globaal weergegeven in het stroomschema in Figuur 2.8 en in meer detail in Figuur 2.9. In onderstaande paragrafen is dit nader toegelicht.

2.3.2 Probabilistische berekeningen met de Monte Carlo methode

Voor het uitvoeren van de probabilistische berekeningen is gekozen voor de Monte Carlo methode. Deze methode werkt als volgt:

- 1 Voor elke stochastische variabele wordt een aselechte trekking uitgevoerd. Dit levert een specifieke realisatie van de sterkte en de belasting (topwaterstand van de storm en golfcondities).
- 2 Met behulp van de ontwerpmethode wordt voor deze specifieke situatie berekend of er falen optreedt of niet.

Deze twee stappen worden bij Crude Monte Carlo miljoenen keren herhaald en wordt bijgehouden hoe vaak de bekleding faalt en hoe vaak niet. Het quotiënt tussen deze twee is de faalkans.

Het voordeel van deze methode ten opzichte van bijvoorbeeld de FORM-methode (First Order Reliability Method) is de grote nauwkeurigheid en transparantie van de rekenmethode. De methode stelt geen eisen aan de vorm van de Z-functie, in tegenstelling de FORM-methode, en werkt daardoor altijd probleemloos.

Bovendien kan er eenvoudig inzicht verkregen worden in de resultaten door een aantal gevallen waarbij bijna falen is opgetreden te vergelijken met die waarbij net wel falen is opgetreden. Specifieke stormen, bijvoorbeeld de stormen die belangrijk bijdragen aan het falen, kunnen uitgelicht worden en tot in detail geanalyseerd worden.

Het nadeel is de grote rekentijd, met name omdat bij gevallen met kleine faalkansen er zeer veel trekkingen moeten worden gedaan om voldoende faalgevallen te krijgen voor een betrouwbaar resultaat.



Figuur 2.10 Zeedijk tussen Eemshaven en Delfzijl (km 31,5, voor de renovatie)

De rekentijd kan enorm verminderd worden door toepassing van Importance Sampling. Op voorhand is namelijk al in te schatten dat falen waarschijnlijk niet optreedt bij relatief lage waterstanden met lage golven. Door bij de sampling van realisaties dit gebied uit te sluiten, kan er veel rekentijd bespaard worden.

De methode van Importance Sampling is hier gebruikt voor de topwaterstand in de storm, h_{\max} . In de Crude Monte Carlo methode wordt de verdelingsfunctie van h_{\max} gebruikt om samples te trekken. In plaats daarvan wordt bij Importance Sampling een andere verdelingsfunctie gebruikt waarin de kans dat een hogere waarde van h_{\max} wordt getrokken veel groter is. Daardoor kan met een beperkt aantal trekkingen al een behoorlijk groot aantal samples met falen verkregen worden. Bij Crude Monte Carlo telt elk sample even zwaar mee, maar in de Importance Sampling is dat niet het geval. Er wordt een wegingsfactor toegepast voor elke sample:

$$w = \frac{f(\bar{h}_{\max} > h_{\max})}{h(\bar{h}_{\max} > h_{\max})} \quad (2.1)$$

Met:

w = wegingsfactor

f() = werkelijke overschrijdingsverdeling van h_{\max}

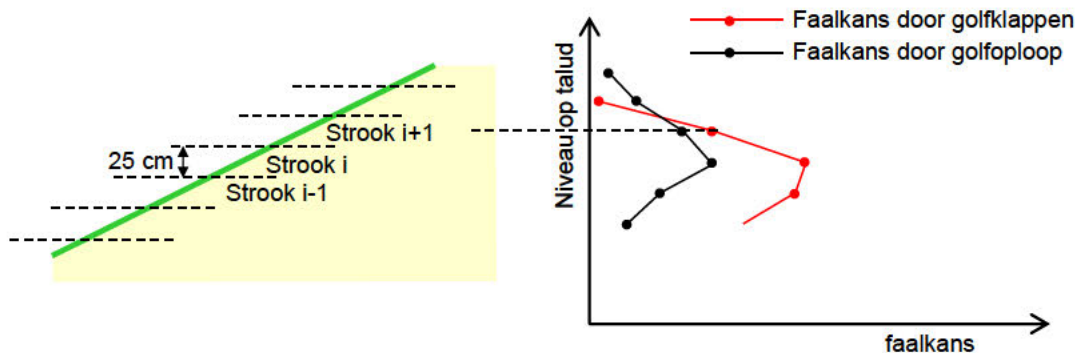
h() = in de simulatie toegepaste overschrijdingsverdeling van h_{\max}

Voor de verdelingsfunctie van h() is een normale verdeling gekozen. Net als bij Crude Monte Carlo is de faalkans gelijk aan het aantal malen dat het gras faalt, gedeeld door het totaal aantal samples, met dat verschil dat bij Importance Sampling de wegingsfactor wordt verdisconteerd. Zie bijlage C voor meer toelichting hierover.

Voor de volgende parameters zijn stochastische variabelen gebruikt:

- Topwaterstand in de storm, h_{\max} :
Er is met Hydra-K of Hydra-Zoet een tabel opgesteld die het verband geeft tussen de herhalingstijd en de waterstand (zie hoofdstuk 3). Voor tussenliggende waarden is geïnterpoleerd. Voor de Importance Sampling is gebruikgemaakt van een normale verdeling.
- Windsnelheid in de storm, u_w :
Er is een formule gebruikt waarmee de getrokken topwaterstand wordt omgerekend naar een windsnelheid. In die formule is een stochastische variabele opgenomen met normale verdeling (zie hoofdstuk 3).
- Het kritische golfoverslagdebiet, q_{cr} :
De formule heeft een modelfactor m met lognormale verdeling, zie bijlage A.3.
- De sterkte van het gras tijdens golfklappen:
De variabele a heeft een lognormale verdeling en het zandgehalte in de klei heeft een normale verdeling, zie bijlage A.4.
- De sterkte van het gras tijdens golfploop:
De parameters U_c en D_{crit} hebben een lognormale verdeling, zie bijlage A.4.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een talud dat opgedeeld is in smalle stroken met hoogte van 25 cm, waarbij voor elke strook de twee mechanismen zijn beschouwd: golfklap en golfploop. De sterkte van het gras is voor het hele talud homogeen verondersteld. Voor elk sample van de Monte Carlo berekening is voor elke strook berekend of er falen gaat optreden of niet. Dat levert voor elke strook een faalkans voor het mechanisme golfploop en voor het mechanisme golfklap. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.11.



Figuur 2.11 Schematische weergave van verdeling van het talud in stroken en resulterende faalkans per strook.

Ten behoeve van het inzicht in de rekenresultaten is eerst de faalkans voor elk van deze 2 mechanismen apart berekend, zoals geïllustreerd in Figuur 2.11.

Vervolgens is de werkelijke faalkans van het gras in elke strook bepaald door de cumulatieve schade door golfoploop en golfklap in de berekeningen op te tellen. Het samenstellen van de schade is op vergelijkbare wijze gedaan als het samenstellen van verschillende tijdstappen (periodes) in de storm:

- In een bepaalde tijdstap wordt de hydraulische belasting berekend en vervolgens berekend hoe lang de betreffende strook gras deze belasting kan weerstaan. Het quotiënt van de tijdstapgrootte en deze standduur is een maat voor de schade. Als deze groter is dan 1, treedt er falen op.
- Deze mate van schade wordt in elke tijdstap berekend voor het mechanisme golfklap en het mechanisme golfoploop en vervolgens opgeteld.
- De totale schade in een bepaalde strook aan het eind van de storm is gelijk aan de som van alle schades in elke afzonderlijke tijdstap.

Het verloop van de schade tijdens de storm is bijvoorbeeld als volgt. In de aanloop van de storm is de waterstand nog laag en zal een bepaalde strook enige tijd belast worden door golfoploop. Daarbij zal er al enige beginnende schade ontstaan, maar zal er niet altijd falen optreden. Naarmate de waterstand stijgt kan de betreffende strook onder water komen en wordt het belast door golfklappen. De schadeprogressie gaat dan sneller. Treedt er dan nog steeds geen falen op, dan zal in het laatste deel van de storm, bij lagere waterstanden, er nog enige schade bijkomen door de belasting met golfoploop.

2.3.3 Toelaatbare faalkans

Voor de interpretatie van de resultaten gaat het om het niveau op het talud vanaf waar de faalkans van het gras kleiner is dan de faalkansruimte voor graserosie op het buitentalud. Deze faalkansruimte P_T wordt als volgt afgeleid van de norm:

- maximaal toelaatbare faalkans voor het traject uit de wet, bijvoorbeeld: $P_{Max} = 1/1000$ per jaar (de signaleringswaarde uit de wet is een factor 1 à 3 kleiner, dus bijvoorbeeld $1/3000$ per jaar)
- maximaal toelaatbare faalkans voor de bekledingen: $P_B = 0,1 \cdot P_{Max}$, in dit voorbeeld: $P_B = 1/10.000$ per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor gras voor het traject: $P_G = 0,5 \cdot P_B$, in dit voorbeeld: $P_G = 1/20.000$ per jaar

- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor het traject: $P_{GE} = 0,9 \cdot P_G$, in dit voorbeeld: $P_{GE} = 1/22.000$ per jaar.
- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor een specifieke locatie op de dijk (dijkdoorsnede): $P_T = P_{GE}/3$, in dit voorbeeld: $P_T = 1/67.000$ per jaar. Deze factor 3 is de lengte-effectfactor voor de hoogte van de dijk. Opgemerkt wordt dat deze factor locatieafhankelijk is, waardoor voor de meerdijken bij Edam en Enkhuizen bijvoorbeeld geldt $P_T = P_{GE}/2$, waardoor: $P_T = 1/44.000$ per jaar.

Met de probabilistische berekeningen zoeken we naar het niveau vanaf waar gras toelaatbaar is. Vanaf dat niveau is de faalkans van het gras acceptabel klein.

2.3.4 Cases

De probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd voor 8 voorbeeldlocaties, zie Figuur 2.12:

- Halverwege Eemshaven - Delfzijl (relatief kleine correlatie tussen waterstand en golfhoogte)
- Midden op Lauwersmeerdijk (relatief veel doordringing van golven van de Noordzee)
- Net ten noorden van Harlingen (vrij grote correlatie tussen waterstand en golfhoogte)
- Vlissingen (grote invloed van golven van de Noordzee en klein faseverschil tussen top van de opzet en hoogwater)
- West van Ossenisse langs de Westerschelde (gedomineerd door lokale golfgroei en groot getij)
- Urk (stormgedomineerde de situatie op het IJsselmeer)
- Edam (meerpeilgedomineerde situatie met relatief grote golven)
- Enkhuizen (meerpeilgedomineerde situatie met relatief kleine golven)

Voor de locaties Eemshaven – Delfzijl, Harlingen, Urk, Edam en Enkhuizen zijn tevens extra sommen uitgevoerd met respectievelijk iets grotere of iets kleinere golfhoogte op de top van de storm. Voor de case bij Vlissingen zijn twee normkansen beschouwd om de invloed hiervan te zien. Dit is te zien in Tabel 4.1.

Voor alle probabilistische berekeningen is uitgegaan van een gesloten zode, omdat dit het meeste voorkomt in Nederland.

In het huidige project zijn probabilistische berekeningen uitgevoerd voor deze cases, waarbij gebruik gemaakt is van de statistische verdeling van de hydraulische belasting en onzekerheden in de sterkte. Bij dergelijke berekeningen moet de berekende faalkans kleiner zijn dan de maximaal toelaatbare faalkans van graserosie in de beschouwde doorsnede: P_T . Bij probabilistische berekeningen worden alle onzekerheden expliciet meegenomen, maar de berekeningen zijn gecompliceerd en tijdrovend. Daarom wordt op basis van de probabilistische berekeningen in dit project een semi-probabilistische methode afgeleid, die makkelijker hanteerbaar is in de praktijk. Dit is nader uitgewerkt in paragraaf 5.2 en 6.3.

Een stroomschema van de probabilistische berekeningen is gegeven in bijlage E.



Figuur 2.12 Voorbeeldlocaties voor probabilistische berekeningen

3 Hydraulische randvoorwaarden zeedijken

3.1 Algemeen

Voor de analyse zoals beschreven in Hoofdstuk 2 zijn tijdsverlopen van golfcondities nodig. Daarnaast zijn voor de afleiding van de ontwerpmethode hydraulische belastingen (HR) benodigd zoals deze met bestaande instrumenten afgeleid kunnen worden. In dit hoofdstuk wordt beschreven op welke wijze deze informatie is verkregen voor zeedijken. De meerdijken worden behandeld in paragraaf 6.1.

Afleiding van zowel de tijdsverlopen als de hydraulische randvoorwaarden is voor zeedijken uitgevoerd met Hydra-K versie 3.6.5. Dit is het op dit moment vigerende instrument voor afleiding Hydraulische Randvoorwaarden in de zoute wateren. Voor een nadere toelichting van de werking van Hydra-K, alsmede uitgangspunten en beperkingen wordt verwezen naar HKV (2012).

3.2 Beschouwde locaties en herhalingstijden

De tijdsverlopen en hydraulische randvoorwaarden zijn afgeleid voor een vijftal locaties langs de zoute wateren. De locaties zijn zodanig gekozen dat verschillende zoute watersystemen meegenomen worden. Verder is binnen watersystemen gekozen voor locaties waarvoor sprake is van een verschil in de correlatie tussen wind en lokale waterstand omdat verwacht wordt dat deze correlatie van invloed kan zijn op de resultaten van de probabilistische berekening als ook de hieruit volgende ontwerpmethode.

De beschouwde locaties zijn vermeld in Tabel 3.1.

Locatie nummer	Locatie naam	Hydra-K systeem	Hydra-K ID
1	Eemshaven-Delfzijl	Waddenzee Oost	10890
2	Harlingen	Waddenzee West	10354
3	Vlissingen	Westerschelde	668
4	Ossensse	Westerschelde	248
5	Lauwersmeer	Waddenzee Oost	10621

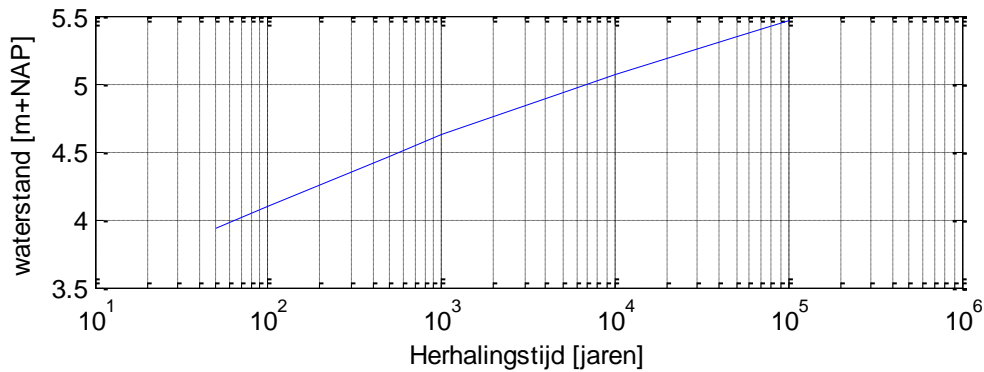
Tabel 3.1 Beschouwde locaties bij bepaling Hydraulische Randvoorwaarden

Verder zijn de hydraulische randvoorwaarden voor verschillende herhalingstijden afgeleid. De beschouwde herhalingstijden zijn 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000, 50000 en 100000 jaar. Deze herhalingstijden zijn ook gebruikt voor het bepalen van de tijdsverlopen zoals beschreven in hiernavolgende paragraaf.

3.3 Afleiding tijdreeksen gegeven trekking van piekwaterstand en afwijking u_{10}

Voor de bepaling van de tijdreeksen, gegeven een trekking van piekwaterstand en afwijking van de windsnelheid u_{10} , zijn per locatie een aantal stappen doorlopen:

- Bepaal de marginale statistiek van de waterstand, inclusief illustratiepunten welke de bijbehorende windsnelheid geeft. Dit levert 8 illustratiepunten op (op basis van 8 herhalingstijden). Een voorbeeld is gegeven in Figuur 3.1.

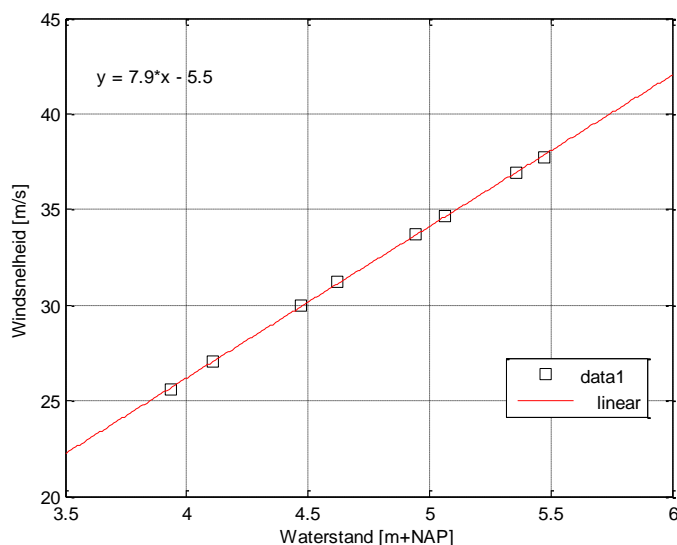


Figuur 3.1 Voorbeeld van marginale statistiek waterstand (locatie 2, HA)

- Bepaal op basis van de 8 gevonden illustratiepunten, zie bijvoorbeeld onderstaande Tabel 3.2, een verband tussen piekwaterstand en windsnelheid (dit blijkt lineair te zijn). De resulterende fit is gepresenteerd in Figuur 3.2.

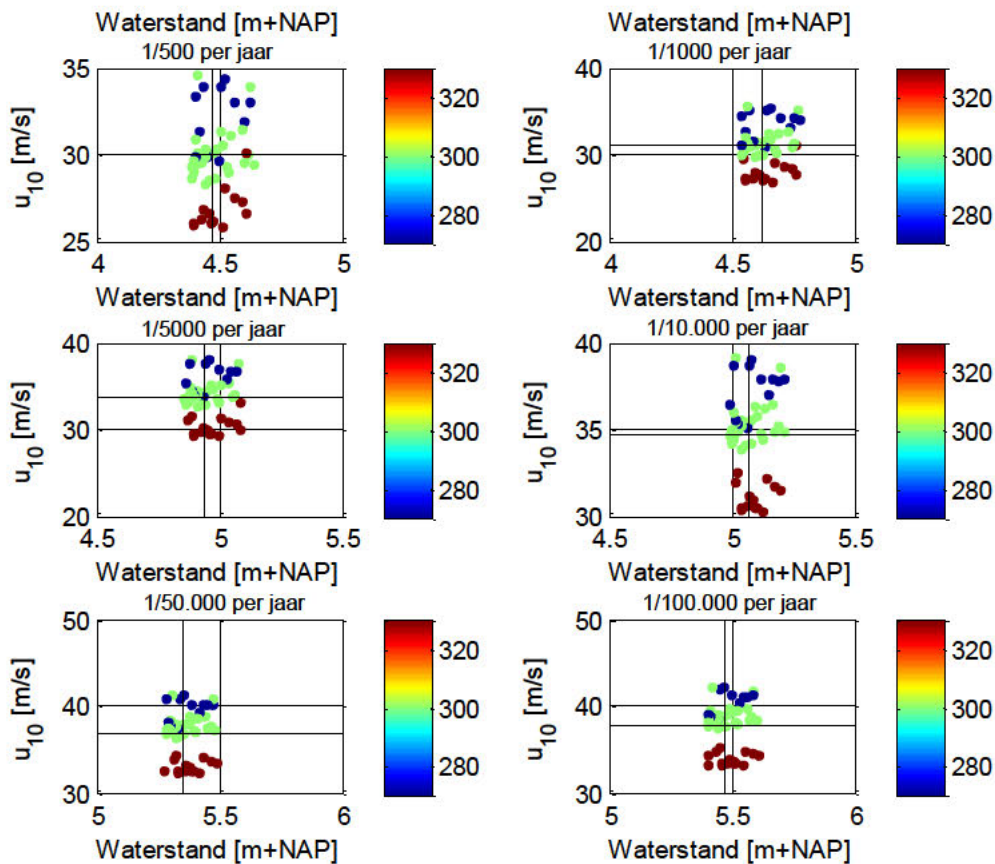
Herhalingstijd [jaren]	Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte [m]	Golfperiode [s]	Windrichting [°N]	Windsnelheid [m/s]
50	3,94	1,98	4,43	294	26
100	4,11	2,10	4,53	294	27
500	4,47	2,35	4,74	297	30
1000	4,62	2,45	4,81	298	31
5000	4,94	2,67	4,97	299	34
10000	5,07	2,75	5,03	300	35
50000	5,36	2,93	5,15	302	37
100000	5,47	3,01	5,21	303	38

Tabel 3.2 Voorbeeld van illustratiepunten behorende bij waterstandsstatistiek (locatie 2, HA)



Figuur 3.2 Voorbeeld van verband tussen waterstand en windsnelheid en lineaire fit (locatie 2, HA)

- Stel vast wat de verwachtingswaarde van de windsnelheid en windrichting is volgend uit alle illustratiepunten.
- Gebruik het verband tussen piekwaterstand en windsnelheid om gegeven een getrokken piekwaterstand de windsnelheid te bepalen. Merk op dat dit een benadering is van het werkelijke verband (temeer ook omdat dit potentieel verschilt per windrichting). Echter, voor de maatgevende belasting voor alle herhalingstijden geldt dat deze door dezelfde windrichting wordt gedomineerd en dat deze vereenvoudiging acceptabel wordt verondersteld. Voor elk van de locaties is geverifieerd of er slechts 1 windrichting dominant is: dat bleek het geval. Effectief is het gebruik van het gevonden verband overeenkomstig het hanteren van een correlatiemodel tussen wind en waterstand, zoals ook in Hydra-K gehanteerd wordt.
- Gebruik de piekwaterstand om een tijdsverloop van de waterstanden binnen een storm te bepalen conform (Chbab 2015).
- Zoek vervolgens in de SWAN database behorende bij Hydra-K versie 3.6.5 de golfcondities behorende bij (i) de waterstand op tijdstip t in de storm, (ii) met windsnelheid behorende bij piekwaterstand volgens het vastgestelde verband en (iii) windrichting behorende bij illustratiepunten. Dit leidt tot een tijdreeks van golfcondities behorende bij de tijdreeks van waterstand, welke vervolgens hoort bij de getrokken piekwaterstand.



Figuur 3.3 Voorbeeld van stormen rondom het illustratiepunt voor verschillende herhalingstijden. Snijpunt van de gestreepte lijnen geeft het illustratiepunt weer, de bolletjes geven de 50 stormen rondom het illustratiepunt weer, de kleur van de bolletjes geeft de windrichting van de storm weer. Gegevens betreffen locatie 2 (HA).

Het verband tussen piekwaterstand en windsnelheid is gemodelleerd via een lineaire relatie, want dat bleek goed te passen. Echter, er is natuurlijk een onzekerheid met betrekking tot deze relatie. Deze onzekerheid is vastgesteld op basis van eigenschappen van de stormen rondom het illustratiepunt gevonden met Hydra-K, zie Figuur 3.3. Hieruit bleek dat er sprake was van een standaardafwijking van 2 m/s rondom het illustratiepunt. Dit betekent dat de gevonden lineaire relatie tussen piekwaterstand en windsnelheid omgeven is van een onzekerheidsband met een standaardafwijking van 2 m/s. Bij het zoeken naar de golfcondities in de SWAN database is de windsnelheid dan ook aangepast conform een trekking uit een normale verdeling met een standaardafwijking van 2 m/s.

Verder bleek dat de windrichting behorende bij deze standaardafwijking niet gelijk is aan de windrichting behorende bij het illustratiepunt, zie ook Figuur 3.3. Voor een getrokken positieve afwijking van de windsnelheid ten opzichte van de verwachtingswaarde is een 30° zuidelijkere windrichting van toepassing, terwijl het omgekeerde van toepassing is voor een negatieve afwijking van de windsnelheid. Afhankelijk van het teken van de getrokken afwijking van u_{10} is dan ook gezocht met een afwijkende windrichting.

De bovengenoemde stappen zijn geautomatiseerd zodat deze integraal opgenomen kunnen worden in de probabilistische analyse. Het resultaat is een tool waarbij gegeven een waterstandverloop een verloop van golfhoogte en golfperiode wordt verkregen. Hierbij zijn enkele kanttekeningen van toepassing:

- Indien de waterstand lager of gelijk aan bodemniveau is, dan wordt de golfhoogte gelijk 0 aangenomen. De golfperiode wordt in die gevallen gelijk verondersteld aan de golfperiode behorende bij de laagste waterstand in de SWAN database.
- De golfhoogte en golfperiode zijn constant gehouden als de waterstand lager is dan NAP+1,0 m. Voor dergelijke lage waterstanden zijn geen betrouwbare golfgegevens beschikbaar. Dit deel van de storm heeft een verwaarloosbare invloed op de resulterende faalkans van de grasbekleding.
- Voor windsnelheden groter dan 40 m/s wordt een windsnelheid van 40 m/s aangehouden. Het heeft geen zin om hogere windsnelheden mee te nemen, omdat deze een verwaarloosbare kansbijdrage geven in de huidige probabilistische berekeningen (dit is geverifieerd met enkele tests).

3.4 Hydraulische randvoorwaarden per faalmechanisme

Met behulp van Hydra-K versie 3.6.5 zijn eveneens de Hydraulische Randvoorwaarden afgeleid welke als input dienen voor het opstellen van de semi-probabilistische ontwerpmethod. Hiertoe zijn voor dezelfde herhalingstijden (50, 100, 500, 1000, 5000, 10000, 50000 en 100000 jaar) voor verschillende grootheden illustratiepunten (meest waarschijnlijke condities, gegeven de statistische grootheid) afgeleid. Het gaat hierbij om de volgende grootheden/statistiek:

Marginale statistiek waterstand

De marginale statistiek van de lokale waterstand is afgeleid, waarbij ook de illustratiepunten zijn afgeleid. Merk op dat Hydra-K normaliter alleen de marginale statistiek van de waterstand kan afleiden en dat de bijbehorende illustratiepunten niet voor een reguliere gebruiker zichtbaar zijn.

Marginale statistiek golfhoogte en golfperiode

De marginale statistiek van zowel de lokale golfhoogte als ook de lokale golfperiode is afgeleid, waarbij ook de illustratiepunten zijn afgeleid. Merk op dat Hydra-K normaliter alleen de marginale statistiek van de waterstand kan afleiden en dat de bijbehorende illustratiepunten niet voor een reguliere gebruiker zichtbaar zijn.

Verder is het van belang te realiseren dat marginale statistiek van golfhoogte en golfperiode ontkoppeld zijn: een eens per 1000 jaar golfhoogte treedt niet noodzakelijkerwijs tegelijkertijd op met een eens per 1000 jaar golfperiode.

Marginale statistiek en illustratiepunten HBN

De marginale statistiek van het Hydraulisch Belasting Niveau (HBN) is afgeleid op basis van een standaard Hydra-K profiel (talud 1:5 met ruwheid = 1,0) en de aanname dat golven altijd loodrecht invallen. Dit laatste is in de praktijk niet zo, maar omdat in de probabilistische analyse ook is uitgegaan van loodrecht invallende golven is dat voor het HBN ook aangenomen. De cases in dit rapport zijn doorgerekend met een talud van 1:4, dit is echter niet van belang voor het afleiden van de ontwerpmethod, omdat de hydraulische randvoorwaarden (waterstand en golfcondities) onafhankelijk zijn van de taludhelling voor normale dijken (talud 1:3 tot 1:5) zonder berm. De illustratiepunten van het HBN kunnen daarom ook gebruikt worden voor afwijkende taludhellingen.

Een reguliere gebruiker van Hydra-K kan ook de illustratiepunten voor HBN uitvoeren.

Illustratiepunten bekledingen

Tot slot zijn voor niveau's van 1,0 m+NAP tot en met toetspeil met stappen van 0,5 meter illustratiepunten afgeleid voor bekledingen. Hierbij is gebruik gemaakt van weegfactoren 1 voor de golfhoogte, 2/3 voor de golfperiode, en 0 voor de golfrichting. Dit impliceert een even grote bijdrage van golfhoogte en golfperiode aan de belasting voor bekledingen en een onafhankelijkheid van de golfrichting.

4 Resultaten probabilistische berekeningen voor zeedijken

De ontwerpmethodologie voor het bepalen van de noodzakelijke hoogte van de overgang van een harde bekleding naar gras op het buitentalud van primaire waterkeringen langs de zoute wateren is afgeleid op basis van een aantal probabilistische berekeningen. Hoewel de locaties van de doorgerekende dijken zijn gegeven in Figuur 2.12, moeten deze toch gezien worden als fictieve gevallen. De berekeningen zijn namelijk uitgevoerd zonder zeespiegelstijging en bodemdaling in rekening te brengen en er is in alle gevallen gerekend met loodrechte golfaanval en een taludhelling van 1:4 zonder berm. Verder zijn de dijken bij Eemshaven – Delfzijl en Harlingen met diverse golfcondities berekend en is de locatie bij Vlissingen met twee verschillende normen doorgerekend.



Figuur 4.1 Friese Waddenzeedijk

4.1 Hydraulische randvoorwaarden voor de doorgerekende cases

Een indruk van de berekende hydraulische belasting voor de cases is gegeven in Tabel 4.1. Deze zijn bepaald met Hydra-K en wordt in die context ‘illustratiepunten’ genoemd. Dit is de uitvoer van het rekenmodel, waarmee de hydraulische belasting wordt gekwantificeerd afhankelijk van de overschrijdingskans. Hieraan zijn de volgende cases toegevoegd:

- ED2 t/m ED5: alle golfhoogtes van case ED1 zijn vermenigvuldigd met respectievelijk 1,2, 1,4, 1,6 en 1,8 en de golfperiodes zijn vermenigvuldigd met de wortel uit deze factor. De waterstanden zijn gelijk gehouden.
- HA2 t/m HA5: alle golfhoogtes van case HA1 zijn vermenigvuldigd met respectievelijk 0,6, 0,7, 0,8 en 0,9 en de golfperiodes zijn vermenigvuldigd met de wortel uit deze factor. De waterstanden zijn gelijk gehouden.
- VL2: met een driemaal kleinere normkans dan VL1.

Voor het eerste en tweede deel van de tabel (overschrijdingskans P_{\max} en P_T) is het ‘illustratiepunt waterstand’ met bijbehorende golven gegeven. Het derde deel van de tabel

(overschrijdingskans P_{HBN}) bestaat uit het 'illustratiepunt HBN'. Dit is onderstaand nader toegelicht. De gehanteerde faalkansen zijn ontleend aan de Concept Waterwet (2016). Voor de probabilistische berekeningen en de berekeningen voor Tabel 5.5 is gebruik gemaakt van de golfcondities van het 'illustratiepunt bekleding'. Zie bijvoorbeeld Figuur 5.4.

Voor de locaties zijn in dit rapport de volgende afkortingen gebruikt:

- ED: Eemshaven – Delfzijl (Eems) (5 cases met oplopende golfhoogte, maar dezelfde golfsteilheid, waarbij ED 1 voortkomt uit de Hydra-K berekeningen)
- HA: Harlingen (Waddenzee) (5 cases met afnemende golfhoogte, maar dezelfde golfsteilheid, waarbij HA 1 voortkomt uit de Hydra-K berekeningen)
- LM: Lauwersmeerdijk (Waddenzee)
- OS: Ossensisse (Westerschelde)
- VL: Vlissingen (Westerschelde) (2 cases, ook een met een 3 maal kleinere normkans)

Locatie	Norm	Randvoorwaarden bij P_{max}			Randvoorwaarden bij P_T				Randvoorwaarden bij P_{HBN}			
		P_{max} (/jaar)	$h_{P_{max}}$ (m)	H_{m0} (m)	T_p (s)	P_T (/jaar)	h_{PT} (m)	H_{m0} (m)	T_p (s)	P_{HBN} (/jaar)	h_{HBN} (m)	H_{m0} (m)
ED 1	1,0E-3	5,51	0,88	2,83	1,50E-5	6,61	1,13	3,05	8,00E-5	5,96	1,29	3,55
ED 2	1,0E-3	5,51	1,05	3,10	1,50E-5	6,61	1,36	3,66	8,00E-5	5,96	1,55	3,89
ED 3	1,0E-3	5,51	1,23	3,35	1,50E-5	6,61	1,58	4,27	8,00E-5	5,96	1,81	4,20
ED 4	1,0E-3	5,51	1,40	3,58	1,50E-5	6,61	1,81	4,88	8,00E-5	5,96	2,07	4,49
ED 5	1,0E-3	5,51	1,58	3,80	1,50E-5	6,61	2,03	5,49	8,00E-5	5,96	2,32	4,77
HA 1	1,0E-3	4,62	2,45	4,81	1,50E-5	5,40	2,97	5,17	8,00E-5	5,07	2,81	5,06
HA 2	1,0E-3	4,62	1,47	3,73	1,50E-5	5,40	1,78	3,10	8,00E-5	5,07	1,69	3,92
HA 3	1,0E-3	4,62	1,72	4,03	1,50E-5	5,40	2,08	3,62	8,00E-5	5,07	1,97	4,23
HA 4	1,0E-3	4,62	1,96	4,30	1,50E-5	5,40	2,37	4,14	8,00E-5	5,07	2,25	4,52
HA 5	1,0E-3	4,62	2,21	4,57	1,50E-5	5,40	2,67	4,66	8,00E-5	5,07	2,53	4,80
LM	1,0E-3	4,74	2,14	4,00	1,50E-5	5,62	2,66	4,32	8,00E-5	5,26	2,48	4,29
OS	1,0E-3	5,64	1,94	4,40	1,50E-5	6,80	2,56	4,89	1,25E-4	5,96	2,49	4,98
VL 1	1,0E-3	4,93	2,55	6,75	1,50E-5	5,90	3,04	7,19	1,25E-4	5,14	3,42	6,99
VL 2	3,3E-4	5,18	2,70	6,88	5,00E-6	6,14	3,19	7,29	4,00E-5	5,36	3,56	7,09

Tabel 4.1 Overzicht van de hydraulische randvoorwaarden voor de cases.

In deze tabel zijn de volgende symbolen gebruikt:

P_{Max} = maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (/jaar)

P_T = maximaal toelaatbare faalkans van graserosie in de beschouwde doorsnede (/jaar)

P_{HBN} = faalkans die wordt gehanteerd voor het berekenen van het belastingsniveau voor het dimensioneren van de kruinhoogte (/jaar)

h = waterstand ten opzichte van NAP (m)

H_{m0} = significante golfhoogte, bepaald uit het spectrum, bij de teen van de dijk (m)

T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

$h_{P_{max}}$ = waterstand met overschrijdingskans gelijk aan maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (P_{max}) (m+NAP)

h_{PT} = waterstand met overschrijdingskans van P_T (m+NAP)

Een ontwerp van een dijkbekleding zal in de praktijk in meeste gevallen uitgevoerd worden op basis van semi-probabilistische berekeningen, waarbij gerekend wordt met veiligheidsfactoren. Met deze veiligheidsfactoren is de rekenmethode zodanig gecorrigeerd dat het ontwerpen hiermee leidt tot constructies met een acceptabele faalkans (zoals met de semi-

probabilistische MHW-methode uit het OI). De veiligheidsfactoren verdisconteren de onzekerheden.

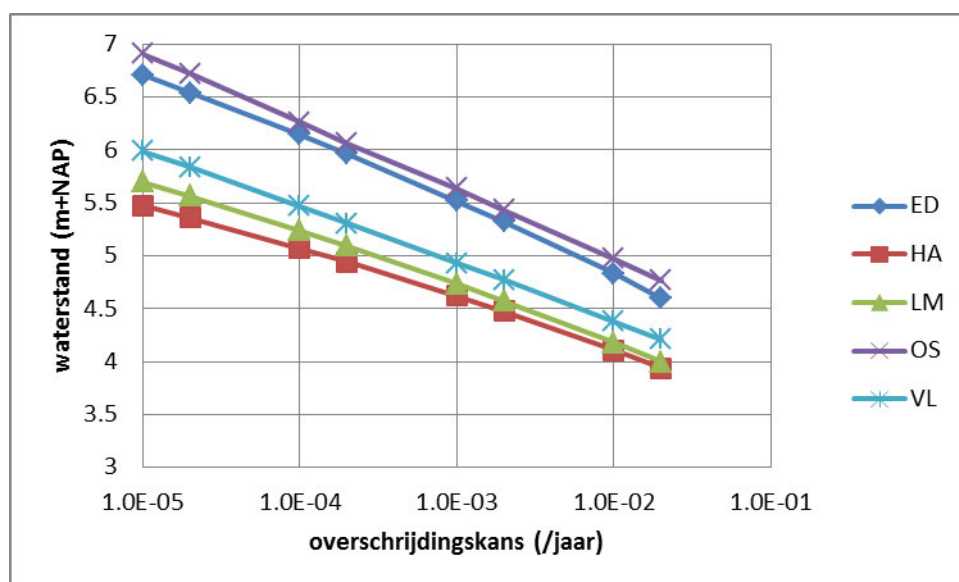
Voor dergelijke semi-probabilistische berekeningen wordt gewerkt met de hydraulische belasting met overschrijdingskans gelijk aan de maximaal toelaatbare norm op trajectniveau: P_{Max} . Deze hydraulische randvoorwaarden zijn voor deze cases in Tabel 4.1 opgenomen.

Ter illustratie zijn ook de hydraulische randvoorwaarden met overschrijdingskans gelijk aan P_T in de tabel gegeven. Dit is gelijk aan de maximaal toelaatbare faalkans van graserosie in de beschouwde doorsnede, zie paragraaf 2.3.3. In paragraaf 5.2 zal blijken dat we voor het berekenen van de hoogte van de overgang niet alleen kunnen volstaan met de hydraulische randvoorwaarden bij P_{max} , maar ook deze waarden bij P_T nodig zijn in de semi-probabilistische rekenmethode.

Ten slotte zijn in Tabel 4.1 ook de hydraulische randvoorwaarden gegeven voor het bepalen van de kruinhoogte van de dijk: HBN. Deze hydraulische randvoorwaarden hebben een overschrijdingskans gelijk aan P_{HBN} .

De wijze waarop P_{Max} en P_T berekend worden op basis van de norm uit de wet is gegeven in paragraaf 2.3.3. Voor het HBN wordt P_{HBN} als volgt afgeleid:

- maximaal toelaatbare faalkans voor het traject: bijvoorbeeld: $P_{Max} = 1/1000$
- maximaal toelaatbare faalkans voor overslag op trajectniveau (stabiliteit kruin en binnentalud): $P_O = 0,24 \cdot P_{Max}$, in dit voorbeeld: $P_B = 1/4000$
- maximaal toelaatbare faalkans op een specifieke locatie (doorsnede):
 - Waddengebied: $P_{HBN} = P_O/3$, in dit voorbeeld: $P_{HBN} = 1/12.500$
 - Westerschelde: $P_{HBN} = P_O/2$, in dit voorbeeld: $P_{HBN} = 1/8000$

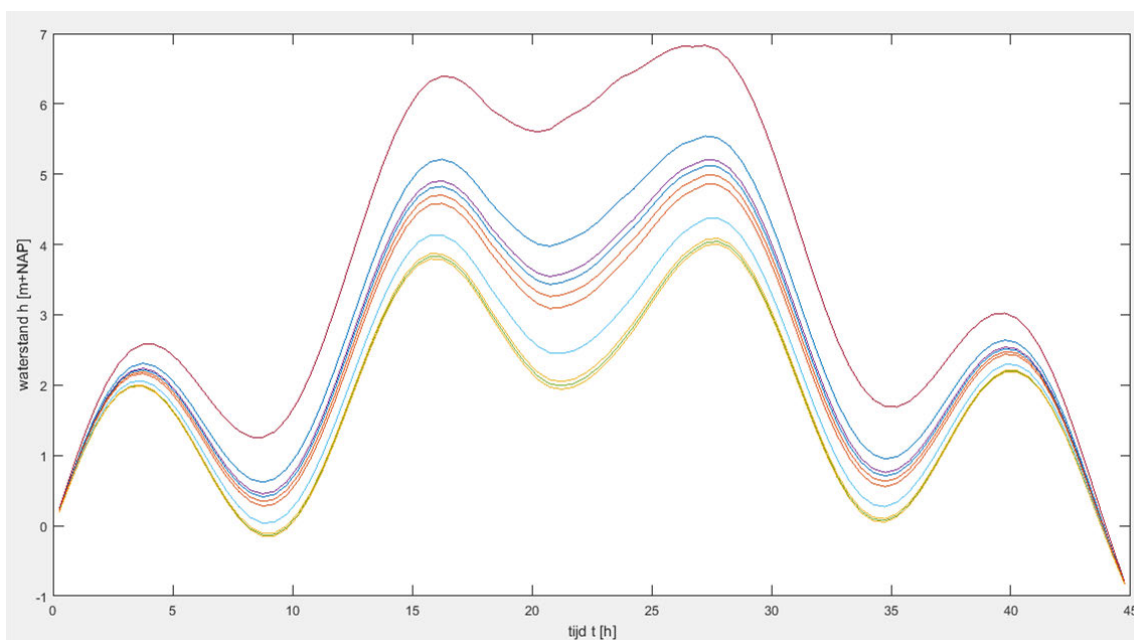


Figuur 4.2 Waterstand als functie van de overschrijdingskans (marginale statistiek)

De waterstand als functie van de overschrijdingskans (marginale statistiek) is voor de vijf locaties gegeven in Figuur 4.2. Hierbij is geen zeespiegelstijging in rekening gebracht. De punten in de figuur geven de waarden aan die voortkomen uit de Hydra-K berekeningen. Voor tussenliggende waarden is waar nodig lineair geïnterpoleerd met de log(overschrijdingskans).

Zoals uitgelegd in hoofdstuk 3 is voor elke stormgebeurtenis een topwaterstand gekozen en is het verloop van de golfhoogte en golfperiode als functie van de waterstand in de storm bepaald. In Figuur D.1 is voor een voorbeeld voor de dijk Eemshaven - Delfzijl te zien hoe de opzet en het getij zijn opgeteld om te komen tot het waterstandsverloop tijdens een storm. Tien van dergelijke stormen, willekeurig geselecteerd uit de stormen die gebruikt zijn in de Monte Carlo berekeningen, zijn ter illustratie gegeven in Figuur 4.3 (zelfde als Figuur D.2). Op basis van de relatie tussen de waterstand en de golfcondities is ook het verloop van de golfhoogte en golfperiode berekend, zie Figuur D.3 en Figuur D.4.

Hoe dit gebruikt is in de probabilistische berekeningen is in een stroomschema getoond in bijlage E.



Figuur 4.3 Voorbeeld van het waterstandsverloop als functie van de tijd in 10 stormen voor de dijk Eemshaven - Delfzijl (selectie uit de stormen die gebruikt zijn in de Monte Carlo berekeningen)

Merk op dat in de figuren de golfhoogte en golfperiode constant zijn gehouden als de waterstand lager is dan NAP+1,0 m. Voor dergelijke lage waterstanden zijn geen betrouwbare golfgegevens beschikbaar. Dit deel van de storm heeft een verwaarloosbare invloed op de resulterende faalkans van de grasbekleding. Vergelijkbare figuren voor de Lauwersmeerdijk en Ossenise zijn gegeven in Figuur D.19 t/m Figuur D.22 en Figuur D.25 t/m Figuur D.28.

De doorgerekende cases zijn weliswaar afgeleid van werkelijke locaties in Nederland, maar zijn desondanks fictief.

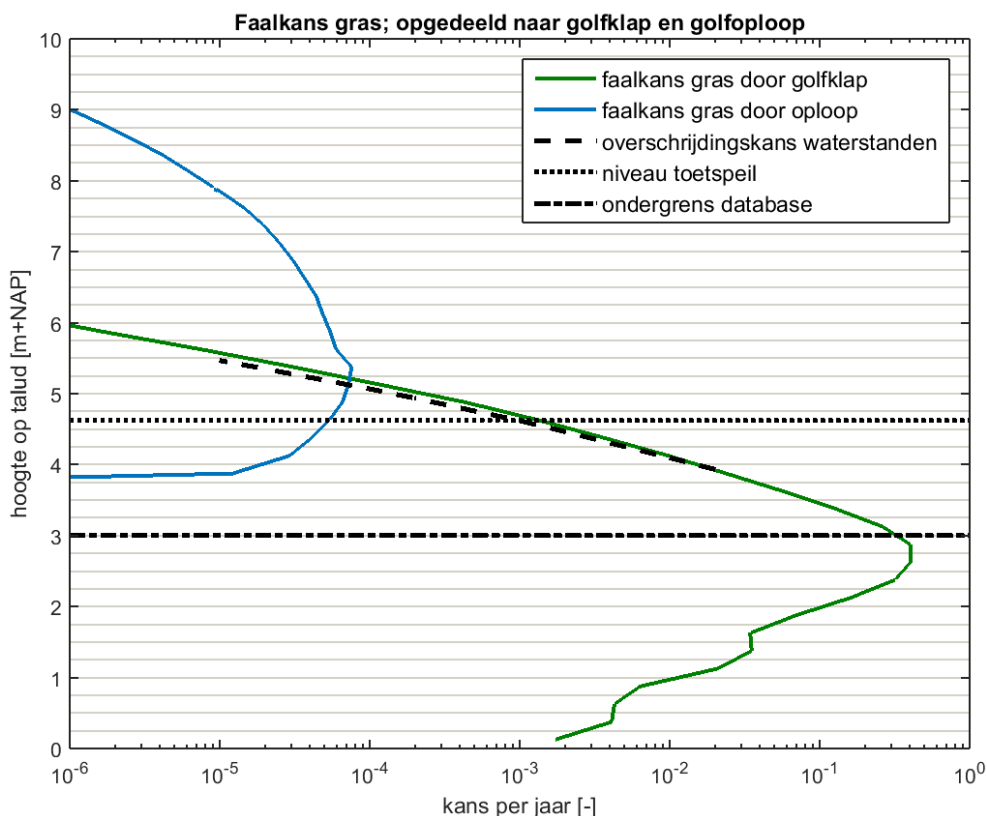
4.2 Faalkans van de grasbekleding

De faalkans van de grasbekleding is berekend door het gehele talud te verdelen in stroken van 25 cm hoogte en voor elke strook met een Monte Carlo berekening de faalkans te bepalen (zie ook paragraaf 2.3.2). In deze berekeningen is verondersteld dat de gehele dijk bekleed is met gras, hoewel dit in de praktijk bij dergelijke dijken doorgaans niet het geval zal

zijn. Onder het ontwerppeil is de golfbelasting namelijk zo zwaar dat gras niet kan worden toegepast.

Dit alom bekende gegeven volgt ook uit de probabilistische berekeningen. De faalkans van het gras blijkt namelijk onder het ontwerppeil onacceptabel groot te zijn.

De resulterende faalkans als functie van de hoogte boven NAP is voor alle doorgerekende cases op vergelijkbare wijze in figuren weergegeven. Een voorbeeld van een dergelijke figuur is gegeven in Figuur 4.4 (case HA1). In deze figuur is een blauwe lijn getekend die de faalkans als functie van de hoogte weergeeft als uitsluitend gekeken wordt naar het mechanisme golfloop. De groene lijn geeft de faalkans als gevolg van het mechanisme golfklap. In de figuur is te zien dat het mechanisme golfloop zich met name manifesteert op het bovenste deel van het talud. Op het onderste deel van het talud zijn de golven te klein om schade aan het gras door golfloop te geven. Het falen door golfklappen treedt met name op de onderste helft van het talud op, met een naar boven toe steeds kleiner wordende faalkans. De faalkans neemt naar boven toe af omdat ook de kans op het optreden van de waterstand naar boven toe afneemt.



Figuur 4.4 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfloop, zonder rekening te houden met het falen door golfoverslag (case HA1)

In de figuur is ook het verband tussen de overschrijdingskans en de waterstand gegeven (marginale statistiek): de zwarte gestreepte lijn. Het blijkt dat de faalkans voor het mechanisme golfklappen ongeveer gelijk is aan de overschrijdingskans van de waterstand bij een niveau boven NAP+4 m. Dit kan eenvoudig fysisch verklaard worden. Als de waterstand relatief hoog is (boven NAP+4 m), is er sprake van een zware storm en zijn ook de golven hoog. Als de golven hoog zijn, zal het gras snel bezwijken als gevolg van het golfklapmechanisme. Dit mechanisme treedt echter alleen onder de waterstand op (Klein

Breteler e.a. 2012). Dat betekent dat als de waterstand tot een bepaald niveau komt, al het gras onder dat niveau zal bezwijken. Dat verklaart waarom de faalkans als gevolg van het mechanisme golfklap ongeveer gelijk is aan de overschrijdingskans van de waterstand. In paragraaf 5.2 wordt er van deze constatering gebruikgemaakt bij het opstellen van de semi-probabilistische rekenmethode. Het komt erop neer dat ook de waterstand met overschrijdingskans gelijk aan de maximaal toelaatbare faalkans van graserosie in de beschouwde doorsnede (P_T) van belang is. Dit wordt in paragraaf 5.2.2 nader toegelicht.

In de figuur is te zien dat de groene lijn net iets boven de gestreepte lijn ligt. Fysisch is dat niet mogelijk en dit moet daarom gezien worden als een onnauwkeurigheid in de Monte Carlo berekeningen. De fout is echter zodanig klein dat hij verwaarloosd kan worden.

In de figuur is ter illustratie ook een horizontale stippellijn getekend ter hoogte van het toetspeil. Verder is er een horizontale streepstippellijn getekend op NAP+3,0 m, want onder dit niveau is er onvoldoende data over de golfcondities om een betrouwbare faalkans te kunnen berekenen.

Als de waterstand extreem hoog is, is het denkbaar dat de dijk bezwijkt door golfoverslag. Strikt genomen hoeft de bekleding op het buitentalud dan geen stand te houden, want de dijk bezwijkt toch al. Dit aspect is nog niet meegenomen in Figuur 4.4.

Er zijn ook berekeningen uitgevoerd waarbij tijdens elke storm gekeken is of de dijk bezwijkt door golfoverslag. Als dat het geval is, wordt voor alle stroken gras de storm geteld als dat er geen falen is opgetreden van het gras op het buitentalud. Het resultaat van deze berekening voor case HA1 is gegeven in Figuur D.12. Het blijkt dat dit een verwaarloosbare invloed heeft op het resultaat. Dit geldt ook voor alle andere cases. Mogelijk dat dit een gevolg is van het feit dat de gehanteerde criteria voor de kruin niet goed aansluiten op de criteria voor het buitentalud. Als ook de kruin volledig probabilistisch wordt doorgerekend, zoals gebruikelijk is in de toetsing, zou dit kunnen verbeteren. Maar waarschijnlijk blijft de invloed betrekkelijk gering en weegt de grote inspanning van deze dubbele probabilistische berekeningen niet op tegen de opbrengsten.

In werkelijkheid zal bij het stijgen van de waterstand tijdens een storm een strook gras eerst door golfoploop belast worden en daarna door golfklappen. Het is daarom logischer om de cumulatieve schade aan het gras tijdens een storm te berekenen door de erosie door golfoploop en golfklappen op te tellen. Als op die wijze de probabilistische berekeningen worden uitgevoerd, leidt dat tot Figuur D.13. In de figuur is te zien dat de zo berekende lijn in feite de contouren van de faalkanslijn voor golfoploop en voor golfklap uit Figuur D.12 volgt: De faalkans is ongeveer gelijk aan de som van de faalkans door golfoploop en de faalkans door golfklappen. Alleen waar de lijn voor golfoploop en die voor golfklappen elkaar snijden, is de totale faalkans iets hoger.

In de verdere analyse is steeds de faalkans beschouwt van golfoploop en golfklap tezamen, zoals gegeven in Figuur D.13, waarbij falen door golfoverslag gezien wordt als niet falen van de grasbekleding.

Alle figuren met berekende faalkansen voor de 14 doorgerekende cases zijn te vinden in bijlage D. In Tabel 4.2 is het niveau Z_{voldoet} gegeven vanaf waar de faalkans van het gras lager is dan de maximaal toelaatbare faalkans P_T voor graserosie op deze specifieke locatie (dijkdoorsnede).

Case	P_T (/jaar)	h_{PT} (m+NAP)	$Z_{voldoet}$ (m+NAP)
ED 1	1,50E-5	6,61	6,30
ED 2	1,50E-5	6,61	6,40
ED 3	1,50E-5	6,61	6,40
ED 4	1,50E-5	6,61	6,40
ED 5	1,50E-5	6,61	6,40
HA 1	1,50E-5	5,40	7,60
HA 2	1,50E-5	5,40	5,40
HA 3	1,50E-5	5,40	5,45
HA 4	1,50E-5	5,40	5,50
HA 5	1,50E-5	5,40	5,45
LM	1,50E-5	5,62	5,65
OS	1,50E-5	6,80	6,70
VL 1	1,50E-5	5,90	9,30
VL 2	5,00E-6	6,14	10,00

Tabel 4.2 Niveau vanaf waar het gras een kleinere faalkans heeft dan P_T

De volgende variabelen zijn hier gebruikt:

P_T = maximaal toelaatbare faalkans van graserosie in de beschouwde doorsnede (/jaar)

h_{PT} = waterstand met overschrijdingskans gelijk aan P_T (m+NAP)

$Z_{voldoet}$ = niveau vanaf waar de faalkans kleiner is dan P_T (m+NAP)

In de tabel is te zien dat bij ED1 het niveau vanaf waar het gras voldoet lager ligt dan de waterstand h_{PT} . Kennelijk is de golfhoogte zo klein dat er nog een kans is voor het gras om de golfklappen te weerstaan, mits het niet te lang duurt. De totale duur dat de waterstand boven NAP+6,30 m zit, terwijl de topwaterstand NAP+6,61 m is, is ongeveer 3 uur. De gemiddelde standduur van het gras is bij een golfhoogte van 1,1 m echter meer dan 20 uur en bij een golfhoogte van 1,5 m ruim 10 uur. Het is dus inderdaad denkbaar dat het gras niet faalt bij een dergelijke storm.

Wordt de topwaterstand echter wat hoger, dan is de belastingduur aanzienlijk groter en is het wel waarschijnlijk dat falen optreedt.

Bij een aantal andere cases is te zien dat het niveau vanaf waar het gras voldoet ongeveer overeenkomt met h_{PT} , namelijk bij case HA2, HA3, HA4, HA5, LM en OS. Dat komt omdat hier de golven niet zo hoog zijn dat het golfploopmechanisme een serieuze bedreiging is. De golven zijn echter hoog genoeg om schade te veroorzaken door het golfklapmechanisme.

Bij case HA1, VL1 en VL2 zijn de golven het hoogst bij h_{PT} en zien we dat het niveau vanaf waar het gras voldoet veel hoger ligt dan h_{PT} . In deze cases is het golfploopmechanisme dominant. Dit is vooral het geval als er een grote correlatie is tussen de wind en de waterstand.

Er is een groot verschil tussen HA1 en HA5. Het enige verschil tussen deze twee cases is de golfhoogte, die in HA1 10% groter is. Dat leidt in dit geval tot een veel hogere waarde van de benodigde hoogte van de overgang. Dit houdt verband met de wijze waarop de stabiliteit van het gras beoordeeld wordt, namelijk met de cumulatieve overbelastingmethode, zie bijlage A.2. Daardoor is er een duidelijke drempelwaarde waaronder er geen schade aan het gras ontstaat.

In het volgende hoofdstuk worden deze resultaten gebruikt om een ontwerpmethode voor het niveau van de overgang af te leiden.

5 Afleiding ontwerpmethodede voor zeedijken

Op basis van de 14 doorgerekende zeedijken is in dit hoofdstuk een ontwerpmethodede afgeleid voor het niveau vanaf waar gras op het buitentalud kan worden toegepast. Allereerst wordt gekeken of de methodes uit de literatuur voldoen, namelijk:

- Handboek Dimensioneren van Gezette Taludbekledingen (CUR 1992)
- Technisch Rapport Steenzettingen (TAW 2002)
- Ontwerpinstrumentarium OI-2014v3 (RWS 2015)
- Voorlopige beoordelingsmethode voor WBI-2017

Helaas blijkt dat die methodes onvoldoende zijn en daarom is een nieuwe ontwerpmethodede afgeleid.

Het doel is om een semi-probabilistische rekenmethode af te leiden waarmee het niveau van de overgang tussen de harde bekleding en het gras op zeedijken kan worden berekend op basis van de hydraulische randvoorwaarden uit Hydra-K. De ontwerpmethodede moet een voldoende veilige waarde opleveren.

Bedacht moet worden dat de probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd voor situaties met behoorlijk grote golven waarvoor geldt dat de belasting door het golfklapmechanisme te zwaar is voor het gras. Hierop wordt in paragraaf 5.2 teruggekomen.

5.1 Criteria uit de literatuur

5.1.1 Handboek Dimensioneren van Gezette Taludbekledingen

In het handboek (CUR 1992) wordt gesteld dat er lopend onderzoek is naar het niveau waar de steenzetting kan worden beëindigd en het gras kan beginnen. Vooruitlopend daarop is als indicatie gegeven dat deze overgang ongeveer moet liggen tussen een halve golfhoogte boven het ontwerppeil en een halve golfoploophoogte boven het ontwerppeil: $\text{ontwerppeil} + H_{m0}/2 < z_{\text{voldoet}} < \text{ontwerppeil} + z_{2\%}/2$, met $z_{2\%}$ = golfoploophoogte ten opzichte van de waterlijn die door 2% van de golven wordt overschreden (m).

De golfoploop kan berekend worden met de formules uit TAW (2002) (veilige waarde):

$$z_{2\%} = H_{m0} \cdot \gamma_f \gamma_\beta \cdot \min \left(1,75 \cdot \gamma_b \xi_{om}; 4,3 - \frac{1,6}{\sqrt{\xi_{om}}} \right) \quad (5.1)$$

Met:

g = versnelling als gevolg van de zwaartekracht (m/s^2)

H_{m0} = significante golfhoogte (m)

s_{om} = $H_{m0}/(gT_{m-1,0}^2/(2\pi))$ = golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$ (-)

$T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode (-)

$z_{2\%}$ = golfoploophoogte op een glad talud ten opzichte van de stilwaterlijn die door 2% van de golven wordt overschreden (m).

α = taludhelling ($^\circ$)

ξ_{om} = $\tan\alpha/\sqrt{s_{om}}$ = brekerparameter (-)

γ_f = ruwheidscoëfficiënt (= 1 in dit geval) (-)

γ_b = factor voor de invloed van een berm (= 1 in dit geval) (-)

γ_β = factor voor de invloed van de hoek van golfival (= 1 in dit geval) (-)

Voor de waterstand en golfcondities wordt gebruik gemaakt van de waarden bij de maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau: P_{Max} . Het is gebruikelijk om dijkbekledingen hiermee te dimensioneren en dit sluit ook aan op de toetsmethode WBI-2017, die ook in de gedetailleerde toetsing met deze hydraulische randvoorwaarden wordt uitgevoerd.

Het resultaat van de berekeningen is gegeven in Tabel 5.1 en Figuur 5.1. De methode blijkt nog redelijk te voldoen zolang de golven klein zijn, maar bij de zwaarst aangevallen dijken (HA1, VL1 en VL2) geeft de methode een grote onderschatting van het niveau. Voor die dijken is de hydraulische belasting door de golfloop zo groot dat de overgang naar gras heel hoog gelegd moet worden. Het doortrekken van de harde bekleding tot $z_{2\%}/2$ is dan kennelijk niet toereikend.

Geconcludeerd moet worden dat deze methode niet geschikt is.

Case	$h_{P_{max}}$ (m+NAP)	H_{m0} (m)	$h_{P_{max}} + H_{m0}/2$ (m+NAP)	$h_{P_{max}} + z_{2\%}/2$ (m+NAP)	$z_{voldoet}$ (m+NAP)	fout (m)
ED 1	5,51	0,88	5,95	6,17	6,30	-0,13
ED 2	5,51	1,05	6,04	6,30	6,40	-0,10
ED 3	5,51	1,23	6,13	6,43	6,40	0,03
ED 4	5,51	1,40	6,21	6,57	6,40	0,17
ED 5	5,51	1,58	6,30	6,70	6,40	0,30
HA 1	4,62	2,45	5,84	6,49	7,60	-1,11
HA 2	4,62	1,47	5,35	5,74	5,40	0,34
HA 3	4,62	1,72	5,48	5,93	5,45	0,48
HA 4	4,62	1,96	5,60	6,12	5,50	0,62
HA 5	4,62	2,21	5,72	6,30	5,45	0,85
LM	4,74	2,14	5,80	6,19	5,65	0,54
OS	5,64	1,94	6,61	7,16	6,70	0,46
VL 1	4,93	2,55	6,20	7,60	9,30	-1,70
VL 2	5,18	2,70	6,53	7,99	10,00	-2,01

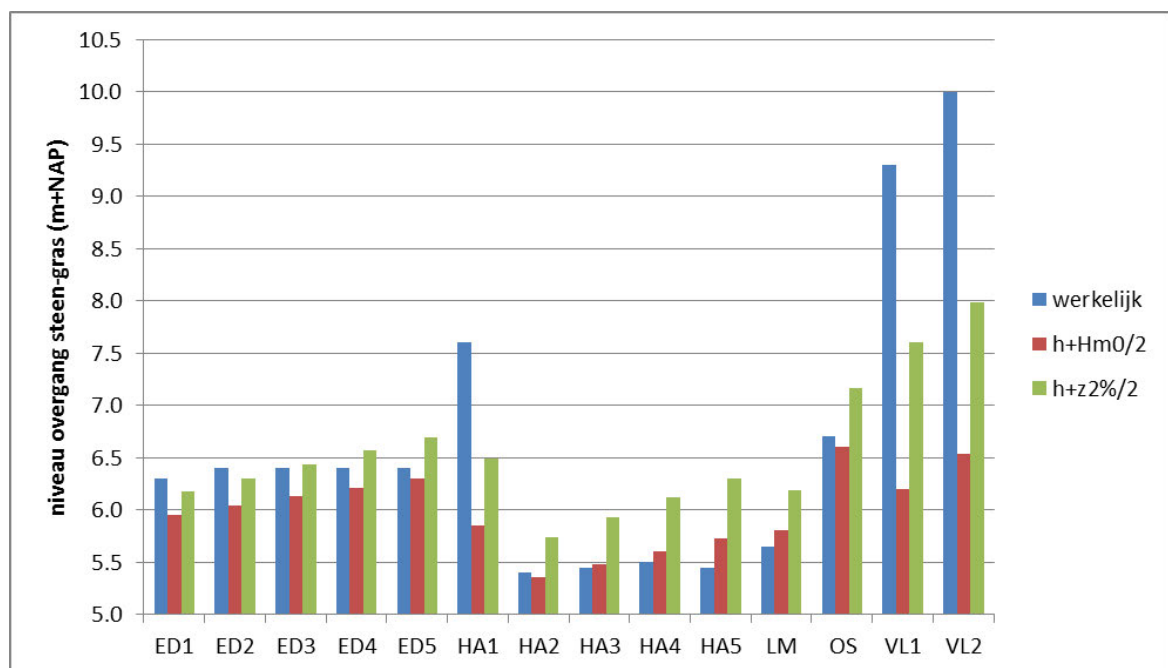
Tabel 5.1 Niveau vanaf waar het gras voldoet volgens het Handboek (CUR 1992) en volgens de huidige probabilistische berekeningen

In de tabel zijn de volgende variabelen gebruikt:

$h_{P_{max}}$ = waterstand met overschrijdingskans gelijk aan maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (P_{max}) (m+NAP)

$z_{voldoet}$ = niveau vanaf waar de faalkans van de grasbekleding kleiner is dan P_T volgens de probabilistische berekeningen (m+NAP)

fout = verschil tussen niveau waar gras voldoet volgens het Handboek en volgens de probabilistische berekeningen (m)



Figuur 5.1 Het niveau vanaf waar gras voldoet volgens het Handboek (CUR 1992) en het werkelijk benodigde niveau (huidige probabilistische berekeningen)

5.1.2 Technisch Rapport Steenzettingen

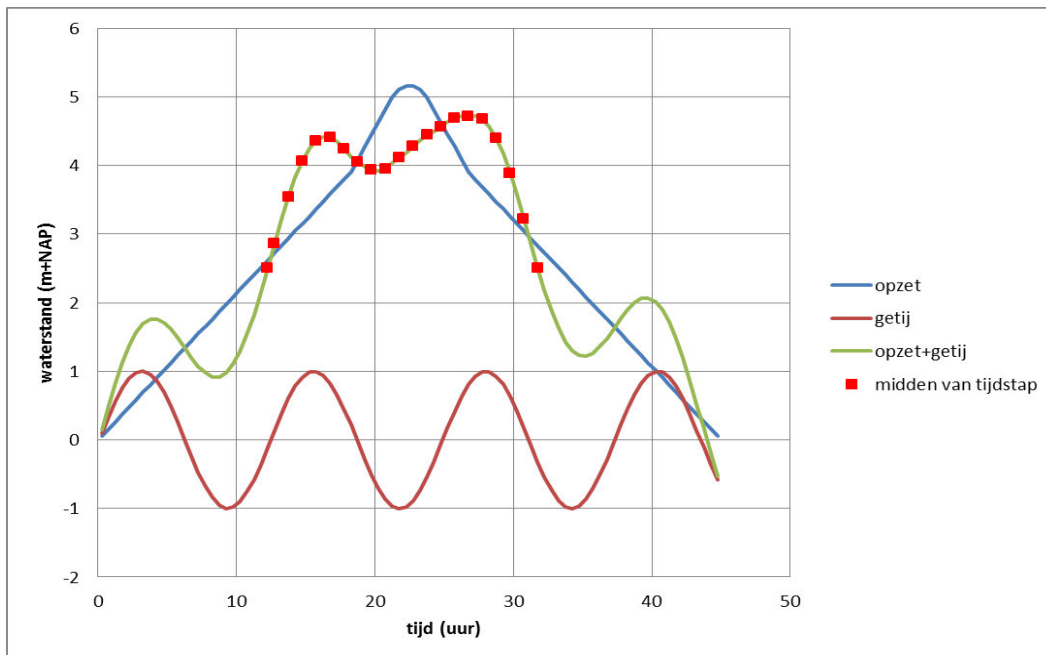
Het Technisch Rapport Steenzettingen (TAW 2002) stelt dat de overgang van de harde bekleding naar het gras kan worden gelegd op een halve golfhoogte boven het niveau waar het voldoet volgens de berekeningen met het golfloopmechanisme.

Om dit te controleren zijn de cases nagerekend met de golfcondities en ontwerpwaterstand met overschrijdingskans gelijk aan de maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau P_{Max} .

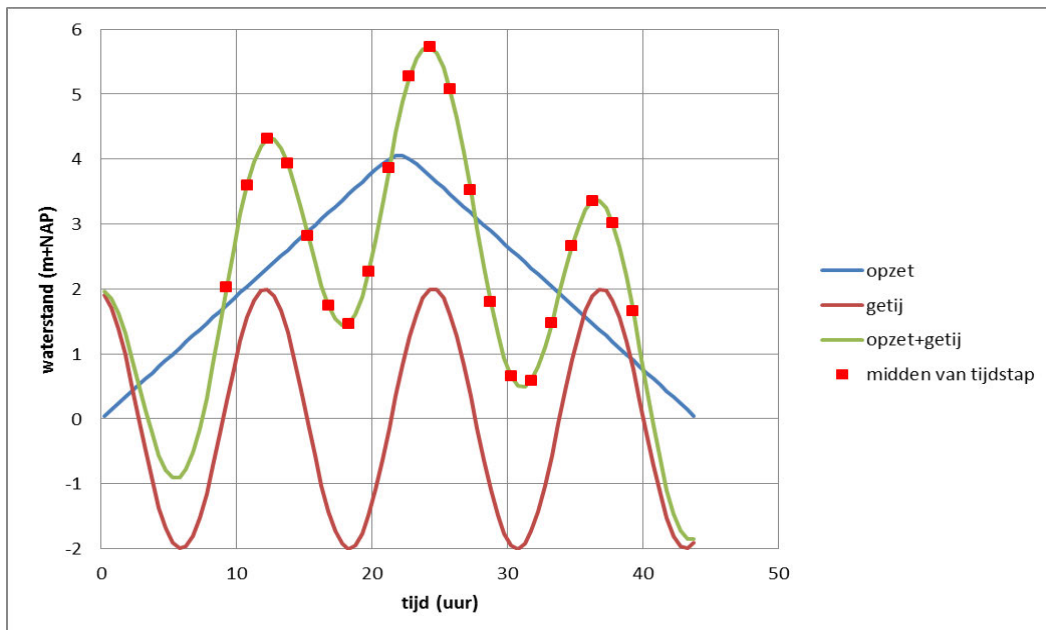
De eerste stap is het berekenen van het niveau vanaf waar er geen schade meer optreedt als gevolg van het golfloopmechanisme. Daartoe zijn de formules gebruikt uit bijlage A.2. Deze formules zijn toepasbaar voor een vaste waterstand en constante golfcondities. Om het te kunnen toepassen bij een variërende waterstand en golfcondities tijdens een storm, is de storm opgedeeld in korte periodes van 1 à 1,5 uur met in elk van deze periodes een vaste waterstand en constante golfcondities.

De gekozen waterstanden in de tijdstappen van 1 uur voor de Lauwersmeerdijk zijn gegeven in Figuur 5.2 (rode blokjes). De tijdstappen aan het begin van de storm en aan het eind van de storm, waarbij de waterstand lager is dan ongeveer NAP+2,5 m, zijn weggelaten, omdat deze geen bijdrage geven aan de erosie van het gras in de beschouwde zone.

Voor de locaties Eemshaven – Delfzijl en Harlingen zijn tijdstappen van 1 uur gekozen op vergelijkbare wijze als gegeven in Figuur 5.2. Voor de locaties Ossensisse en Vlissingen was het nodig om een grotere periode door te rekenen en zijn daarom tijdstappen van 1,5 uur gekozen, zie Figuur 5.3.

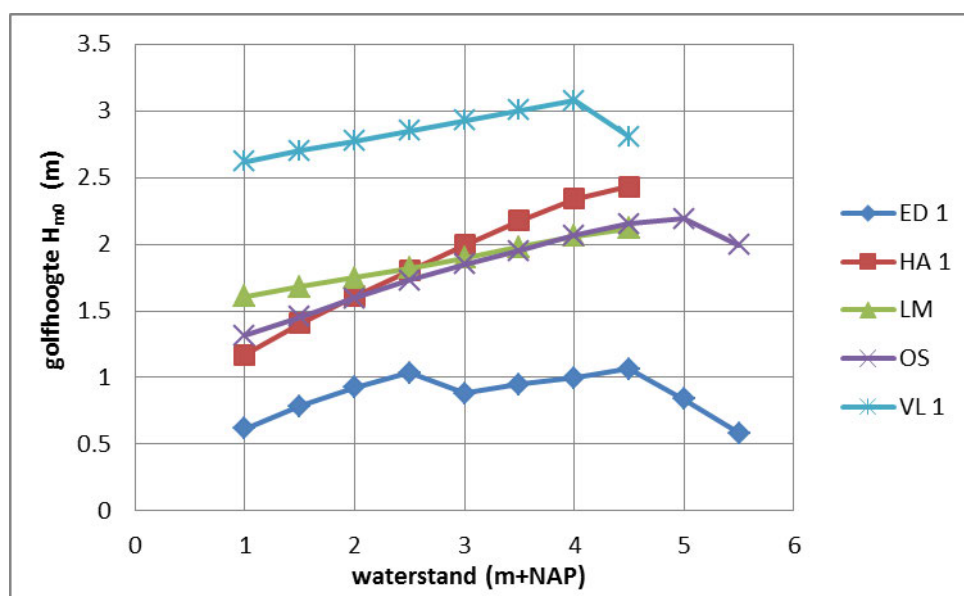


Figuur 5.2 Waterstandsverloop Lauwersmeerdijk en gekozen waterstanden in de tijdstappen van 1 uur



Figuur 5.3 Waterstandsverloop Vlissingen en gekozen waterstanden in de tijdstappen van 1,5 uur

De golfcondities variëren met de waterstand gedurende de storm. Deze golfcondities zijn bepaald met Hydra-K (illustratiepunt bekledingen: golfcondities bij overschrijdingskans P_{Max} bij gegeven waterstanden). De resulterende golfhoogtes voor $P_{Max} = 1/1000$ zijn voor een aantal cases gegeven in Figuur 5.4.



Figuur 5.4 Significante golffoogte als functie van de waterstand bij overschrijdingskans van 1/1000 (illustratiepunt bekledingen uit Hydra-K)

De resultaten van de berekeningen zijn te vinden in Tabel 5.2 en Figuur 5.5. De resultaten zijn een stuk beter voor de cases met grote golven (HA1, VL1 en VL2) dan volgens het Handboek (CUR 1992). Er is echter nu een onderschatting voor de cases met kleine golven (ED1 – ED4 en HA1). Bij case HA4, HA5, LM, OS, VL1 en VL2 overschat deze methode de benodigde hoogte flink.

Geconcludeerd moet worden dat ook deze methode niet goed genoeg is.

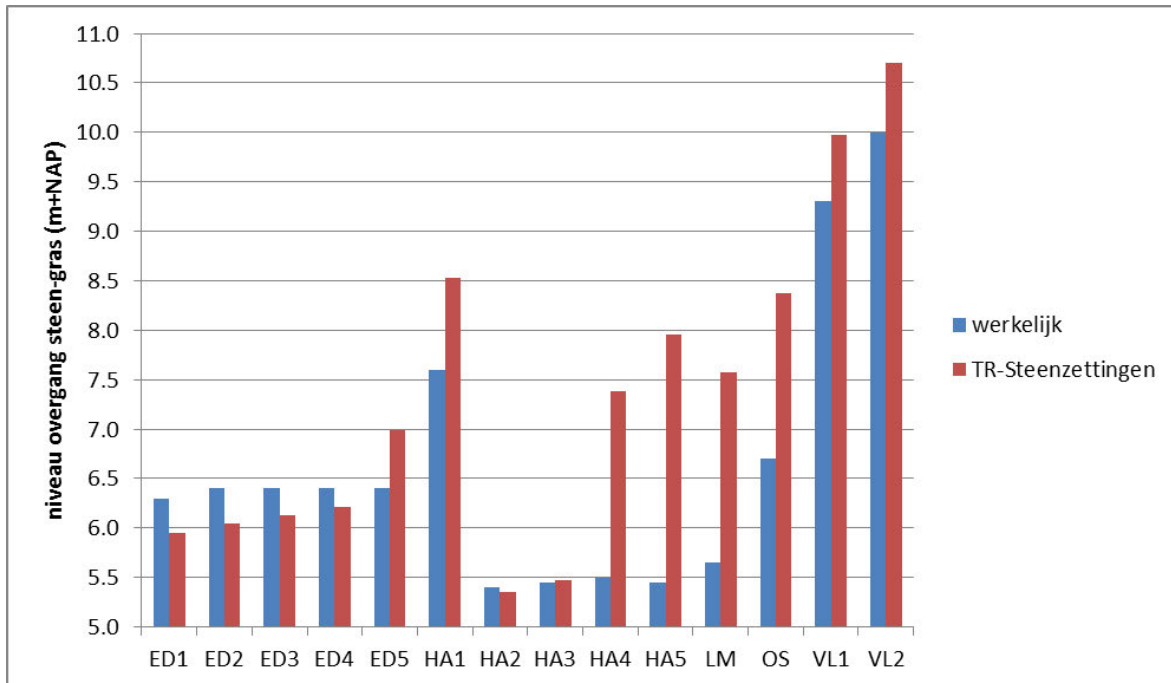
Case	$h_{P_{max}}$ (m+NAP)	H_{m0} (m)	Z_{oploop} (m+NAP)	$Z_{oploop} + H_{m0}/2$ (m+NAP)	$Z_{voldoet}$ (m+NAP)	fout (m)
ED 1	5,51	0,88	5,51	5,95	6,30	-0,35
ED 2	5,51	1,05	5,51	6,04	6,40	-0,36
ED 3	5,51	1,23	5,51	6,13	6,40	-0,27
ED 4	5,51	1,40	5,51	6,21	6,40	-0,19
ED 5	5,51	1,58	6,20	6,99	6,40	0,59
HA 1	4,62	2,45	7,30	8,53	7,60	0,93
HA 2	4,62	1,47	4,62	5,35	5,40	-0,05
HA 3	4,62	1,72	4,62	5,48	5,45	0,03
HA 4	4,62	1,96	6,40	7,38	5,50	1,88
HA 5	4,62	2,21	6,85	7,95	5,45	2,50
LM	4,74	2,14	6,50	7,57	5,65	1,92
OS	5,64	1,94	7,40	8,37	6,70	1,67
VL 1	4,93	2,55	8,70	9,97	9,30	0,67
VL 2	5,18	2,70	9,35	10,7	10,00	0,70

Tabel 5.2 Niveau vanaf waar het gras voldoet volgens het TR-Steenzettingen en volgens de huidige probabilistische berekeningen

$h_{P_{max}}$ = waterstand met overschrijdingskans gelijk aan maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (P_{max}) (m+NAP)

Z_{oploop} = niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de formules voor het golfoploop-mechanisme bij golfcondities met overschrijdingskans P_{max} (m+NAP)

Z_{voldoet} = niveau vanaf waar de faalkans van de grasbekleding kleiner is dan P_T volgens de probabilistische berekeningen (m+NAP)
 fout = verschil tussen niveau waar gras voldoet volgens het TR-Steenzettingen en volgens de probabilistische berekeningen (m)



Figuur 5.5 Het niveau vanaf waar gras voldoet volgens het TR-Steenzettingen (TAW 2002) en het werkelijk benodigde niveau (huidige probabilistische berekeningen)

5.1.3 Ontwerpinstrumentarium OI-2014v3

In het Ontwerpinstrumentarium OI-2014v3 (RWS 2015) is vermeld dat de hoogte tot waar de harde bekledingen moet doorlopen berekend moet worden met de waterstand en golfcondities bij HBN. Daarmee wordt het illustratiepunt bedoeld bij het faalmechanisme golfoverslag, die ook gegeven worden door Hydra-K. Verder moet de werkwijze gehanteerd worden conform het Technisch Rapport Steenzettingen (2002).

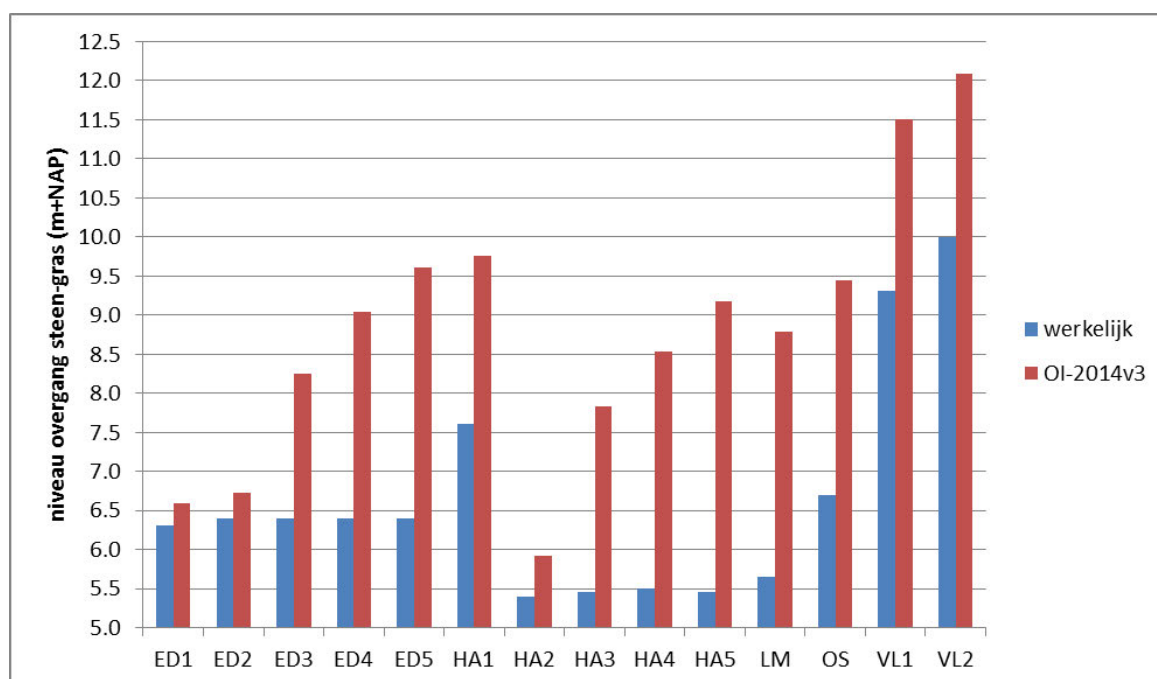
De waterstanden en golfcondities bij HBN zijn voor alle cases vermeld in Tabel 4.1. Met deze hydraulische randvoorwaarden en de formules voor het golfploopmechanisme zijn alle cases doorgerekend op dezelfde wijze als in de vorige paragraaf. Het resultaat is gegeven in Tabel 5.3 en Figuur 5.6.

Geconcludeerd moet worden dat deze methode goed werkt bij kleine golven (case ED1, ED2 en HA2), maar bij de andere cases een flinke overschatting geeft van het niveau en daardoor overdreven veilig is.

Case	h_{HBN} (m+NAP)	$H_{\text{m0, HBN}}$ (m)	Z_{oploop} (m+NAP)	$Z_{\text{oploop}} + H_{\text{m0}}/2$ (m+NAP)	Z_{voldoet} (m+NAP)	fout (m)
ED 1	5,96	1,29	5,95	6,60	6,30	0,30
ED 2	5,96	1,55	5,95	6,72	6,40	0,32
ED 3	5,96	1,81	7,35	8,25	6,40	1,85
ED 4	5,96	2,07	8,00	9,03	6,40	2,63
ED 5	5,96	2,32	8,45	9,61	6,40	3,21
HA 1	5,07	2,81	8,35	9,76	7,60	2,16
HA 2	5,07	1,69	5,07	5,91	5,40	0,51
HA 3	5,07	1,97	6,85	7,84	5,45	2,39
HA 4	5,07	2,25	7,40	8,53	5,50	3,03
HA 5	5,07	2,53	7,90	9,17	5,45	3,72
LM	5,26	2,48	7,55	8,79	5,65	3,14
OS	5,96	2,49	8,20	9,44	6,70	2,74
VL 1	5,14	3,42	9,80	11,51	9,30	2,21
VL 2	5,36	3,56	10,30	12,08	10,00	2,08

Tabel 5.3 Niveau vanaf waar het gras voldoet volgens het OI-2014-v3 en volgens de huidige probabilistische berekeningen

- h_{HBN} = waterstand voor het ontwerpen van de kruinhoogte van de dijk (HBN) (m+NAP)
 Z_{oploop} = niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de formules voor het golfoploop-mechanisme bij hydraulische randvoorwaarden voor het ontwerpen van de kruinhoogte (m+NAP)
 Z_{voldoet} = niveau vanaf waar de faalkans van de grasbekleding kleiner is dan P_T volgens de probabilistische berekeningen (m+NAP)
fout = verschil tussen niveau waar gras voldoet volgens het OI-2014v3 en volgens de probabilistische berekeningen (m)



Figuur 5.6 Het niveau vanaf waar gras voldoet volgens het OI-2014v3 (RWS 2015) en het werkelijk benodigde niveau (huidige probabilistische berekeningen)

5.1.4 Voorlopige beoordelingsmethode voor WBI-2017

In het kader van de ontwikkeling van het wettelijk beoordelingsinstrumentarium WBI-2017 is in 2015 het volgende voorlopige voorstel opgesteld voor het bepalen van de hoogte van de overgang:

- Neem als grens tussen de golfklapzone en golfoploopzone het “toetspeil-plus-één-decimeringshoogte”.
- Bereken onder deze grens of het gras in staat is de golfklappen te weerstaan. Is dat zo, dan voldoet het gras op het gehele talud.
- Is dat niet zo, dan moet met het toetspeil en de daarbij behorende golven berekend worden vanaf welk niveau het gras in staat is de belasting door golfoploop te weerstaan (met een overschrijdingskans gelijk aan de norm). Dat niveau, eventueel met veiligheidsmarge, is bepalend voor het niveau vanaf waar het gras voldoet.

Deze voorlopige methode gaat vervangen worden door de methode die resulteert uit de huidige studie.

Deze methode is toegepast op de in dit rapport behandelde cases. Voor het toetspeil is de waterstand gekozen met overschrijdingskans gelijk aan de trajectnorm (P_{max}) uit de marginale statistiek uit Hydra-K. Deze overschrijdingskans P_{max} wordt voor de gedetailleerde toetsing van alle dijkbekledingen in het WBI-2017 gebruikt, zowel voor het toetspeil als de golfcondities.

Case	$h_{P_{max}}$ (m+NAP)	h_{dec} (m)	Z_{oploop} (m+NAP)	Z_{WBI} (m+NAP)	$Z_{voldoet}$ (m+NAP)	fout (m)
ED 1	5,51	0,63	5,51	6,14	6,30	-0,16
ED 2	5,51	0,63	5,51	6,14	6,40	-0,26
ED 3	5,51	0,63	5,51	6,14	6,40	-0,26
ED 4	5,51	0,63	5,51	6,14	6,40	-0,26
ED 5	5,51	0,63	6,20	6,20	6,40	-0,20
HA 1	4,62	0,45	7,30	7,30	7,60	-0,30
HA 2	4,62	0,45	4,62	5,07	5,40	-0,33
HA 3	4,62	0,45	4,62	5,07	5,45	-0,38
HA 4	4,62	0,45	6,40	6,40	5,50	0,90
HA 5	4,62	0,45	6,85	6,85	5,45	1,40
LM	4,74	0,50	6,50	6,50	5,65	0,85
OS	5,64	0,62	7,40	7,40	6,70	0,70
VL 1	4,93	0,54	8,70	8,70	9,30	-0,60
VL 2	5,18	0,54	9,35	9,35	10,00	-0,65

Tabel 5.4 Niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de voorlopige beoordelingsmethode voor WBI-2017 en volgens de huidige probabilistische berekeningen

De marginale statistiek voor de waterstanden is ook gebruikt voor het bepalen van de decimeringshoogte (waterstandverschil bij 10 maal kleinere overschrijdingskans). Het resultaat is gegeven in Tabel 5.4. In deze tabel staat ook het niveau vanaf waar het gras voldoet bij een belasting bij een waterstand op toetspeil (Z_{oploop}) en het resulterende niveau van de overgang volgens deze voorlopige beoordelingsmethode (Z_{WBI}). Dat laatste is als volgt berekend:

$$z_{WBI} = \max(h_{p_{\max}} + h_{\text{deci}} ; z_{\text{oploop}}) \quad (5.2)$$

Met:

z_{WBI} = benodigde niveau van de overgang van de harde bekleding naar gras volgens de voorlopige beoordelingsmethoden van WBI-2017 (m)

$h_{p_{\max}}$ = waterstand met overschrijdingskans gelijk aan maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (P_{\max}) (m+NAP)

h_{deci} = decimeringshoogte (m)

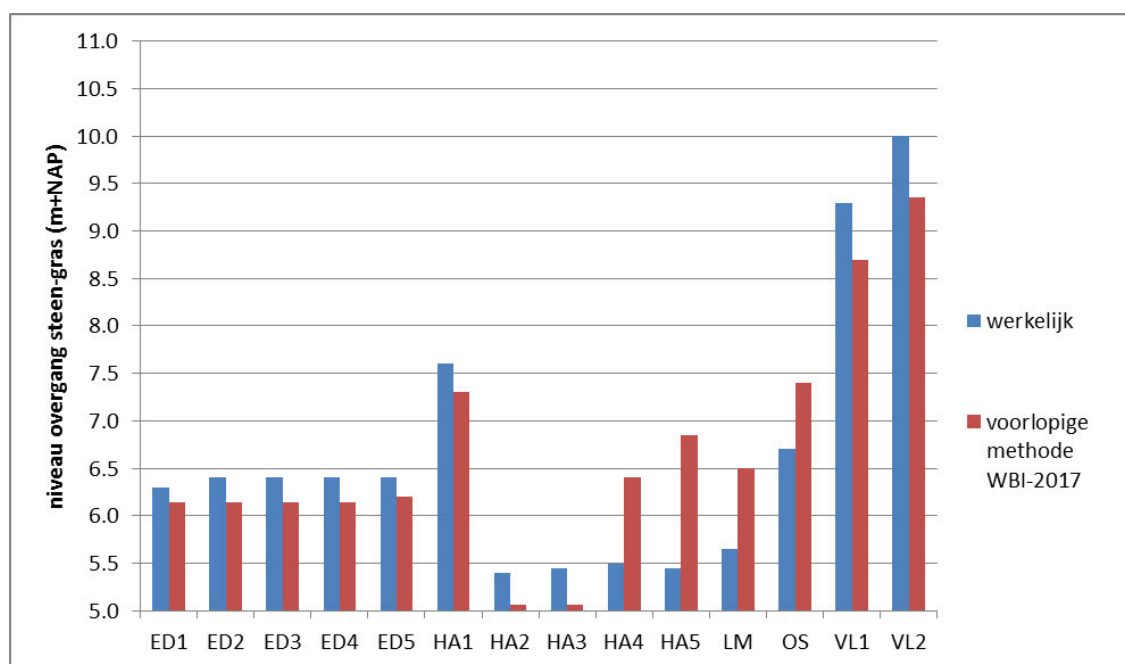
z_{oploop} = niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de formules voor het golfoploopmechanisme bij hydraulische randvoorwaarden voor het ontwerpen van de kruin hoogte (m+NAP)

Verder zijn de volgende variabelen gebruikt in deze tabel:

z_{voldoet} = niveau vanaf waar de faalkans van de grasbekleding kleiner is dan P_T volgens de probabilistische berekeningen (m+NAP)

fout = verschil tussen niveau waar gras voldoet volgens het OI-2014v3 en volgens de probabilistische berekeningen (m)

Het blijkt dat deze methode bij de meeste cases iets te laag zit (zie ook Figuur 5.7), maar niet veel. Voorlopig lijkt deze methode beter dan die is opgenomen in het OI-2014v3 (zie vorige paragraaf).



Figuur 5.7 Het niveau vanaf waar gras voldoet volgens de voorlopige beoordelingsmethode voor WBI-2017 en het werkelijk benodigde niveau (huidige probabilistische berekeningen)

5.2 Afleiding ontwerpmethode

5.2.1 Inleiding

Uit het narekenen van de resultaten van de probabilistische berekeningen met de diverse methodes uit het verleden is gebleken dat de methode van het Technisch Rapport Steenzettingen (2002) en de voorlopige beoordelingsmethoden voor WBI-2017 het minste afwijken. De basis voor deze methodes, namelijk het niveau waar volgens de formules voor het golfploopmechanisme het gras voldoet, is denkend vanuit de fysica een logische keuze.

Voor de berekeningen aan het golfploopmechanisme wordt gebruik gemaakt van de waterstand en golfcondities bij de maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau: P_{max} . Het is gebruikelijk om alle typen dijkbekledingen hiermee te dimensioneren en dit sluit ook aan op de toetsmethode WBI-2017, die ook in de gedetailleerde toetsing met deze hydraulische randvoorwaarden wordt uitgevoerd.

Dat er uiteindelijk $H_{m0}/2$ bij het berekende niveau volgens de formules voor het golfploopmechanisme moet worden opgeteld, is volgens het TR-steenzettingen om enige veiligheidsmarge te verkrijgen, mede vanwege de lagere sterkte en hogere belasting bij de overgang. Voor het WBI-2017 is echter besloten dat deze invloed van grotere belasting en kleinere sterkte niet in rekening hoeft te worden gebracht, enerzijds omdat de kennis hierover nog onvoldoende is ontwikkeld en anderzijds vanwege het gevoel dat de formules voor het golfploopmechanisme al aan de veilige kant zijn. Daarom wordt in de huidige ontwerp-methode een andere veiligheidsmarge gekozen. Dit wordt in paragraaf 5.2.3 toegevoegd nadat een geschikte methode is afgeleid.

5.2.2 Afleiding semi-probabilistische rekenmethode

Naast het niveau waarbij het gras ten aanzien van golfploop voldoet, wordt voor het afleiden van de semi-probabilistische rekenmethode gebruikgemaakt van de constatering dat gras maar een zeer beperkte golfhoogte kan weerstaan in de golfklapzone. Die zone bevindt zich in de zone tussen de actuele stilwaterlijn en ongeveer H_{m0} eronder. De belasting van de golfklappen grijpt namelijk net onder de waterlijn aan, zoals al genoemd was in paragraaf 4.2 (zie ook Figuur 2.1) (Klein Breteler e.a. 2012).

Op de meeste locaties langs de zoute wateren en grote meren is de golfhoogte zodanig groot dat gras snel bezwijkt zodra het onder de waterlijn komt tijdens een storm.

In lijn hiermee is bij de analyse van de resultaten van de probabilistische berekeningen geconstateerd dat het gras nauwelijks lager kan beginnen dan de waterstand bij de maximaal toelaatbare faalkans van graserosie in de beschouwde doorsnede (/jaar), P_T . Daarom wordt ervoor gekozen om ook deze waterstand op te nemen in de ontwerp-methode.

Het gebruiken van de hydraulische belasting met overschrijdingskans P_T is bijzonder voor dijkbekledingen. Alle typen bekledingen worden getoetst en ontworpen met de hydraulische belastingen bij P_{max} . Het is echter onvermijdelijk om hiervan af te wijken, omdat het gras niet goed in staat is om golfklappen te weerstaan en de zone waar golfklappen optreden volledige gecorreleerd is met de waterstand. Als de golven groot zijn, kan er geen gras toegepast worden tot het niveau waar de waterstand kan komen binnen de gestelde faalkansruimte.

Ook in de voorlopige beoordelingsmethode voor WBI-2017 was onderkend dat de waterstand bij kleinere overschrijdingskans dan P_{\max} in de ontwerpmethodiek moet worden opgenomen. Daar was gekozen voor een waterstand die een decimeringshoogte hoger ligt dan $h_{P_{\max}}$. Dat bleek in paragraaf 5.1.4 echter niet voldoende te zijn.

Het is dus belangrijk om zowel het golfloopmechanisme als het golfklapmechanisme in de ontwerpmethodiek op te nemen. De meest eenvoudige wijze is als volgt:

$$z_{\text{overgang}} = \max(h_{PT}; z_{\text{oploop}, P_{\max}}) \quad (5.3)$$

Met:

z_{overgang} = niveau vanaf waar gras kan worden toegepast op het buitentalud (m+NAP)

P_{\max} = maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (/jaar)

P_T = maximaal toelaatbare faalkans van graserosie in de beschouwde doorsnede (/jaar)

h_{PT} = waterstand met overschrijdingskans van P_T (m+NAP)

$z_{\text{oploop}, P_{\max}}$ = niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de semi-probabilistische formules voor het golfloopmechanisme bij golfcondities met overschrijdingskans P_{\max} (m+NAP)

In deze formule moet $z_{\text{oploop}, P_{\max}}$ bepaald worden, en dat was ook al het geval de oude methodes van TR-steenzettingen en OI-2014v3, behalve dat in het OI-2014v3 de randvoorwaarden bij HBN werden beschouwd. Het enige wat nu toegevoegd is, is dat ook h_{PT} bepaald moet worden.

Hier worden voor $z_{\text{oploop}, P_{\max}}$ de waterstand en golfcondities gehanteerd bij P_{\max} (en niet P_T), omdat de formules uit bijlage A2 zijn gekalibreerd op die randvoorwaarden. Bij de waterstand en golfcondities met overschrijdingskans P_{\max} sluit het resultaat van de formules aan op de juiste faalkans van de grasbekleding.

Het resulterende niveau voor de overgang volgens formule (5.3) (z_{overgang}) en volgens de probabilistische berekeningen (z_{voldoet}) is gegeven in Tabel 5.5 en Figuur 5.8.

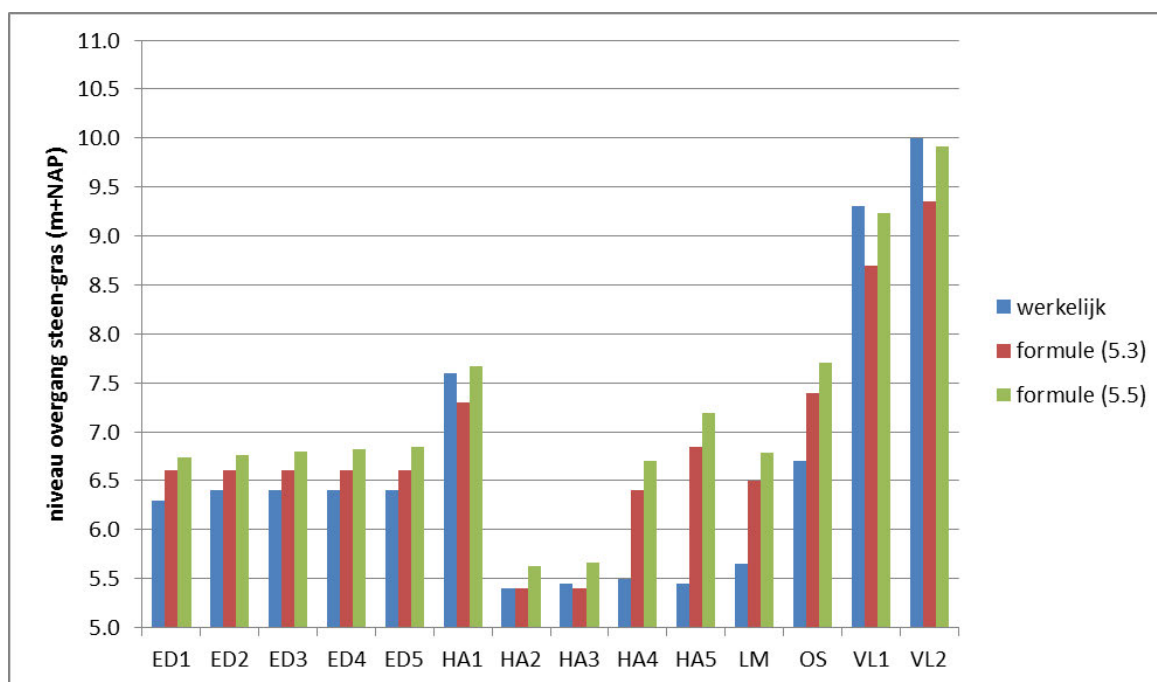
Case	$h_{P_{\max}}$ (m+NAP)	h_{PT} (m+NAP)	$z_{\text{oploop}, P_{\max}}$ (m+NAP)	z_{voldoet} (m+NAP)	formule (5.3)		formule (5.5)	
					z_{overgang} (m+NAP)	fout (m)	z_{overgang} (m+NAP)	fout (m)
ED 1	5,51	6,61	5,51	6,30	6,61	0,31	6,74	0,44
ED 2	5,51	6,61	5,51	6,40	6,61	0,21	6,77	0,37
ED 3	5,51	6,61	5,51	6,40	6,61	0,21	6,79	0,39
ED 4	5,51	6,61	5,51	6,40	6,61	0,21	6,82	0,42
ED 5	5,51	6,61	6,20	6,40	6,61	0,21	6,85	0,45
HA 1	4,62	5,40	7,30	7,60	7,30	-0,30	7,67	0,07
HA 2	4,62	5,40	4,62	5,40	5,40	0,00	5,63	0,23
HA 3	4,62	5,40	4,62	5,45	5,40	-0,05	5,67	0,22
HA 4	4,62	5,40	6,40	5,50	6,40	0,90	6,70	1,20
HA 5	4,62	5,40	6,85	5,45	6,85	1,40	7,19	1,74
LM	4,74	5,62	6,50	5,65	6,50	0,85	6,79	1,14
OS	5,64	6,80	7,40	6,70	7,40	0,70	7,70	1,00
VL 1	4,93	5,90	8,70	9,30	8,70	-0,60	9,24	-0,06
VL 2	5,18	6,14	9,35	10,00	9,35	-0,65	9,91	-0,09

Tabel 5.5 Niveau vanaf waar het gras voldoet volgens formule (5.3) en formule (5.5) en volgens de huidige probabilistische berekeningen

In de tabel is te zien dat de formule niet altijd een veilig resultaat oplevert, want bij case HA1, VL1 en VL2 is er sprake van een significante onderschatting. De onderschatting bij HA3 is in de orde grootte van de nauwkeurigheid van de berekeningen en kan daarom verwaarloosd worden.

Maar in feite hoeft de formule niet altijd een veiliger resultaat op te leveren dan de probabilistische berekeningen. Afwijkingen op doorsnedeniveau (naar boven en naar beneden) zijn toegestaan binnen de overstromingskansbenadering. De overstromingskansnormen hebben immers betrekking op hele trajecten, niet op individuele doorsneden. Er wordt weliswaar gesteld dat er voldaan moet worden aan een “faalkanseis op doorsnedeniveau” maar eigenlijk is dat een ongelukkige term. Het gaat hier namelijk niet om een eis waar met bijv. 95% zekerheid aan voldoen moet worden, maar om een doelkans waar *gemiddeld* aan voldaan moet worden. Afwijkingen in de faalkansen op doorsnedeniveau (naar boven naar beneden) zijn toegestaan. Dit heeft ermee te maken dat we feitelijk alleen over een eis op *trajectniveau* beschikken; verschillen in de faalkansen van doorsneden die “wegmiddelen” zijn dus toegestaan.

Gemiddeld voldoet de bovenstaande formule goed en daarom is dit acceptabel.



Figuur 5.8 Het niveau vanaf waar gras voldoet volgens formule (5.3) en formule (5.5) en het werkelijk benodigde niveau (huidige probabilistische berekeningen)

Vanuit de fysica redenerend is het overigens ook logisch dat deze formule goed voldoet. Bij deze grote golven is het logisch dat er enerzijds voor gezorgd moet worden dat de overgang hoger ligt dan de waterstand h_{PT} , om te voorkomen dat de faalkans door golfklappen te groot wordt. Anderzijds levert de formule voor het golfloopmechanisme, inclusief de gebruikelijke parameterwaarden, bij de hydraulische randvoorwaarden bij P_{max} de juiste beoordeling van het gras in de olopzone.

De overschatting bij HA4 en HA5 kan verklaard worden door HA2 t/m HA5 te beschouwen, waarbij de golfhoogte stap-voor-stap is verhoogd. In case HA2 t/m HA5 zijn de faalkansen voor het golfloopmechanisme volgens de probabilistische berekeningen kleiner dan P_T (zie bijvoorbeeld Figuur D.17), maar volgens de semi-probabilistische berekeningen is er al wel

een aanzienlijke invloed van het golfploopmechanisme. Bij HA1 is de faalkans van het golfploopmechanisme in de probabilistische berekeningen groot genoeg om mee te tellen (zie Figuur D.11) en wordt $z_{voldoet}$ plotseling een stuk groter. Dat maakt dat bij het vergroten van de golfhoogte een vrij plotselinge verandering in het resultaat ontstaat. Dit is erg moeilijk in een eenvoudige ontwerpmethodode op te nemen. Waarschijnlijk is een vergelijkbaar probleem de oorzaak van de overschatting bij LM en OS.

Gezien deze constatering kan in de praktijk op de volgende manier beoordeeld worden of het zinnig is om volledig probabilistische berekeningen uitvoeren voor het bepalen van de benodigde hoogte van de overgang. Als het golfploopmechanisme maatgevend is, terwijl dat niet het geval is bij een ongeveer 20% lagere golfhoogte, zal een probabilistische berekening mogelijk een beduidend lagere waarde van het benodigde niveau van de overgang geven. Het kan dan lonen om een probabilistische berekening uit te voeren.

Geconcludeerd wordt dat formule (5.3) geschikt is voor de ontwerpmethodiek.

Voor bovenstaande formule is in feite uitgegaan van de situatie met behoorlijk grote golven waarvoor geldt dat de belasting door het golfklapmechanisme te zwaar is voor het gras. Dat vloeit voort uit het feit dat de probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd voor locaties met een vrij grote golfhoogte. Als de golfhoogte klein is, is het denkbaar dat het gehele talud met gras bekleed kan worden. Daardoor moet bovenstaande methode als volgt aangevuld worden:

- Bereken of het gras het golfklapmechanisme kan weerstaan bij een hydraulische belasting met overschrijdingskans van P_T . Als dat zo is, dan kan gras op het gehele talud worden toegepast.
- Zo niet, dan kan het minimale niveau van de overgang van de harde bekleding naar gras berekend worden met formule (5.3).

In het verleden was het de gewoonte om te denken in een golfklapzone en een golfploopzone. Bij grote golven is gras niet toepasbaar in de golfklapzone en moet de overgang van de harde bekleding naar gras dus minstens boven de golfklapzone worden gelegd. Als vanuit die optiek gekeken wordt naar bovenstaand resultaat, dan kan als uitleg bij deze methode gesteld worden dat de grens tussen de golfklapzone en de golfploopzone ligt op het niveau h_{PT} (zoals echter eerder in het rapport is gesteld, geldt eigenlijk dat er geen harde grens is tussen het golfklapmechanisme en het golfploopmechanisme, omdat beide mechanismen elkaar niet uitsluiten).

In Hydra-K worden de hydraulische randvoorwaarden gegeven voor diverse herhalingstijden (= 1/overschrijdingskans), maar wellicht niet precies bij P_{max} en P_T . Tussenvallende waarden kunnen berekend worden door lineair te interpoleren met log(herhalingstijd):

$$x_T = \frac{(x_2 - x_1)}{\log(T_2) - \log(T_1)} (\log(T) - \log(T_1)) + x_1 \quad (5.4)$$

Met:

- x_T = waarde bij herhalingstijd T
- x_1 = waarde bij herhalingstijd T_1
- x_2 = waarde bij herhalingstijd T_2
- T, T_1, T_2 = herhalingstijd

De probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd met loodrechte golfaanval en een talud van 1:4 zonder berm. Gezien de wijze waarop het resultaat tot stand gekomen is, is het naar alle waarschijnlijkheid ook toepasbaar op andere taludhellingen en situaties met scheve

golfaanval en wellicht ook op taluds met een berm. Dat komt omdat er een fysisch verklaarbare methode is opgesteld.

Een belangrijke basis voor de probabilistische berekeningen is de actuele rekenmethode voor gras (standtijdlijnenmodel voor het golfklapmechanisme en cumulatieve overbelastingsmethode voor het golfploopmechanisme). Als deze rekenmethodes in de toekomst aangepast worden, zal dit naar verwachting een zeer beperkte invloed hebben op de hier aanbevolen wijze om de hoogte van de overgang te bepalen. Wijzigingen geven namelijk zowel in de probabilistische berekeningen een verandering als ook in de semi-probabilistische berekeningen, die beide waarschijnlijk in dezelfde orde van grootte liggen, waardoor nog steeds de hier voorgestelde semi-probabilistische rekenmethode goed zal voldoen.

5.2.3 Veiligheidsmarge

Tenslotte kan nog overwogen worden een kleine veiligheidsmarge toe te voegen, als marge aan de sterktekant tussen toetsen en het ontwerpen. Gezien de constatering bij WBI-2017 dat de formules voor het golfploopmechanisme waarschijnlijk aan de veilige kant zijn, is het verstandig de veiligheidsmarge klein te houden.

Gezien het feit dat het fysisch proces gedomineerd wordt door de golfploop, wordt aanbevolen om het golfplooppniveau in de veiligheidsmarge op te nemen. Op basis van engineering judgment is gekozen voor $z_{2\%}/10$, waardoor de ontwerpformule als volgt wordt:

$$z_{\text{overgang}} = \max(h_{PT}; z_{\text{oploop}, P_{\text{max}}}) + z_{2\%} / 10 \quad (5.5)$$

Met:

z_{overgang}	= niveau vanaf waar gras kan worden toegepast op het buitentalud (m+NAP)
P_{Max}	= maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (/jaar)
P_T	= maximaal toelaatbare faalkans van graserosie in de beschouwde doorsnede (/jaar)
h_{PT}	= waterstand met overschrijdingskans van P_T (m+NAP)
$z_{\text{oploop}, P_{\text{max}}}$	= niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de formules voor het golfploopmechanisme bij golfcondities met overschrijdingskans P_{max} (m+NAP)
$z_{2\%}$	= golfploop ten opzichte van de waterlijn die door 2% van golven wordt overschreden bij golfcondities met overschrijdingskans P_{max} (m)

De waarde van $z_{2\%}/10$ varieert in de cases van 0,13 m (ED1) tot 0,56 m (VL2). In Tabel 5.5 en Figuur 5.8 zijn ook de berekende hoogtes volgens formule (5.5) te zien. In de tabel en de figuur is te zien dat de cases VL1 en VL2 met deze formule nog slechts marginaal onderschat worden. Deze onderschatting ligt in de orde van grootte van de nauwkeurigheid van de berekeningen.

Het toevoegen van deze veiligheidsmarge geeft een kleine robuustheid aan de ontwerpwaarde van de hoogte van de overgang naar gras. Het zorgt er ook voor dat een volledig probabilistische berekening iets lager uitkomt dan de semi-probabilistische berekening. In de praktijk zal dat als logisch ervaren worden.

Het is echter te overwegen om deze veiligheidsmarge toch niet toe te voegen, omdat dit aspect van de waterkering gemakkelijk uitbreidbaar is. Als in de toekomst vastgesteld wordt dat het toch nodig is de hoogte van de overgang wat hoger te leggen, dan is het aanleggen van een extra strookje harde bekleding relatief gemakkelijk.

In overleg met Rijkswaterstaat en andere belanghebbende partijen kan een beslissing genomen worden over het al dan niet toevoegen van deze veiligheidsmarge.

6 Uitbreiding ontwerpmethodede voor toepassing op meerdijken

6.1 Hydraulische randvoorwaarden

6.1.1 Algemeen

Voor het uitbreiden van de ontwerpmethodede voor toepassing op meerdijken zijn probabilistische berekeningen gemaakt voor het bepalen van de hoogte van de overgang op drie locaties langs het IJsselmeer en Markermeer (zie ook Figuur 2.12):

- Urk
- Edam
- Enkhuizen

Voor deze locaties zijn (i) tijdsverlopen van golfcondities nodig voor de Monte Carlo analyse alsook (ii) hydraulische belastingen (HR) benodigd voor de validatie van de semi probabilistische rekenregel. In deze paragraaf wordt beschreven op welke wijze deze informatie is verkregen voor meerdijken.

De afleiding van zowel de tijdsverlopen als de hydraulische randvoorwaarden is voor meerdijken uitgevoerd met Hydra-Zoet versie 1.6.3. Dit is het op dit moment vigerende instrument voor de afleiding Hydraulische Randvoorwaarden voor de dijken langs de meren. Voor een nadere toelichting van de werking van Hydra-Zoet, alsmede uitgangspunten en beperkingen wordt verwezen naar HKV (2012).

Hoewel de locaties van de doorgerekende meerdijken zijn gespecificeerd, moeten deze toch gezien worden als fictieve gevallen. De berekeningen zijn namelijk uitgevoerd zonder invloed van klimaatverandering of bodemdaling in rekening te brengen en er is in alle gevallen gerekend met loodrechte golfaanval en een taludhelling van 1:4 zonder berm. Verder zijn deze dijken ook doorgerekend met kunstmatig verhoogde/verlaagde golfcondities.

6.1.2 Beschouwde locaties en herhalingstijden

De tijdsverlopen en hydraulische randvoorwaarden zijn afgeleid voor een drietal locaties langs de meren. De locaties zijn zodanig gekozen dat er sprake is van ofwel een sterke correlatie tussen waterstand en wind (Urk) ofwel een zwakke correlatie tussen waterstand en wind (Enkhuizen/Edam). Dit onderscheid wordt gemaakt omdat verwacht wordt dat deze correlatie van invloed kan zijn op de resultaten van de probabilistische berekening alsook de hieruit volgende ontwerpmethodede.

Locatie nummer	Locatie naam
1	DR07 IJsselmeer hmp 22.3 Urk
2	DR13 IJsselmeer dijk 16 hmp 13.3 Enkhuizen
3	30 Zuidpolder Edam

Tabel 6.1 Beschouwde locaties bij bepaling Hydraulische Randvoorwaarden voor de Meren

De beschouwde locaties zijn vermeld in Tabel 6.1. Verder zijn de hydraulische randvoorwaarden voor verschillende herhalingstijden afgeleid. De beschouwde herhalingstijden zijn

500, 1000, 5000, 10000 en 20000 jaar. Deze herhalingsstijden zijn ook gebruikt voor het bepalen van de tijdsverlopen zoals beschreven in hiernavolgende paragraaf.

6.1.3 Afleiding tijdreeksen op basis van statistiek van waterstand en windrichting

De probabilistische berekeningen vragen om een verloop van waterstand en golfcondities gegeven een trekking uit de gehanteerde stochasten. Het belastingmodel voor de meren bestaat in theorie uit windsnelheid (voorwaardelijk per windrichting) en meerpeil, welke respectievelijk een zogenaamde snelle en trage stochast zijn. Hoewel het nabouwen van dit probabilistisch model de voorkeur heeft is dit niet mogelijk binnen dit project. Er wordt daarom op een pragmatische wijze een probabilistisch model opgezet dat op vereenvoudigde wijze het volledig probabilistische model simuleert.

De gedachte is om te rekenen met 1 stochast (voorwaardelijk per windrichting) en op deze wijze een benadering (proxy) te creëren voor het volledig probabilistische model. In eerste instantie is gekozen voor het hanteren van de marginale statistiek (voorwaardelijk per windrichting) van de lokale waterstand. De gedachte is om met het volledige probabilistische model (Hydra-Zoet) de statistiek van de waterstand af te leiden en vervolgens per windrichting vast te stellen welke combinatie van windsnelheid en meerpeil tot deze realisatie heeft geleid (illustratiepunt). Bij een trekking van de waterstand en windrichting in de proxy wordt het illustratiepunt behorende bij deze waterstand gebruikt om de windsnelheid en meerpeil bij deze trekking vast te stellen. Vervolgens worden deze windsnelheid en meerpeil gebruikt om via de beschikbare database (fysica) een tijdverloop van waterstand en golfcondities af te leiden. Het zo werken met het illustratiepunt is een benadering die goed werkt zolang er (i) een behoorlijke correlatie is tussen de variabelen of (ii) het in de proxy te hanteren faalmechanisme gedomineerd wordt door waterstand (en niet door golven).

Merk op dat bij het hanteren van de marginale statistiek van de waterstand als stochast in de proxy geen gewicht wordt gegeven aan golfhoogte: de proxy kijkt in deze gevallen alleen naar situaties die leiden tot hoge waterstanden (en de meest waarschijnlijke bijbehorende golfcondities). De onderliggende aanname is dan dat het faalmechanisme waarnaar gekeken wordt volledig waterstandsafhankelijk is (en niet afhankelijk van golfcondities). Dit is voor de hier uitgevoerde beschouwing niet zonder meer correct en derhalve is in de volgende paragraaf een methode beschreven waarbij op basis van statistiek van benodigde kruinhoogte (HBN) de tijdverlopen van waterstand en golfcondities zijn bepaald en een methode op basis van de marginale statistiek van waterstand en golven. Effectief wordt er nu uit een deelverzameling van combinaties getrokken welke tot een hoge waterstand leiden: dit zijn niet noodzakelijkerwijs dezelfde combinaties die tot een hoge golfbelasting leiden (een hoge waterstand kan immers ook door enkel verhoogd meerpeil worden gerealiseerd zonder een bijzonder extreme windsnelheid en dus golven).

Een stapsgewijze toelichting voor deze werkwijze wordt onderstaand gepresenteerd:

Vorbereiding

- Bepaal per windrichting het meerpeil en windsnelheid in illustratiepunt bij waterstanden met herhalingsstijden 500, 1000, 5000, 10000 en 20000
- Bepaal de kansbijdrage per windrichting
- Construeer tabel A met meerpeil als functie van windrichting en waterstand
- Construeer tabel B met windsnelheid als functie van windrichting en waterstand

Per trekking

- Trek waterstand en windrichting
- Bepaal op basis van interpolatie in tabel A het meerpeil
- Bepaal op basis van interpolatie in tabel B de windsnelheid
- Bepaal op basis van bijdrage meerpeil of tijdreeks wind of meerpeil gedomineerd is
- Bepaal waterstand als functie van tijd (meerpeil of wind gedomineerd)
- Interpoleer voor getrokken windrichting en gevonden windsnelheid de golfcondities als functie van tijd

Deze methode legt veel gewicht bij het optreden van een hoge waterstand. Bij de interpretatie van de resultaten in paragraaf 6.3 zal blijken dat dit een goede keuze is voor Urk, omdat hier een hoge waterstand samengaat met hoge golven en dus een zware belasting van het gras. Voor Edam en Enkhuizen blijkt de correlatie tussen waterstand en golven te klein te zijn voor deze methode. Voor deze locaties zijn er bij een lage waterstand veel hogere golven bij een bepaalde overschrijdingskans dan bij een hoge waterstand. Bij hoge waterstanden zijn de golven soms zo klein dat er zelfs geen schade ontstaat door het golfklapmechanisme. Bij lage waterstanden daarentegen, is de golfhoogte zo groot dat het golfoploopmechanisme tot hoog op het talud nog schade kan veroorzaken.

Dit aspect komt beter naar voren bij een iets andere opzet van de probabilistische berekeningen. Dit is eerst geprobeerd op basis van de statistiek van HBN omdat hierbij in het faalmechanisme een weging van zowel waterstand als golfcondities wordt meegenomen (zie bijlage F), maar dat leverde niet de gewenste resultaten. Daarom is als alternatief gebruik gemaakt van de marginale statistiek van waterstanden en golven, zoals beschreven in de volgende paragraaf.

6.1.4 Afleiding tijdreeksen op basis van marginale statistiek van waterstand en golven

Als terugvaloptie is gebruikgemaakt van de marginale statistiek van waterstand en de marginale statistiek van de golfhoogte, gericht op de locaties aan de westkant van het IJsselmeer en Markermeer. Het uitgangspunt bij deze locaties is dat de hydraulische randvoorwaarden meerpeil gedomineerd zijn en daardoor de waterstand en golfcondities bij benadering statistisch onafhankelijk zijn. Een hoge waterstand wordt op deze locaties bepaald door een hoog meerpeil, resulterend uit een hoge IJsselafvoer en geringe lozingsmogelijkheden richting Waddenzee. De golfcondities worden door de wind worden veroorzaakt en zijn (bij benadering) onafhankelijk van het meerpeil. In werkelijkheid is er echter wel enige afhankelijkheid, omdat de wind via scheefstand/opwaaiing ook invloed heeft op de waterstand. Dat aspect wordt hier verwaarloosd.

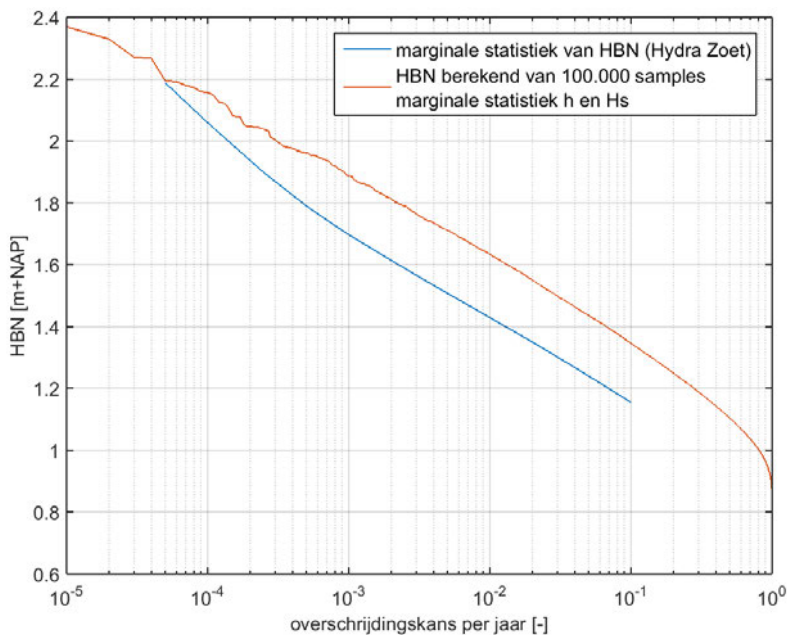
Aannemende dat de waterstand en de golfhoogte statistisch onafhankelijk zijn, kan voor de probabilistische berekeningen gebruikgemaakt worden van de marginale statistiek van waterstanden en golfhoogtes. In de Monte Carlo simulaties is per sample steeds een waterstand getrokken en een golfhoogte getrokken uit de verdelingen zoals berekend met Hydra-Zoet.

Deze methode levert enerzijds een wat hogere faalkans op, omdat er uitgegaan wordt van de statistiek van waterstanden en golven, gericht op de hoogste gebeurtenis per jaar. Er is maar een kleine kans dat de hoogste waterstand in een jaar samenvalt met de hoogste golven in een jaar. Voor Edam en Enkhuizen geldt echter dat de golfhoogte met overschrijdingskans van 1/10 per jaar slechts 15 à 20 cm lager is dan de golfhoogte met overschrijdingskans van 1/1000 per jaar (zie Figuur 6.10). Deze methode geeft dus wel een overschatting van de

faalkans, maar de invloed op berekende faalkansen zal relatief klein zijn omdat de golfhoogte niet sterk afhankelijk is van de overschrijdingskans.

Anderzijds zal deze methode een onderschatting geven van de faalkans omdat er geen tijdsintegratie over het jaar is uitgevoerd: het feit dat er meerdere stormgebeurtenissen kunnen optreden gedurende één meerpeil gebeurtenis wordt hier verwaarloosd (snelle versus trage stochast). Verwacht wordt dat het niet gedetailleerd uitwerken van de tijdsintegratie leidt tot een iets kleinere onderschatting dan de overschatting zoals hierboven beschreven. Netto betekent dit dat er mogelijk sprake is van een overschatting.

Dit is geverifieerd door met de proxy de kansverdeling van het HBN te reconstrueren. Het resultaat van zo'n berekening voor Enkhuizen1 is te zien in Figuur 6.1. Hieruit blijkt dat de Monte Carlo simulatie op basis van getrokken waterstand en golfhoogte inderdaad een lichte overschatting geeft van de belasting. De rode lijn (Monte Carlo simulatie) ligt namelijk iets hoger dan de blauwe lijn (Hydra-Zoet). Het verschil is niet groot: orde 20 cm, afnemend naar 0 cm bij zeer kleine overschrijdingskans.



Figuur 6.1 Waarde van het HBN (benodigde kruinhoogte met 1 l/s/m golfoverslag) als functie van de overschrijdingskans volgens Hydra-Zoet (blauwe lijn) en berekend op basis van de realisaties van de getrokken waterstanden en golfhoogtes in de Monte Carlo simulatie (rode lijn) voor Enkhuizen1

Vorbereiding

- Bepaal de marginale statistiek van waterstanden (h_{\max}) en maximale significante golfhoogte ($H_{m0,\max}$)
- Bepaal de golfsteilheid op de betreffende locatie (verwachtingswaarde en standaardafwijking)

Per trekking

- Trek een waterstand, een significante golfhoogte en een golfsteilheid
- Bepaal waterstand als functie van tijd (meerpeil gedomineerd)
- Bereken de golfperiode op basis van de getrokken significante golfhoogte en golfsteilheid ($T_{m-1,0} \approx T_p(1,1)$).

6.1.5 Hydraulische randvoorwaarden per faalmechanisme

Met behulp van Hydra-Zoet versie 1.6.3 zijn eveneens de Hydraulische Randvoorwaarden afgeleid welke als input dienen voor het opstellen van de semi-probabilistische ontwerpmethod. Hiertoe zijn illustratiepunten afgeleid voor de voor de norm relevante herhalingsjeden (1000, 44444 en 66667 jaar) voor verschillende grootheden. De illustratiepunten zijn de meest waarschijnlijke condities, gegeven de statistische grootheid. Het gaat hierbij om de volgende grootheden/statistiek:

Marginale statistiek waterstand

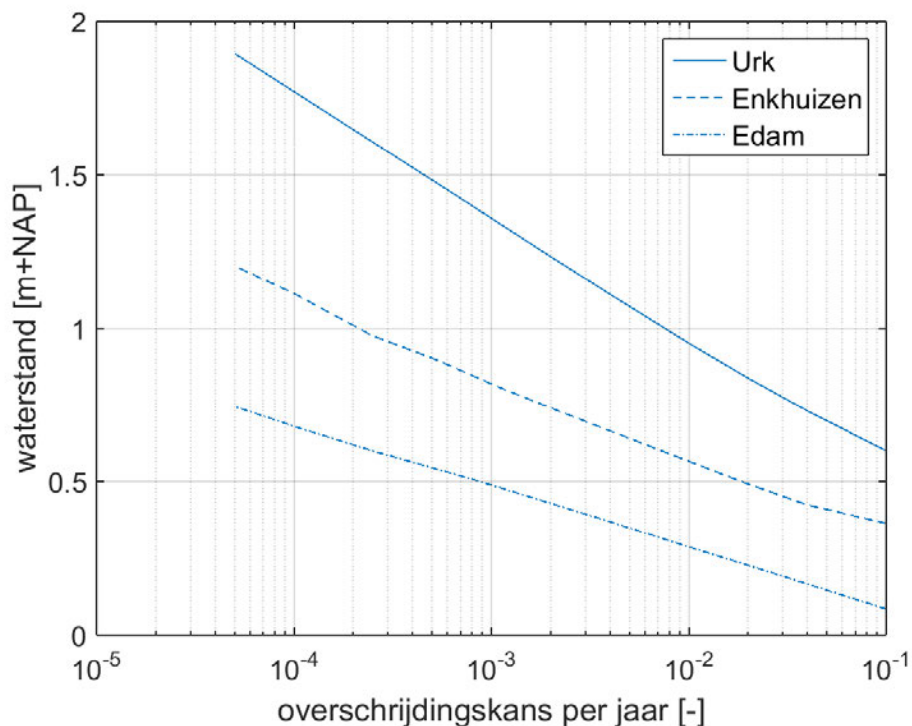
De marginale statistiek van de lokale waterstand is afgeleid, waarbij ook de illustratiepunten zijn afgeleid. Het resultaat is te zien in Figuur 6.2.

Illustratiepunten bekledingen

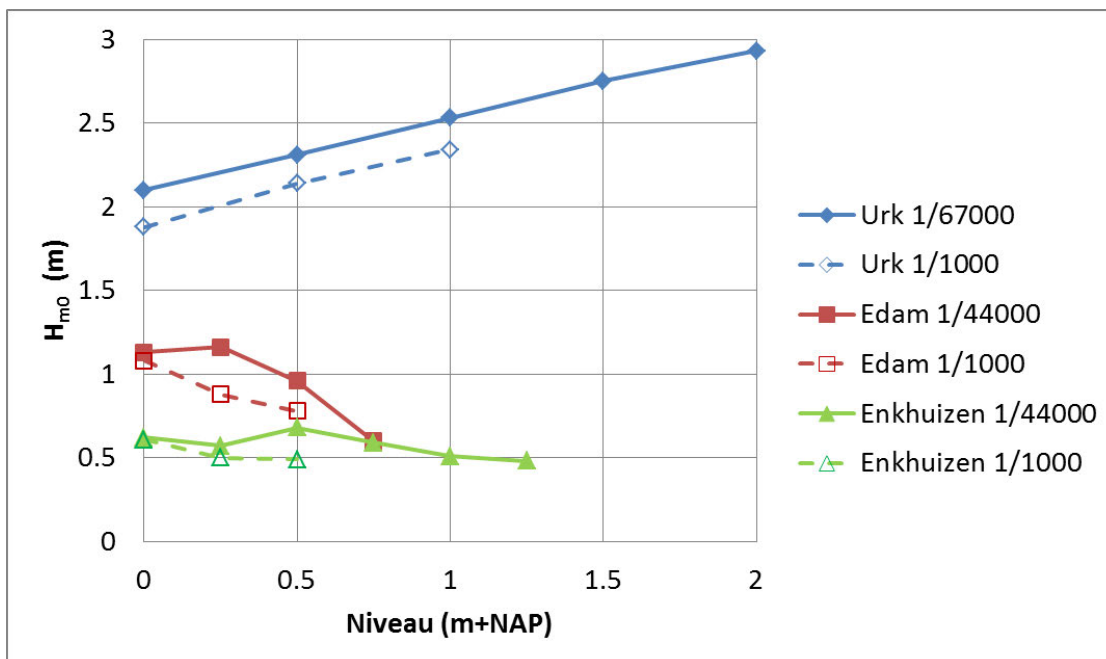
Tot slot zijn de illustratiepunten afgeleid voor bekledingen:

- Urk: voor niveau's van 0,0 m+NAP tot en met 2,0 m+NAP met stappen van 0,5 m
- Edam: voor niveau's van 0,0 m+NAP tot en met 0,75 m+NAP met stappen van 0,25 m
- Enkhuizen: voor niveau's van 0,0 m+NAP tot en met 1,25 m+NAP met stappen van 0,25 m

Hierbij is gebruik gemaakt van weegfactoren 1 voor golfhoogte en golfperiode, en een weegfactor van 0 voor golfrichting. Dit impliceert een even grote bijdrage van golfhoogte en golfperiode aan de belasting voor bekledingen en een onafhankelijkheid van de golfrichting. De resulterende golfhoogte als functie van het niveau is te zien in Figuur 6.3 (zie ook Tabel 6.5 t/m Tabel 6.7).



Figuur 6.2 Waterstand als functie van de overschrijdingskans (marginale statistiek Hydra-Zoet)



Figuur 6.3 Significante golfhoogte als functie van het niveau op de dijk bij overschrijdingskans P_{max} en P_T (Q-variant in Hydra-Zoet) voor case Urk1, Edam1 en Enkhuizen1.

6.2 Resultaten van probabilistische berekeningen

Voor de drie locaties zijn op dezelfde wijze als voor de zeedijken 9 cases doorgerekend. De maatgevende waterstanden bij P_{max} en P_T zijn voor de drie locaties gegeven in Tabel 6.2. Voor deze locaties zijn berekeningen uitgevoerd met de golfcondities volgens Hydra-Zoet, en er zijn op basis daarvan per locatie twee kunstmatige cases doorgerekend:

- Urk1: golfcondities volgens Hydra-Zoet
- Urk2: golfhoogte van Urk1 vermenigvuldigd met 0,7, en golfperiode van Urk1 vermenigvuldigd met $\sqrt{0,7}$, zodat de golfsteilheid hetzelfde is als bij Urk1
- Urk3: golfhoogte van Urk1 vermenigvuldigd met 0,5, en golfperiode van Urk1 vermenigvuldigd met $\sqrt{0,5}$, zodat de golfsteilheid hetzelfde is als bij Urk1
- Edam1: golfcondities volgens Hydra-Zoet
- Edam2: golfhoogte van Edam1 vermenigvuldigd met 1,3, en golfperiode van Edam1 vermenigvuldigd met $\sqrt{1,3}$, zodat de golfsteilheid hetzelfde is als bij Edam1
- Edam3: golfhoogte van Edam1 vermenigvuldigd met 1,6, en golfperiode van Edam1 vermenigvuldigd met $\sqrt{1,6}$, zodat de golfsteilheid hetzelfde is als bij Edam1
- Enkhuizen1: golfcondities volgens Hydra-Zoet
- Enkhuizen2: golfhoogte van Enkhuizen1 vermenigvuldigd met 1,8, en golfperiode van Enkhuizen3 vermenigvuldigd met $\sqrt{1,8}$, zodat de golfsteilheid hetzelfde is als bij de Enkhuizen1
- Enkhuizen3: golfhoogte van Enkhuizen1 vermenigvuldigd met 2,5, en golfperiode van Enkhuizen1 vermenigvuldigd met $\sqrt{2,5}$, zodat de golfsteilheid hetzelfde is als bij de Enkhuizen1

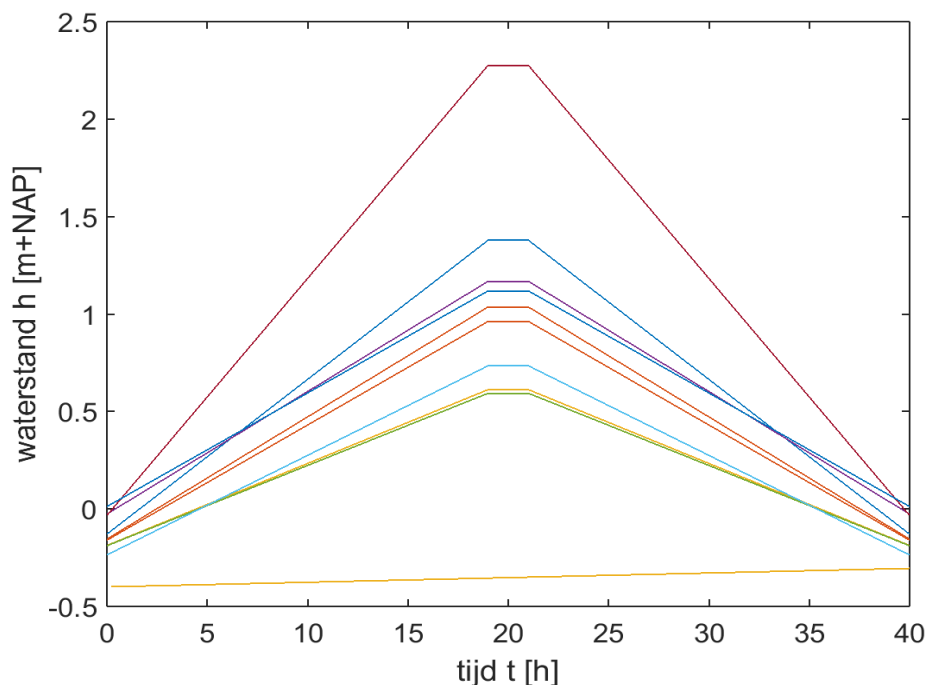
case	Bij overschijdingskans P_{max}		Bij overschijdingskans P_T	
	P_{max} (/jaar)	Waterstand (m)	P_T (/jaar)	Waterstand (m)
Urk	1/1000	1,36	1/67000	2.11
Edam	1/1000	0,49	1/44000	0,82
Enkhuizen	1/1000	0,82	1/44000	1,31

Tabel 6.2 Waterstanden bij een overschrijdingsfrequentie gelijk aan P_{max} en P_T

6.2.1 Probabilistische berekeningen op basis van getrokken waterstand en windrichting

Voor elke case zijn met de Monte Carlo methode (met Importance sampling) duizenden simulaties (samples) doorgerekend, zoals beschreven in paragraaf 2.3, op basis van een trekking van de waterstand en windrichting (zie paragraaf 6.1.3). Van enkele samples van de berekeningen voor Urk is het waterstandsverloop gegeven in Figuur 6.4 en Figuur 6.5. Het valt daarin op dat de meeste stormgedomineerd zijn, maar er zijn ook enkele gevallen bij die meerpeilgedomineerd zijn, waarvan er een is getoond in deze figuren. Ook voor het meerpeil aan het begin van de storm wordt in de simulatie een willekeurige waarde getrokken uit een verdeling en dat is te zien aan de verschillende waterstanden op $t = 0$.

Voor Edam en Enkhuizen geldt dat het steeds meerpeilgedomineerd is, zie het voorbeeld in Figuur 6.6. Meer grafieken van de hydraulische randvoorwaarden zijn te vinden in bijlage D.6 t/m D.10.

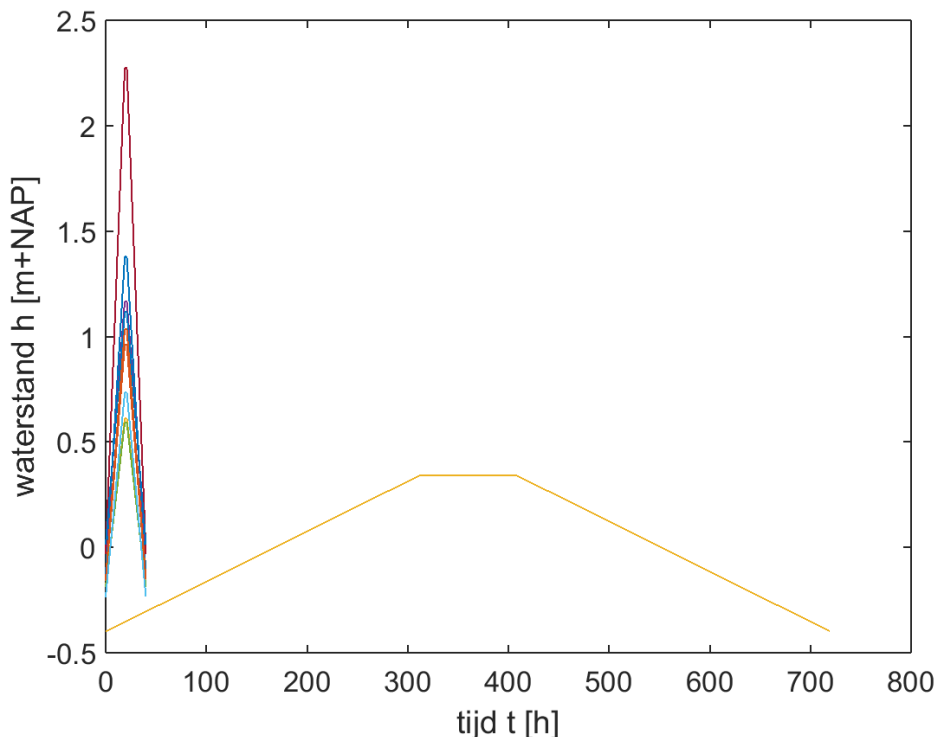


Figuur 6.4 Selectie van waterstandsverlopen in de Monte Carlo simulatie voor Urk (de gele lijn is meerpeilgedomineerd en is volledig weergegeven in Figuur 6.5)

Het resultaat van de probabilistische berekeningen voor Urk1 is gegeven in Figuur 6.7. Net als voor de zeedijken is in deze figuur een blauwe lijn getekend die de faalkans als functie van de hoogte weergeeft als uitsluitend gekeken wordt naar het mechanisme golfoploop. De groene lijn geeft de faalkans als gevolg van het mechanisme golfklap.

Het beeld in deze figuur is weer hetzelfde als voor zeedijken. Het mechanisme golfploop manifesteert zich met name op het bovenste deel van het talud, omdat op het onderste deel van het talud de golven te klein zijn om schade aan het gras door golfploop te geven. Het falen door golfklappen treedt met name op de onderste helft van het talud op, met een naar boven toe steeds kleiner wordende faalkans. De faalkans neemt naar boven toe af omdat ook de kans op het optreden van de waterstand naar boven toe afneemt, hetgeen te zien is aan de zwarte gestreepte lijn.

De rode gestreepte lijn laat zien dat het gras op een niveau van NAP+5,30 m een faalkans heeft van $1,5 \cdot 10^{-5}$ ($=1/67.000$) per jaar. Dat is de faalkans P_T voor deze locatie.



Figuur 6.5 Selectie van waterstandsverlopen in de Monte Carlo simulatie voor Urk

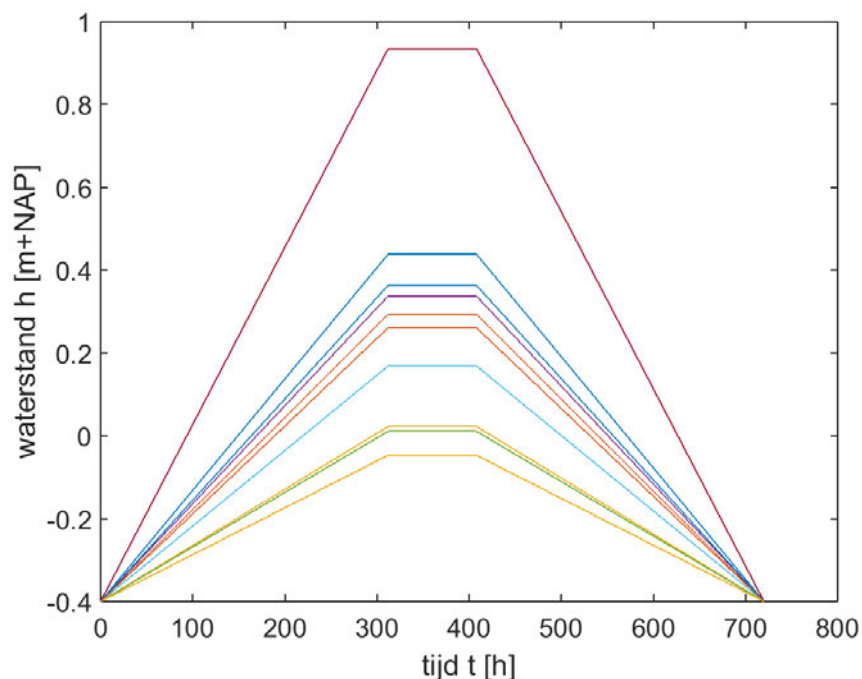
Bij Edam zijn de golven veel lager en dat heeft als gevolg dat de golven niet in staat zijn om met het golfploopmechanisme schade te geven aan het gras, zoals te zien is in Figuur 6.8 (case Edam1). Daar is namelijk geen blauwe lijn te zien, ondanks dat de belastingduur voor deze meerpeilgedomineerde cases maar liefst 720 uur is. Bovendien ligt nu de groene lijn iets lager dan de zwarte gestreepte lijn, hetgeen betekent dat als een hoge waterstand optreedt, het gras op dat niveau niet altijd bezwijkt door de golfklappen. In de Monte Carlo simulatie zijn er ook samples met hoge waterstand, maar zeer lage golven. Volgens de gehanteerde formules (zie bijlage A) faalt het gras niet door golfklappen als de golfhoogte kleiner is dan 0,5 m, ook al is de belastingduur 720 uur.

De rode gestreepte lijn laat zien dat het gras op een niveau van NAP+0,63 m een faalkans heeft van $2,25 \cdot 10^{-5}$ ($=1/44.000$) per jaar. Dat is de faalkans P_T voor deze locatie.

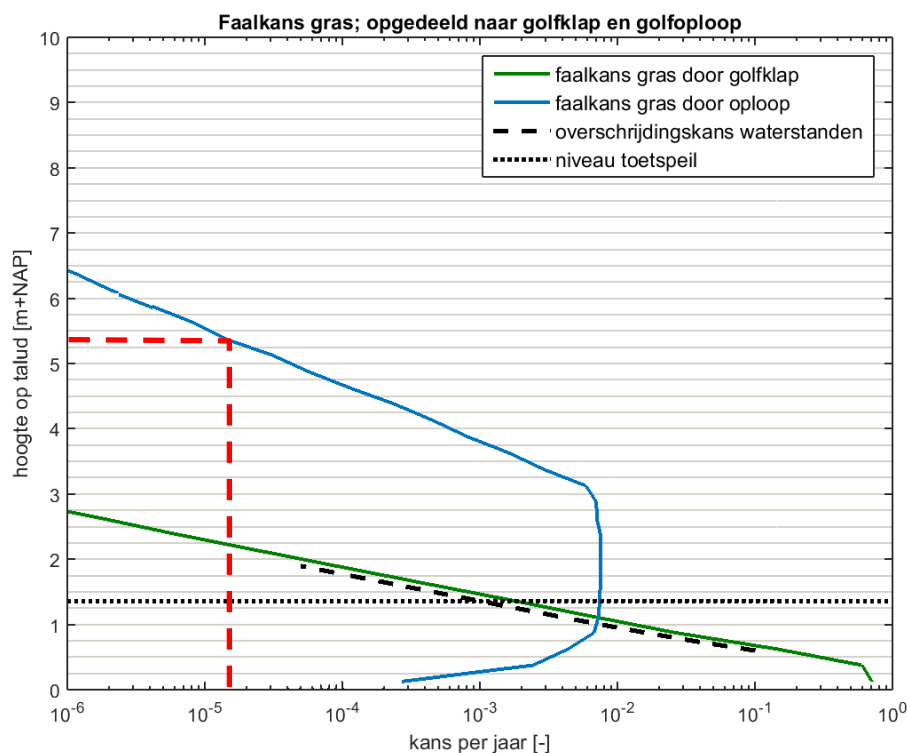
Bij iets hogere golven ontstaat er wel in sommige gevallen schade door golfploop, zoals te zien is aan de blauwe lijn in Figuur 6.9. Het verloop van de blauwe lijn is nogal hoekig omdat er maar een betrekkelijk weinig samples falen ontstond, omdat een hoge waterstand en hoge golfcondities zeer zelden samenvallen.

Om de berekeningen te controleren is Edam2 nogmaals doorgerekend met een andere set samples. Dit leverde iets minder vaak falen door golfploop, maar precies hetzelfde resultaat

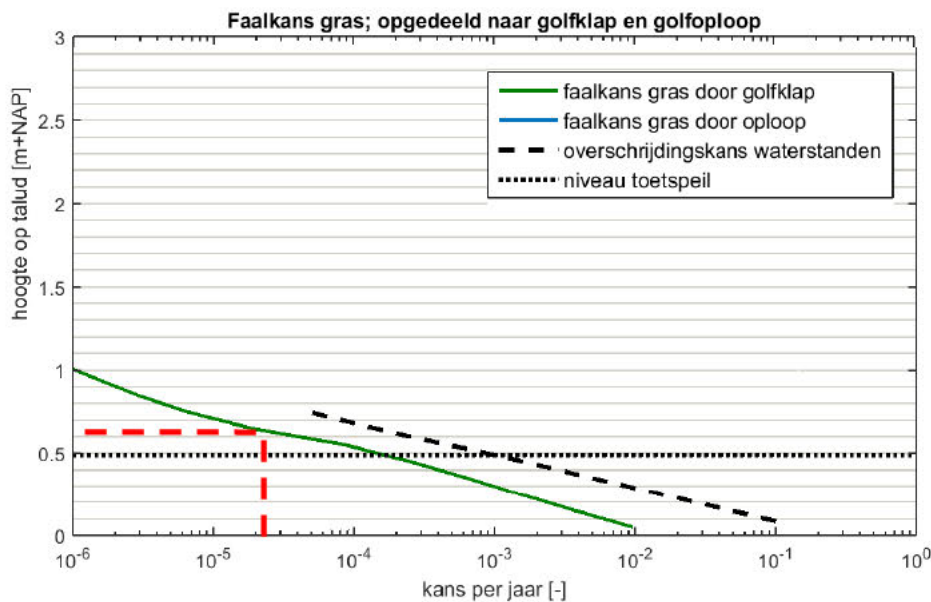
ten aanzien van golfklappen. Ook Enkhuizen2 is nogmaals doorgerekend met een andere set samples (Figuur D.45). Die figuur bleek tot 10^{-5} perfect te reproduceren. Bij een nog kleinere faalkansen was er wel een afwijking, omdat daar één sample met falen ontstond door het golfoploopmechanisme. Dat heeft echter geen invloed op de eindresultaten in Tabel 6.3.



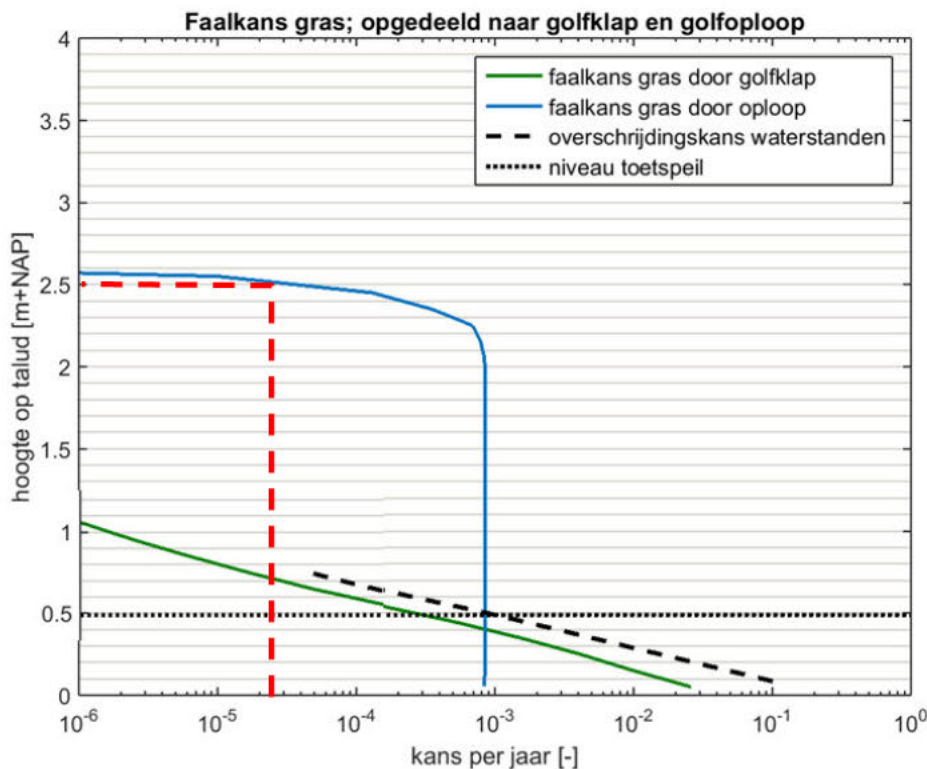
Figuur 6.6 Selectie van waterstandsverlopen in de Monte Carlo simulatie voor Edam



Figuur 6.7 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Urk1)



Figuur 6.8 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Edam1)



Figuur 6.9 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Edam2) (golfoploopmechanisme berekend met 100.000 samples zonder Importance sampling)

Voor de andere cases zijn deze figuren gegeven in bijlage D.6 t/m D.10. In sommige gevallen, zoals Edam2, leverde de Monte Carlo simulatie met 100.000 samples zonder Importance sampling een beter resultaat dan met 10.000 samples en met Importance sampling. In dat geval is het resultaat zonder Importance sampling getoond. De reden van de

lage faalkans bij Importance sampling met het golfploopmechanisme is de afnemende golfhoogte bij toenemende waterstand. Daarop wordt in de volgende paragraaf teruggekomen.

Het golfklapmechanisme werd wel altijd goed berekend met Importance sampling.

De resultaten van de probabilistische berekeningen zijn gegeven in Tabel 6.3. Hierin is ook de minimaal benodigde hoogte van de overgang gegeven als alleen gekeken wordt naar het mechanisme 'golfklappen' (groene lijn in Figuur 6.7) en als alleen gekeken wordt naar het mechanisme 'golploop' (blauwe lijn in Figuur 6.7). De hoogste van beide is maatgevend (zie kolom 'beide').

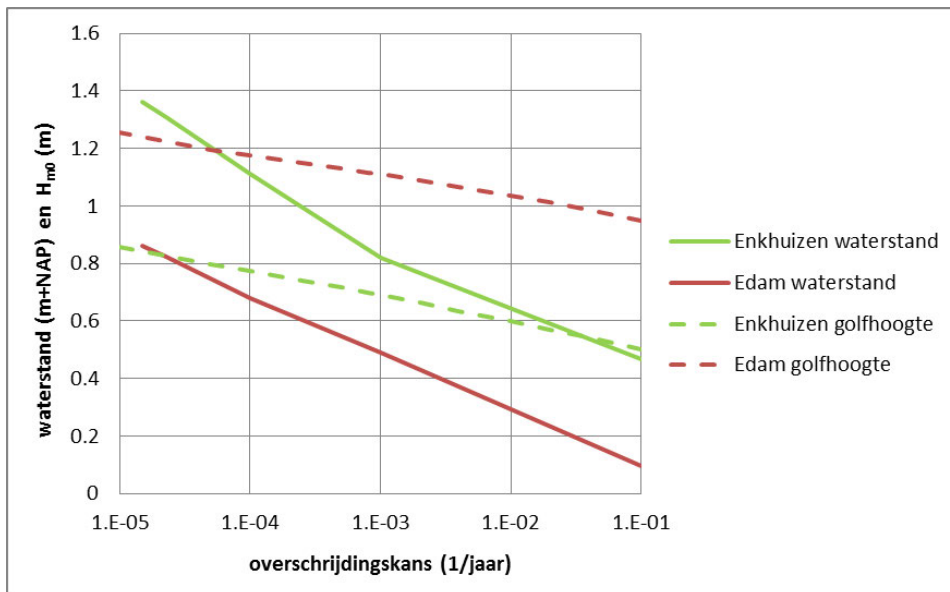
case	P_{\max}	P_T	Factor op H_{m0}	Waterstand		Resultaat probsom		
				bij P_{\max}	bij P_T	golfklap	oploop	beide
	(/j)	(/j)	(-)	(m+NAP)	(m+NAP)	(m+NAP)	(m+NAP)	(m+NAP)
Urk 1	10^{-3}	$1,5 \cdot 10^{-5}$	1,0	1,358	2,108	2,25	5,30	5,30
Urk 2	10^{-3}	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,7	1,358	2,108	2,20	-	2,20
Urk 3	10^{-3}	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,5	1,358	2,108	2,00	-	2,00
Edam 1	10^{-3}	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,0	0,489	0,822	0,63	-	0,63
Edam 2	10^{-3}	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,3	0,489	0,822	0,71	2,50	2,50
Edam 3	10^{-3}	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,6	0,489	0,822	0,76	3,35	3,35
Enkhuizen1	10^{-3}	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,0	0,818	1,307	0,39	-	0,39
Enkhuizen2	10^{-3}	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,8	0,818	1,307	1,15	-	1,15
Enkhuizen3	10^{-3}	$2,3 \cdot 10^{-5}$	2,5	0,818	1,307	1,30	3,65	3,65

Tabel 6.3 Resultaten van de probabilistische berekeningen op basis van de trekking van de waterstand en windrichting (paragraaf 6.1.3)

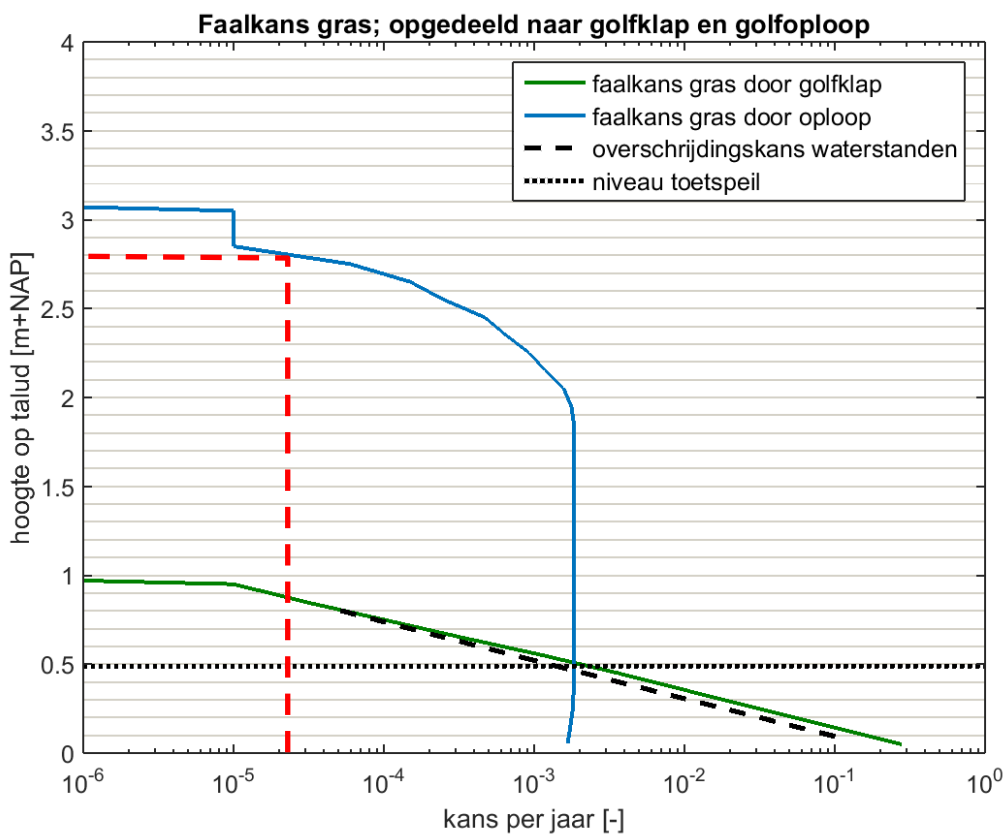
6.2.2 Probabilistische berekeningen op basis van marginale statistiek van waterstand en golfhoogte

Voor Edam en Enkhuizen speelt de problematiek dat de hoge waterstanden veroorzaakt worden door een hoog meerpeil (als gevolg van grote IJsselafvoer en beperkte lozingsmogelijkheden op de Waddenzee) en hoge golven door storm. Daardoor is het niet evident dat een hoge waterstand samenvalt met de grootste belasting van het gras. Er is hier fysisch gezien een veel geringere correlatie tussen de hoogte van de waterstand en de grootte van de golven dan bij Urk, waar zowel de hoge waterstand als hoge golven beide door extreme storm worden veroorzaakt.

Daarom zijn voor deze locaties ook probabilistische berekeningen uitgevoerd op basis van de marginale statistiek van waterstand en golfhoogte (zie paragraaf 6.1.4). De waterstand en golfhoogte als functie van de overschrijdingskans is gegeven in Figuur 6.10. In de Monte Carlo simulaties zijn beide als onafhankelijke statistische grootheden ingevoerd en wordt voor beide een trekking gedaan. Doordat een hoge waterstand en hoge golven een andere fysische oorzaak hebben, is het aannemelijk om ze in de Monte Carlo simulatie ook als onafhankelijke grootheden te beschouwen.



Figuur 6.10 Waterstand en significante golfhoogte als functie van de overschrijdingskans (marginale statistiek)



Figuur 6.11 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Edam2)

De golfperiode is berekend op basis van de golfsteilheid:

$$T_p = \sqrt{\frac{H_{m0}}{s_{op} g / (2\pi)}} = 1,1 \cdot T_{m-1,0} \quad (6.1)$$

De golfsteilheid volgt uit een trekking uit de normale verdeling:

- Edam: $\mu(s_{op}) = 0,033$ en $\sigma(s_{op}) = 0$
- Enkhuizen: $\mu(s_{op}) = 0,04$ en $\sigma(s_{op}) = 0,005$

In dit geval is voor alle samples in de Monte Carlo simulatie uitgegaan van de meerpeil gedomineerde situatie met een waterstandsverloop over 720 uur (30 dagen). De simulaties zijn uitgevoerd met 100.000 samples, zonder Importance sampling. Doordat er zonder Importance sampling is gerekend met een vrij beperkt aantal samples zijn de resulterende figuren aan de linkerkant wat hoekig.

Om de betrouwbaarheid van de berekening te controleren is er nog een tweede probabilistische berekening gemaakt van Enkhuizen2 met een nieuwe set van trekkingen van 100.000 samples. Daaruit bleek de groene lijn in Figuur D.48 perfect te reproduceren, maar het golfploopmechanisme leidde niet tot falen. Als deze twee Monte Carlo simulaties worden samengesteld tot een simulatie van 200.000 samples, schuift de blauwe lijn iets naar links (verticale blauwe lijn schuift van $2 \cdot 10^{-5}$ naar $1 \cdot 10^{-5}$).

Een voorbeeld van het resultaat van de probabilistische berekeningen is gegeven in Figuur 6.11. In vergelijking tot Figuur 6.9 valt op dat de kans op schade door het golfklapmechanisme en door het golfploopmechanisme nu een stuk groter is. Bij een overschrijdingskans van 1/44.000 is het niveau tot waar schade optreedt met deze methode verhoogd van NAP+2,27 m naar NAP+2,80 m.

De resultaten zijn samengevat in Tabel 6.4. ter vergelijking zijn in de laatste kolom de resultaten van de probabilistische berekeningen gegeven op basis van trekkingen van de waterstand en de windrichting (Tabel 6.3). De benodigde hoogte van de overgang ligt nu beduidend hoger. Deze waarden zijn derhalve maatgevend.

case	Factor op H_{m0}	Waterstand		Probsom met marginale statistiek van h en H_{m0}			Probsom met trekking h en θ (Tabel 6.3)
		bij P_{max}	bij P_T	golfklap	oploop	beide	
		(-)	(m+NAP)	(m+NAP)	(m+NAP)	(m+NAP)	
Edam 1	1,0	0,489	0,822	0,82		0,82	0,63
Edam 2	1,3	0,489	0,822	0,82	2,80	2,80	2,50
Edam 3	1,6	0,489	0,822	0,82	3,90	3,90	3,35
Enkhuizen1	1,0	0,818	1,307	0,90		0,90	0,39
Enkhuizen2	1,8	0,818	1,307	1,31	1,70	1,70	1,15
Enkhuizen3	2,5	0,818	1,307	1,31	4,20	4,20	3,65

Tabel 6.4 Resultaten van de probabilistische berekeningen op basis van de marginale waterstand en golfhoogte (paragraaf 6.1.4) (h = waterstand en θ = windrichting)

6.3 Ontwerpmethode voor meerdijken

In hoofdstuk 5 is een methode voor het berekenen van de benodigde hoogte van de overgang van een harde bekleding naar gras afgeleid. Deze methode is in deze paragraaf toegepast op de cases van de meerdijken om te zien of dit tot de juiste resultaten leidt.

case	Ontwerp-peil	NAP+0 m		NAP+0,25 m		NAP+0,5 m		NAP+0,75 m		NAP+1,0 m	
		H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p
	(m+NAP)	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)
Urk 1	1,358	1,88	6,20			2,14	6,10			2,34	6,40
Urk 2	1,358	1,32	5,19			1,50	5,10			1,64	5,35
Urk 3	1,358	0,94	4,38			1,07	4,31			1,17	4,53
Edam 1	0,489	1,08	4,60	0,88	4,10						
Edam 2	0,489	1,40	5,24	1,14	4,67						
Edam 3	0,489	1,73	5,82	1,41	5,19						
Enkhuizen1	0,818	0,61	2,40	0,50	4,30	0,49	3,60	0,38	2,40		
Enkhuizen2	0,818	1,10	3,22	0,90	5,77	0,88	4,83	0,68	3,22		
Enkhuizen3	0,818	1,53	3,79	1,25	6,80	1,23	5,69	0,95	3,79		

Tabel 6.5 Ontwerpcondities met overschrijdingsfrequentie P_{max} (1/1000 per jaar)

Deze methode is stap voor stap beschreven in bijlage E. In de eerste stap worden de kansen P_{max} en P_T bepaald. De waarde van P_{max} is te vinden in de Waterwet en bedraagt voor deze cases 1/1000 per jaar. De waarde van P_T is daarvan af te leiden en is voor Urk 1/67.000 en voor Edam en Enkhuizen 1/44.000.

De tweede stap betreft de hydraulische randvoorwaarden. In geval van de meerdijken moet daarvoor gebruik gemaakt worden van Hydra-Zoet. De golfcondities voor Urk2, Urk3, Edam2, Edam3, Enkhuizen2 en Enkhuizen3 zijn daarvan afgeleid door middel van een vermenigvuldigingsfactor. Het resultaat staat in Tabel 6.5 t/m Tabel 6.7.

case	Ontwerp-peil	NAP+0 m		NAP+0,5 m		NAP+1,0 m		NAP+1,5 m		NAP+2,0 m	
		H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p
	m+NAP	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)
Urk 1	2,108	2,10	6,00	2,31	6,20	2,53	6,50	2,75	6,70	2,93	6,80
Urk 2	2,108	1,47	5,02	1,62	5,19	1,77	5,44	1,93	5,61	2,05	5,69
Urk 3	2,108	1,05	4,24	1,16	4,38	1,27	4,60	1,38	4,74	1,47	4,81

Tabel 6.6 Ontwerpcondities met overschrijdingsfrequentie P_T (1/67000 per jaar)

case	Ontwerp-peil	NAP+0 m		NAP+0,5 m		NAP+0,75m		NAP+1,0 m		NAP+1,25m	
		H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p	H _{m0}	T _p
	m+NAP	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)
Edam 1	0,822	1,13	4,60	0,96	4,40	0,60	2,70				
Edam 2	0,822	1,47	5,24	1,25	5,02	0,78	3,08				
Edam 3	0,822	1,81	5,82	1,54	5,57	0,96	3,42				
Enkhuizen1	1,307	0,62	2,40	0,68	3,70	0,59	4,70	0,51	2,90	0,48	2,50
Enkhuizen2	1,307	1,12	3,22	1,22	4,96	1,06	6,31	0,92	3,89	0,86	3,35
Enkhuizen3	1,307	1,55	3,79	1,70	5,85	1,48	7,43	1,28	4,59	1,20	3,95

Tabel 6.7 Ontwerpcondities met overschrijdingsfrequentie P_T (1/44000 per jaar)

In de derde stap wordt gecontroleerd of het gras in staat is om de golfklappen te weerstaan (tot maximaal de ontwerpwaterstand bij P_T). In deze tabel (en Figuur 6.3) is te zien dat de golfhoogte bij Enkhuizen1 geleidelijk aan afneemt bij stijgende waterstand. Vanaf ongeveer NAP+1,0 m is de golfhoogte kleiner dan 0,5 m en dan is volgens de formules uit bijlage A het gras in staat om de belasting door golfklappen langdurig te weerstaan. Daardoor hoeft de

overgang voor het golfklapmechanisme niet hoger te liggen dan NAP+1,0 m, ondanks dat het ontwerppeil bij 1/44.000 op NAP+1,307 m ligt.

Voor alle andere cases is de golfhoogte zodanig hoog dat het gras bezwijkt als gevolg van het golfklapmechanisme bij alle waterstanden tot aan het ontwerppeil bij P_T .

Case	$h_{P_{max}}$ (m+NAP)	h_{PT} (m+NAP)	Methode bijlage E			Probsom	fout (m)
			Z_{oploop} (m+NAP)	$Z_{2\%}/10$ (m)	$Z_{overgang}$ (m+NAP)	$Z_{voldoet}$ (m+NAP)	
Urk 1	1,358	2,108	4,77	0,45	5,22	5,30	-0,08
Urk 2	1,358	2,108	3,35	0,36	3,71	2,20	1,51
Urk 3	1,358	2,108	0,00	0,26	2,37	2,00	0,37
Edam 1	0,489	0,822	0,00	0,16	0,98	0,82	0,16
Edam 2	0,489	0,822	2,35	0,21	1,03	2,80	-1,77
Edam 3	0,489	0,822	2,98	0,26	2,86	3,90	-1,04
Enkhuizen1	0,818	1,307	0,00	0,09	1,09	0,90	0,19
Enkhuizen2	0,818	1,307	0,00	0,16	1,47	1,70	-0,23
Enkhuizen3	0,818	1,307	2,88	0,22	1,53	4,20	-2,67

Tabel 6.8 Niveau vanaf waar het gras voldoet volgens formule (5.5) en volgens de huidige probabilistische berekeningen

De vierde stap betreft het berekenen van het niveau tot waar er schade te verwachten is door het golfoploopmechanisme bij de norm P_{max} (= 1/1000 in deze cases). Dat is het minimaal benodigde niveau van de overgang van de harde bekleding naar gras. De resultaten van de berekeningen zijn gegeven in Tabel 6.8.

In deze tabel zijn de volgende symbolen gebruikt:

$h_{P_{max}}$ = waterstand met overschrijdingskans gelijk aan maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (P_{max}) (m+NAP)

h_{PT} = waterstand met overschrijdingskans van PT (m+NAP)

Z_{oploop} = niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de formules voor het golfoploopmechanisme bij hydraulische randvoorwaarden bij P_{max} (m+NAP)

$Z_{2\%}$ = golfoploop ten opzichte van de waterlijn die door 2% van golven wordt overschreden bij golfcondities met overschrijdingskans P_{max} (m)

$Z_{overgang}$ = niveau vanaf waar gras kan worden toegepast op het buitentalud volgens de methode uit bijlage F (m+NAP)

$Z_{voldoet}$ = niveau vanaf waar de faalkans van de grasbekleding kleiner is dan P_T volgens de probabilistische berekeningen (m+NAP)

fout = verschil tussen niveau waar gras voldoet volgens de rekenmethode uit bijlage E en volgens de probabilistische berekeningen (m)

Voor de drie cases van Urk valt Urk2 op, omdat deze volgens de semi-probabilistische methode een flinke overschatting geeft van het benodigde niveau van de overgang. De andere twee zijn veel nauwkeuriger. Dit is een gevolg van dezelfde problematiek als speelt bij Eemshaven-Delfzijl en Harlingen. De golfhoogtes zijn bij Urk2 wat kleiner dan Urk1 en bij Urk3 nog wat kleiner. Bij het kleiner worden van de golven wordt het golfoploopmechanisme steeds minder dominant om bij Urk3 helemaal geen invloed meer te hebben. Dan wordt de benodigde hoogte van de overgang bepaald door het golfklapmechanisme. Deze overgang van golfoploopgedomineerd naar golfklapgedomineerd gebeurt in de probabilistische berekeningen bij een hogere golfhoogte dan bij de semi-probabilistische rekenmethode,

waardoor er voor Urk2 een groot verschil resulteert. Daarbij is de semi-probabilistische rekenmethode wel aan de veilige kant.

Dit is alleen te verbeteren als de rekenmethode aanzienlijk gecompliceerder wordt en wordt daarom niet gedaan.

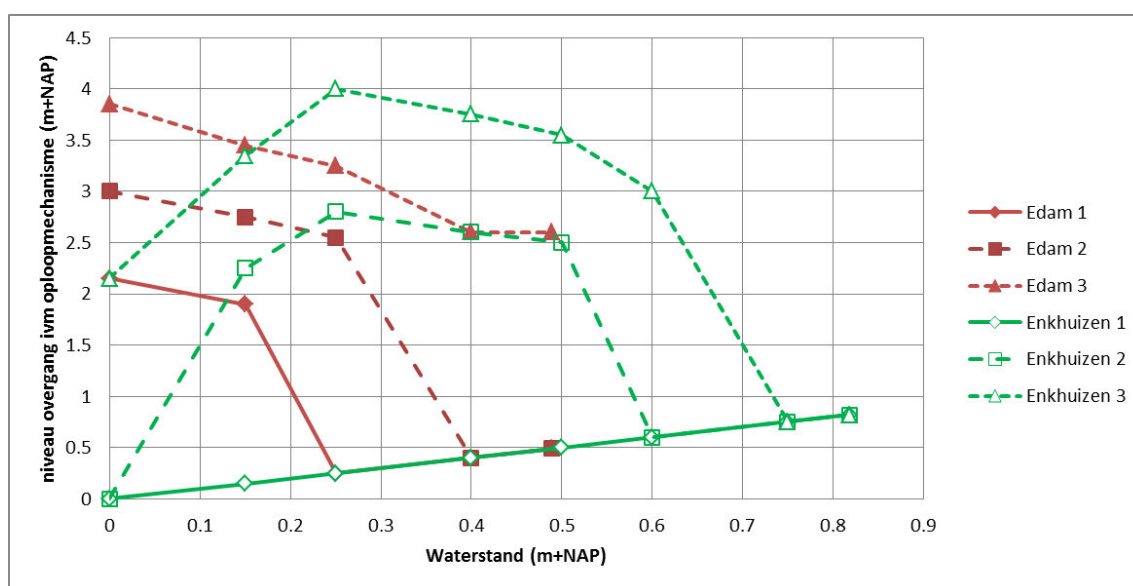
Voor Enkhuizen3 blijkt de semi-probabilistische rekenmethode de hoogte van de overgang flink te onderschatten. Dat is het gevolg van het feit dat de golfhoogte (met bv. een overschrijdingskans van 1/1000 per jaar) afneemt bij stijgende waterstand, zoals te zien is in Figuur 6.3. Daardoor is het niet evident dat een hogere waterstand een zwaardere belasting voor het gras geeft, zoals dat wel aan de kust en bij Urk het geval is.

De consequenties voor de benodigde hoogte van de overgang zijn getoond in Figuur 6.12. In deze figuur staat op de verticale as de benodigde hoogte van de overgang als uitsluitend het golfoploopmechanisme wordt beschouwd. Op de horizontale as staat de waterstand bij welke de golfcondities met overschrijdingskans van 1/1000 per jaar zijn bepaald, die gebruikt zijn om de benodigde hoogte van de overgang te berekenen. Het blijkt dat voor de drie cases van Edam de benodigde hoogte van de overgang het hoogst ligt als de golfcondities en waterstand bij NAP+0,0 m worden aangehouden. Bij die waterstand, en bijbehorende golfcondities met overschrijdingskans van 1/1000 per jaar, wordt het gras in de oploopzone het zwaarste belast en moet de overgang het hoogste gelegd worden.

Voor de drie cases van Enkhuizen ligt dit maximum bij NAP+0,25 m.

Om hier goed mee om te gaan is het nodig de semi-probabilistische rekenmethode wat aan te passen. Het golfoploopmechanisme moet niet simpelweg bij het toetspeil (waterstand met overschrijdingskans P_{max}) doorgerekend worden, maar bij de waterstand die ten aanzien van het golfoploopmechanisme de zwaarste belasting geeft.

Als de golfhoogte met overschrijdingskans gelijk aan de norm (P_{max}) toeneemt met toenemende waterstand, dan kan er gerekend worden met de waterstand met overschrijdingskans gelijk aan de norm (P_{max}), zoals voorgesteld in paragraaf 5.2. Dit is bij veruit de meeste dijken het geval. Maar als dat niet zo is, dan moeten ook lagere waterstanden met bijbehorende golfcondities beschouwd worden.



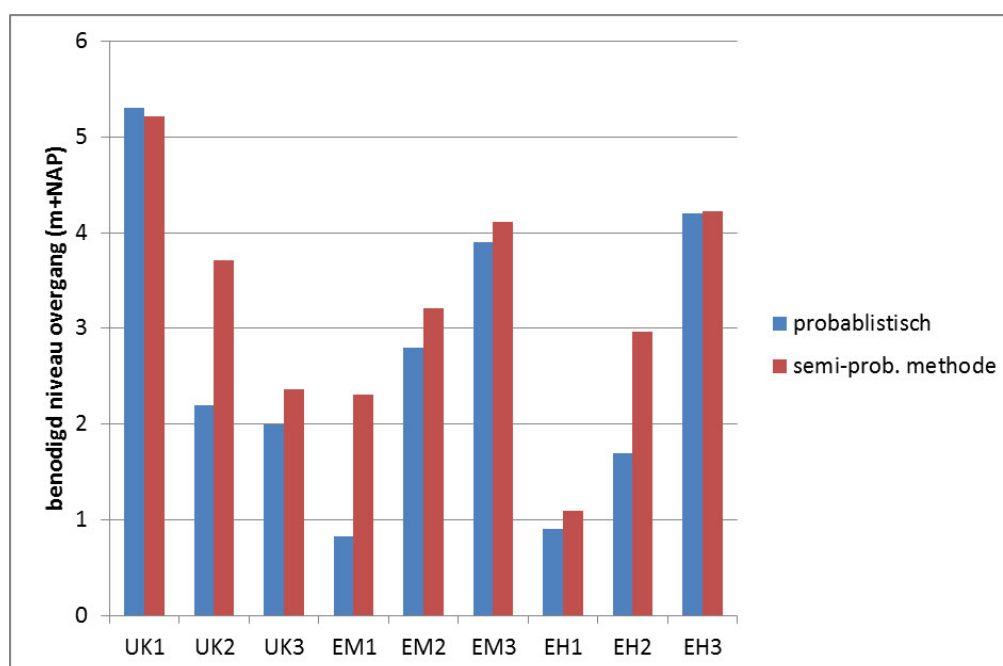
Figuur 6.12 Benodigd niveau van de overgang voor het oploopmechanisme als functie van de waterstand met bijbehorende golfcondities met overschrijdingsfrequentie van 1/1000 per jaar.

In Tabel 6.9 zijn de resultaten van de berekeningen nogmaals weergegeven, maar nu is bovenstaande aanvulling in de ontwerpmethodologie meegenomen en is het golfloopmechanisme voor Edam doorgerekend bij NAP+0,0 m en voor Enkhuizen bij NAP+0,25 m, zie ook Figuur 6.13..

Case	h_{Pmax} (m+NAP)	h_{PT} (m+NAP)	Aangepaste ontwerpmethodologie			Probsom	fout (m)
			Z_{oploop} (m+NAP)	$Z_{2\%}/10$ (m)	$Z_{overgang}$ (m+NAP)	$Z_{voldoet}$ (m+NAP)	
Urk 1	1,358	2,108	4,77	0,45	5,22	5,30	-0,08
Urk 2	1,358	2,108	3,35	0,36	3,71	2,20	1,51
Urk 3	1,358	2,108	0,00	0,26	2,37	2,00	0,37
Edam 1	0,489	0,822	2,15	0,16	2,31	0,82	1,49
Edam 2	0,489	0,822	3,00	0,21	3,21	2,80	0,41
Edam 3	0,489	0,822	3,85	0,26	4,11	3,90	0,21
Enkhuizen1	0,818	1,307	0,25	0,09	1,09	0,90	0,19
Enkhuizen2	0,818	1,307	2,80	0,16	2,96	1,70	1,26
Enkhuizen3	0,818	1,307	4,00	0,22	4,22	4,20	0,02

Tabel 6.9 Niveau vanaf waar het gras voldoet volgens formule (5.5) en volgens de huidige probabilistische berekeningen

Voor Urk2, Edam1 en Enkhuizen2 geeft de semi probabilistische methode nu nog een flinke overschatting, maar voor de anderen zijn de verschillen nu beperkt. De grote verschillen voor Urk2, Edam1 en Enkhuizen2 worden veroorzaakt doordat in de semi probabilistische methode de invloed van het golfloopmechanisme al bij een iets kleinere golfhoogte begint mee te tellen. Dit kan alleen verbeterd worden als de methode aanzienlijk gecompliceerder wordt gemaakt, hetgeen niet de bedoeling is.



Figuur 6.13 Het niveau vanaf waar gras voldoet volgens formule (5.5), rekening houdend met lagere waterstanden voor Z_{oploop} , en het benodigde niveau volgens de huidige probabilistische berekeningen (UK = Urk, EM = Edam, EH = Enkhuizen)

7 Conclusies

In dit project is een ontwerpmethode afgeleid voor het niveau van de overgang tussen een harde bekleding en gras op primaire waterkeringen. Deze overgang moet zo hoog gelegd worden dat er een acceptabele kans op schade is van het gras tijdens extreme omstandigheden. De ontwerpmethode is afgeleid uit de resultaten van probabilistische berekeningen voor 14 cases met zeedijken en 6 met meerdijken. De probabilistische berekeningen zijn nodig omdat voor elke strook gras op het talud er een bepaalde kans is dat deze belast wordt door golfloop en er een kans is dat er een golfklapbelasting optreedt. Met probabilistische berekeningen kan goed rekening gehouden worden met deze kansen en wordt een zo nauwkeurig mogelijk resultaat verkregen, rekening houdend met onzekerheden. Dit resultaat is de hoogte vanaf waar gras kan worden toegepast op het dijktaalud, gegeven een normfaalkans.

Deze probabilistische berekeningen zijn in het huidige project gebruikt als basis voor het afleiden van een praktisch bruikbare rekenregel (semi-probabilistische rekenmethode) waarmee gemakkelijk het benodigde niveau van de overgang van een harde bekleding naar gras kan worden berekend.

De resulterende ontwerpmethode is als volgt:

- Bereken of het gras het golfklapmechanisme kan weerstaan bij een hydraulische belasting met overschrijdingskansen van P_T . Als dat zo is, dan kan gras op het gehele talud worden toegepast. Soms neemt de golfhoogte met bepaalde overschrijdingskansen af bij stijgende waterstand. In dat geval kan het nodig zijn om ook lagere waterstanden dan die bij P_T te beschouwen.
- Zo niet, dan kan het minimale niveau van de overgang van de harde bekleding naar gras berekend worden met de volgende formule:

$$z_{\text{overgang}} = \max(h_{PT}; z_{\text{oploop}, P_{\text{max}}}) + z_{2\%} / 10 \quad (7.1)$$

Met:

z_{overgang} = niveau vanaf waar gras kan worden toegepast op het buitentalud (m+NAP)

P_{Max} = maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (/jaar)

P_T = maximaal toelaatbare faalkans van graserosie in de beschouwde doorsnede (/jaar)

h_{PT} = waterstand met overschrijdingskansen van P_T (m+NAP)

$z_{\text{oploop}, P_{\text{max}}}$ = niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de formules voor het golfloopmechanisme bij golfcondities met overschrijdingskansen P_{max} (m+NAP). Soms neemt de golfhoogte met bepaalde overschrijdingskansen af bij stijgende waterstand. In dat geval kan het nodig zijn om ook lagere waterstanden dan die bij P_{max} te beschouwen.

$z_{2\%}$ = golfloop ten opzichte van de waterlijn die door 2% van golven wordt overschreden bij golfcondities met overschrijdingskansen P_{max} (m)

In deze formule is ook een kleine veiligheidsmarge toegevoegd ($z_{2\%}/10$). In paragraaf 5.2.3 zijn overwegingen gegeven om deze marge al dan niet toe te passen. Aanbevolen wordt om in overleg met betrokkenen hier een beslissing over te nemen.

Opgemerkt moet worden dat in oktober 2016 de beoordelingsmethode van gras in de oploopzone is aangepast. Sindsdien moet de golfloop bij P_T beschouwd worden (met aangepast veiligheidsfactoren). Deze wijziging is in dit rapport nog niet doorgevoerd.

De methode is stap voor stap toegelicht in bijlage E. In deze formule moet $Z_{\text{oploop},P_{\text{max}}}$ bepaald worden, en dat was ook al het geval de oude methodes van TR-steenzettingen en OI-2014v3, behalve dat in het OI-2014v3 de randvoorwaarden bij HBN werden beschouwd. Het enige wat nu toegevoegd is, is dat ook h_{PT} bepaald moet worden. Een voorbeeld van de methode is uitgewerkt in bijlage G.

Als het golfoploopmechanisme maatgevend is, terwijl dat niet het geval is bij een ongeveer 20% lagere golfhoogte, zal een probabilistische berekening mogelijk een beduidend lagere waarde van het benodigde niveau van de overgang geven. Het kan dan lonen om een probabilistische berekening uit te voeren.

In het verleden was het de gewoonte om te denken in een golfklapzone en een golfoploopzone. Bij grote golven is gras niet toepasbaar in de golfklapzone en moet de overgang van de harde bekleding naar gras dus minstens boven de golfklapzone worden gelegd. Als vanuit die optiek gekeken wordt naar bovenstaand resultaat, dan kan als uitleg bij deze methode gesteld worden dat de grens tussen de golfklapzone en de golfoploopzone ligt op het niveau h_{PT} .

Zoals echter eerder in het rapport is gesteld, geldt eigenlijk dat er geen harde grens is tussen het golfklapmechanisme en het golfoploopmechanisme, omdat beide mechanismen elkaar niet uitsluiten. Hoewel het dus binnen de nieuwe benadering fysisch gezien niet helemaal correct is, kan gemakshalve h_{PT} worden gezien als de grens waaronder de faalkans van golfklap dominant is, en waarboven de faalkans van golfoploop dominant is.

Als er al golfcondities met Hydra-K of Hydra-Zoet zijn berekend, maar niet precies bij P_{max} en P_T , kunnen tussenliggende waarden berekend worden door lineair te interpoleren met $\log(\text{herhalingstijd})$. Dit is in formulevorm uitgewerkt in formule (5.4) en is ook aangegeven in de stap-voor-stap procedure in bijlage E.

De probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd met loodrechte golfaanval en een talud van 1:4 zonder berm. Gezien de wijze waarop het resultaat tot stand gekomen is, is het naar alle waarschijnlijkheid ook toepasbaar op andere taludhellingen en situaties met scheve golfaanval en wellicht ook op taluds met een berm. Dat komt omdat er een fysisch verklaarbare methode is opgesteld.

Aanbevolen wordt om het volgende nog nader uit te zoeken of uit te voeren:

- Het opnieuw uitvoeren van de semi-probabilistische berekeningen, waarbij gerekend wordt met Z_{oploop,P_T} in plaats van $Z_{\text{oploop},P_{\text{max}}}$ met aangepaste veiligheidsfactoren. Dit is nodig om de ontwerpmethodode goed te laten aansluiten op de in oktober 2016 gewijzigde beoordelingsmethode.
- De invloed van het volledig probabilistisch meenemen van het overslagcriterium
- De invloed van het volledig probabilistisch meenemen van het verloop van de waterstand tijdens de maatgevende storm
- Onderzoeken of taluds met een berm ook met de voorgestelde ontwerpmethodode kunnen worden ontworpen.
- Onderzoeken of de methode ook toepasbaar is in het benedenrivierengebied
- Onderzoeken of bij meerpeilgedomineerde locaties de belastingduur van 720 uur aanpassing behoeft.
- In het kader van de doorontwikkeling van het OI is onder leiding van RWS-WVL recent een onderzoek van start gegaan naar de omgang met onzekerheden in de klimaatontwikkeling (omgang met/selectie van klimaatscenario's) en de omgang met

model- en statistische onzekerheden in de belastingmodellen. De keuzes die op dit vlak worden gemaakt, kunnen van invloed zijn op het vereiste niveau van de overgang. Het is aan te bevelen om de voorgestelde veiligheidsmarge later te evalueren in het licht van de resultaten van dit onderzoek.

- Aanbevolen wordt om de in deze studie gebruikte software voor de probabilistische berekeningen gebruikersvriendelijk te maken en het beschikbaar te stellen voor het probabilistisch ontwerpen van dijken.
- Aanbevolen wordt om deze methode ook beschikbaar te stellen voor een Toets op Maat.
- Aanbevolen wordt de gehanteerde methodiek van dit project ook toe te passen voor het ontwikkelen van een ontwerpmethode voor het niveau vanaf waar een steenzetting dunner kan worden uitgevoerd.

8 Referenties

Chbab, Houcine (2012)

Waterstandsverlopen meren; IJsselmeer en Markermeer
Deltares, rapport 1204143-003-ZWS-0027, 4 juli 2012

Chbab, Houcine (2015)

Waterstandsverlopen kust; Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017
Deltares, concept rapport 1220082-002-HYE-0003, 3 november 2015

CUR 1992

Handboek voor het dimensioneren van gezette taludbekledingen
CUR/TAW rapport 155, ISBN 9037600174, maart 1992

Diermanse, F., B. Hoonhout, K. den Heijer en A. van Dongeren (2011)

Probabilistische analyses en belastingmodellen tbv de toetsing van duinwaterkeringen
Deltares, concept rapport 1204206-004-HYE-0001, 22 december 2011

HKV (2012).

Hydra-K versie 3.6.5 Gebruikershandleiding Productieversie WTI-2011.
HKV rapport PR1564. Februari 2012.

Hoven, A. van (2015)

Verderingen kritisch overslagdebiet WTI2017
Deltares memo 1220086-005-HYE-0003, 15 september 2015

Klein Breteler, M., I. van der Werf en I. Wenneker (2012)

Kwantificering golfbelasting en invloed lange golven; Onderzoeksprogramma Kennisleemtes
Steenbekledingen
Deltares, rapport 1204727-009, maart 2012

Klerk, W.J., en R. Jongejan (2015)

Semi-probabilistic assessment of wave impact and runup on grass revetments
Deltares, rapport 1220080-005-ZWS-0003, 29 December 2015

Concept Waterwet (2016)

Wijziging van de Waterwet en enkele andere wetten (nieuwe normering primaire
waterkeringen)
Tweede Kamer der Staten-Generaal 34 436 nr 2; ISSN 0921 - 7371

RWS (2015)

Handreiking ontwerpen met overstromingskansen
Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansen-normen
Rijkswaterstaat, OI-2014v3, 20 juli 2015

TAW (2002)

Technische Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij dijken.
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, 2002

Waal, H. de, en A. van Hoven (2015)

Failure Mechanism Module Grass Wave Impact zone; Requirements and Functional Design
Deltares, rapport 1220043-002-HYE-0025, 1 October 2015

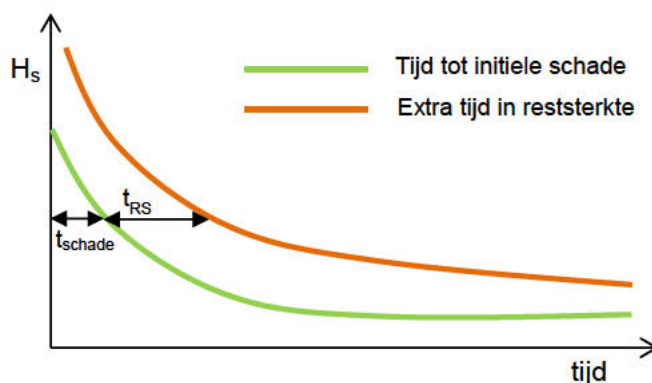
A Gebruikte formules en parameters voor de sterkteberekeningen

A.1 Golfklapmechanisme

Golfklappen komen voornamelijk voor onder de stilwaterlijn (Klein Breteler e.a. 2012). Het gras dat belast wordt door golfklappen zal dit enige tijd kunnen weerstaan. Na verloop van tijd zal eerst een kleine schade ontstaan in het gras, en daarna zal de onderliggende klei gaan eroderen. We onderscheiden daarom twee fases in het bezwijken (de Waal e.a. 2015):

- initiële schade: klein gat in het gras
- reststerkte: erosie van de onderliggende klei

Dit is schematisch weergegeven in Figuur A.1.



Figuur A.1 Schematische weergave van tijd tot initiële schade en de extra tijd door reststerkte

Voor de berekening van de standduur van het gras bij een belasting door golfklappen met constante waterstand en golfcondities wordt gebruikgemaakt van de volgende formule voor de initiële schade:

$$\bullet \text{ als } H_{m0} > c: t_{schade} = \max\left(\frac{1}{b} \ln\left(\frac{H_{m0} - c}{a}\right); 0\right) \quad (1.1)$$

$$\bullet \text{ als } H_{m0} \leq c: t_{schade} = 1000 \text{ uur}$$

Met:

t_{schade} = duur tot falen van het gras (uur)

a, b, c = parameters afhankelijk van de graskwaliteit

H_{m0} = significante golfhoogte (m)

	Fragmen- tarische zoden	open zoden	dichte zoden
a	0	0,8	1,0
b	0	-0,07	-0,035
c	0,25	0,25	0,25

Tabel A.1 Parameters in formule voor initiële schade van gras in golfklapzone voor semi-probabilistische berekeningen (parameterwaarden probabilistische berekeningen: paragraaf A.4)

In navolging van WBI-2017 (versie december 2015) worden de waarden uit Tabel A.1 gehanteerd in de semi-probabilistische berekeningen (niveau 2a). Voor probabilistische berekeningen wordt gebruik gemaakt van de parameterwaarden uit paragraaf A.4.

Nadat initiële schade is ontstaan, is er nog reststerkte. De reststerkte geeft een extra standduur afhankelijk van de toegepaste kleilaagdikte. Er wordt gerekend met een maximale kleilaagdikte van 50 cm, die toegeschreven wordt aan de reststerkte van de grasbekleding. De semi-probabilistische berekeningen gaan als volgt:

- reststerkte bij fragmentarische zode (als $a = 0$ of $c = 0$):
 $t_{RS,gras} = 0$
- reststerkte bij gesloten en open zoden (als $a \neq 0$ of $c \neq 0$):
 - Als $H_{m0} \leq 0,5$ m, dan $t_{RS,gras} = 1000$ uur
 - Als $H_{m0} > 0,5$ m:

$$t_{RS,gras} = \frac{\min(d_c; 0,5) - 0,2}{c_d (\tan \alpha)^{1,5} \max(H_{m0} - 0,5; 0,001)} \quad (1.2)$$

$$c_d = 1,1 + \max(0; 8(F_{zand} - 0,7)) \quad (1.3)$$

Met:

- $t_{RS,gras}$ = Reststerkte van het gras (uur)
- d_c = dikte van de kleilaag (m)
- α = taludhelling ($^\circ$)
- c_d = correctiefactor voor het zandgehalte van de klei (-)
- F_{zand} = zandgehalte in de klei (-)

Bij een variërende waterstand en golfcondities wordt de cumulatieve schade aan het gras berekend door de storm in stukjes op te delen en voor elke periode de bijdrage aan de schade te berekenen. De som van alle schade bijdragen wordt de Failure Fraction genoemd en is bij falen groter dan 1.

Het feit dat bij een hoge belasting initiële schade van het gras in één tijdstap kan optreden (want boven een bepaalde golfhoogte is de sterkte nul), maakt dat er voor het berekenen van de Failure Fraction onderscheid gemaakt moet worden tussen twee situaties:

1. initiële schade van het gras is nog niet opgetreden
2. initiële schade van het gras is al wel opgetreden en er wordt daardoor aanspraak gemaakt op de reststerkte

In het eerste geval wordt de failure fraction berekend op basis van de totale tijd tot initiële schade (in een bepaalde tijdstap: de totale tijdsduur tot initiële schade gras plus reststerkte). Dit wordt in elke tijdstap berekend en uiteindelijk gesommeerd. In formulevorm:

- totdat initiële schade van het gras is opgetreden: $F_{f,storm,j} = \Sigma(t_{stap}/(t_{schade} + t_{RS,gras}))$

Met:

- $F_{f,storm,j}$ = failure fraction voor gras op niveau j voor de gehele storm (-)
- t_{stap} = stapgrootte waarmee de storm doorlopen wordt (hr)
- t_{schade} = tijdsduur (sterkte) tot initiële schade gras bij de belasting in de tijdstap (hr)
- $t_{RS,gras}$ = reststerkte bij de belasting in de tijdstap (hr)

In het tweede geval is er initiële schade en is er alleen nog reststerkte. De failure fraction wordt dan als volgt berekend:

- vanaf dat er initiële schade is opgetreden: $F_{f,storm,j} = \Sigma(t_{stap}/t_{RS,gras})$

De procedure voor het beoordelen van het gras wordt hiermee als volgt:

- In elke tijdstap met duur t_{stap} wordt de sterkte ten aanzien van initiële schade en reststerkte berekend bij de dan heersende golfcondities. Dit wordt uitgedrukt in een tijdsduur, respectievelijk: t_{schade} en $t_{\text{RS,gras}}$. In elke tijdstap worden hiermee de volgende waarden berekend:
 - initiële schade gras: $t_{\text{stap}}/t_{\text{schade}}$ (bijdrage failure fraction tot initiële schade)
cumulatief: $F_{f,i} = \Sigma(t_{\text{stap}}/t_{\text{schade}})$
 - bijdrage aan de failure fraction:
als $F_{f,i} < 1$, dan $F_{f,\text{stap}} = t_{\text{stap}}/(t_{\text{schade}} + t_{\text{RS,gras}})$
anders: $F_{f,\text{stap}} = t_{\text{stap}}/t_{\text{RS,gras}}$
 - cumulatief: $F_{f,\text{storm},j} = \Sigma(F_{f,\text{stap}})$
- Als alle tijdstappen zijn doorlopen, wordt hiermee het gewenste eindresultaat verkregen: $F_{f,\text{storm},j}$

Als $F_{f,\text{storm},j} > 1$, dan faalt de grasbekleding (initiële schade en reststerkte tezamen).

Voor probabilistische berekeningen wordt gebruik gemaakt van de parameterwaarden uit paragraaf A.4.

Voor stormgedomineerde locaties, zoals de meeste zeedijken en meerdijken aan de oostzijde van het IJsselmeer, moet het waterstandsverloop gehanteerd worden uit de VTV2006, die voor bekledingen is overgenomen in het WBI-2017. Voor meerpeilgedomineerde locaties, zoals op vele locaties langs de westzijde van het Markermeer en IJsselmeer, moet veiligheidshalve de duur van de meerpeilverhoging als belastingduur worden gehanteerd (720 uur).

A.2 Golfploopmechanisme

Voor de beoordeling van het gras in de golfploopzone wordt gebruikgemaakt van de cumulatieve overbelastingmethode (Klerk e.a. 2015). In deze methode wordt voor elke golf, die het te beoordelen stukje gras belast, de bijdrage aan de schadeontwikkeling berekend. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$D = \sum_{i=1}^N \max(\alpha_M U_i^2 - \alpha_S U_c^2; 0) \quad (1.4)$$

Met:

- D = cumulatieve overbelasting (schade aan het gras) (m^2/s^2)
- U_i = watersnelheid in het front van de golfploop van golf i (m/s)
- U_c = kritieke watersnelheid, waarboven schade begint (sterkteparameter van de graszode) (m/s)
- α_M = invloedsfactor voor overgangsconstructies (lokale belastingverhoging) (-)
- α_S = invloedsfactor voor overgangsconstructies (lokale sterkteverlaging) (-)

In navolging van WBI-2017 zijn de volgende waarden gehanteerd in de semi-probabilistische berekeningen (niveau 2a):

- $D_{\text{crit}} = 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (waarde van D bij het falen van het gras)
- $\alpha_M = \alpha_S = 1,0$
- $U_c = 5,1 \text{ m/s}$ voor gesloten zoden
- $U_c = 3,3 \text{ m/s}$ voor open zoden

Voor probabilistische berekeningen wordt gebruik gemaakt van de parameterwaarden uit paragraaf A.4.

In deze formules moet gerekend worden met de waterstand en golfcondities bij P_{\max} (en niet P_T), omdat de waarde van de parameters zijn gekalibreerd op die randvoorwaarden. Bij de waterstand en golfcondities met overschrijdingskans P_{\max} sluit het resultaat van de formules aan op de juiste faalkans van de grasbekleding.

De vermelde waarden van U_c , die voor dit rapport gebruikt zijn, zijn de aanbevolen rekenwaarden voor kritieke oploepsnelheid van december 2015. Mogelijk gaat dit nog veranderen in de loop van 2016.

Merk op dat de invloedsfactoren voor overgangsconstructies op advies van WBI-2017 vooralsnog op 1 zijn gesteld.

De snelheid op het talud wordt berekend met de volgende semi-probabilistische formules:

- Golfoploop (hart van beschikbare meetpunten):

$$z_{2\%} = H_{m0} \cdot \gamma_f \gamma_\beta \cdot \min \left(1,65 \cdot \gamma_b \xi_{om}; 4 - \frac{1,5}{\sqrt{\xi_{om}}} \right) \quad (1.5)$$

- Watersnelheid in het front van de golfoplooptong van golf met overschrijdingskans p :

$$U_{\max} = c_u \cdot \sqrt{g \cdot z_p} \quad \text{met } z_p = z_{2\%} \sqrt{\frac{\ln p}{\ln 0,02}} \quad (1.6)$$

$$\text{– als } z < 0,75 \cdot z_p: U_i = U_{\max} \quad (1.7)$$

$$\text{– als } 0,75 < z/z_p < 1: U_i = \frac{z_p - z}{0,25 z_p} U_{\max} \quad (1.8)$$

$$\text{– als } z > z_p: U_i = 0 \quad (1.9)$$

Met:

$z_{2\%}$ = golfoploophoogte op een glad talud ten opzichte van de stilwaterlijn die door 2% van de golven wordt overschreden (m).

z_p = golfoploophoogte van golf i op een glad talud ten opzichte van de stilwaterlijn die door $p\%$ van de golven wordt overschreden (m).

H_{m0} = significante golfhoogte berekend uit het spectrum ($\approx H_s$) (m)

$T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode (-)

γ_f = ruwheidscoëfficiënt (= 1 in dit geval) (-)

s_{om} = $H_{m0}/(gT_{m-1,0}^2/(2\pi))$ = golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$ (-)

g = versnelling als gevolg van de zwaartekracht (m/s^2)

α = taludhelling ($^\circ$)

ξ_{om} = $\tan\alpha/\sqrt{s_{om}}$ = brekerparameter (-)

γ_b = factor voor de invloed van een berm (= 1 in dit geval) (-)

γ_β = factor voor de invloed van de hoek van golfinval (= 1 in dit geval) (-)

c_u = coëfficiënt voor golfoploepsnelheid (= 1,1) (-)

p = overschrijdingskans van de golf in het golfveld (-)

Met bovenstaande formules wordt voor elke golf i (met overschrijdingskans p) de snelheid ter plaatse van het te beoordelen gras bepaald en de cumulatieve waarde van D berekend. Als $D > D_{\text{crit}}$ aan het eind van de storm, dan faalt het gras.

Voor de belastingduur geldt hetzelfde als bij het golfklapmechanisme (par. A.1)

A.3 Golfoverslagformules voor probabilistische berekeningen

Er zijn ook een paar cases doorgerekend waarbij ook de golfoverslag is meegewogen (stabiliteit van het gras op de kruin en het binnentalud). Als er sprake is van zodanig grote golfoverslag dat daardoor falen van de dijk ontstaat, dan wordt dat als hoofdoorzaak van het falen van de dijk beschouwd en wordt voor die case het falen van het gras op het buitentalud niet meer beoordeeld.

De beoordeling van de kruin en het binnentalud start met het berekenen van de golfoverslag met de volgende formules (TAW 2002):

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \xi_{om} \cdot \exp\left(-4,75m \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v \cdot \xi_{om}}\right) \quad (\text{brekende golven}) \quad (1.10)$$

Met als maximum:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0,2 \cdot \exp\left(-2,6 \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta}\right) \quad (\text{niet-brekende golven}) \quad (1.11)$$

Met:

- q = gemiddelde golfoverslagdebiet (m³/m/s)
- h_k = kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
- m = modelfactor met normale verdeling (-)

Dit aspect van de dijk wordt in het WBI-2017 probabilistisch beoordeeld, waarbij gerekend wordt met een modelfactor m met verwachtingswaarde van $\mu = 1,0$ en spreiding $\sigma = 0,105$ (TAW 2002).

Bij het overschrijden van een bepaald kritiek overslagdebiet q_{cr} treedt er falen op, zie Tabel A.2 (Van Hoven 2015). De waarde van het kritieke overslagdebiet heeft een log-normale verdeling.

Golfhoogteklasse	Gesloten zode		Open zode	
	μ (l/s/m)	σ (l/s/m)	μ (l/s/m)	σ (l/s/m)
0-1 m	225	250	100	120
1-2 m	100	120	70	80
2-3 m	70	80	40	50

Tabel A.2 Parameters lognormale kansverdelingen van het kritiek overslagdebiet voor semi-probabilistische berekeningen

A.4 Parameters in de probabilistische berekeningen

In de probabilistische berekeningen wordt voor enkele variabelen een stochastische variabelen gebruikt:

- Golfklapzone:
 - Sterkte van gesloten zoden: $\mu(a) = 1,82$ en $\sigma(a) = 0,62$ (log-normale verdeling)

- Sterkte van open zoden: $\mu(a) = 1,47$ en $\sigma(a) = 0,50$ (log-normale verdeling)
- Reststerkte van klei: $\mu(F_{zand}) = 0,35$ en $\sigma(F_{zand}) = 0,07$
- Sterkte van gesloten zoden in de golfoploopzone:
 - $\mu(U_c) = 7,9$ en $\sigma(U_c) = 0,8$ (log-normale verdeling)
 - $\mu(D_{crit}) = 7000$ en $\sigma(D_{crit}) = 700$ (log-normale verdeling)
- Golfoverslag:
 - q_{cr} afhankelijk van golfhoogteklasse en graszode, zie Tabel A.2
 - modelfactor m : $\mu = 1,0$ en spreiding $\sigma = 0,105$

B Theoretisch raamwerk

Ruben Jongejan

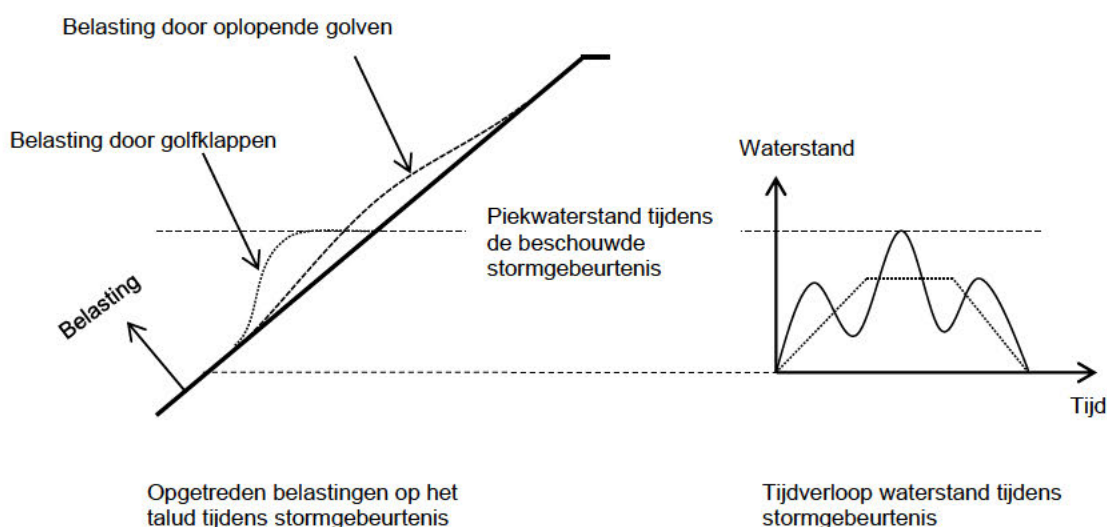
Voor het bepalen van de aanleghoogte van een steenzetting is het van belang om te weten vanaf welk niveau gras volstaat. De kans op het falen van het gras dient voldoende klein te zijn. In deze bijlage wordt op hoofdlijnen toegelicht hoe dit beoordeeld kan worden.

In paragraaf B.1 wordt een korte toelichting op de relevante faalmechanismen gegeven. De kans op het falen van de dijk door deze faalmechanismen moet kleiner zijn dan een faalkanseis. Deze eis wordt in paragraaf B.2 toegelicht. Vervolgens wordt in paragraaf B.3 toegelicht hoe de faalkans langs het talud verloopt. Dit is van belang om te kunnen beoordelen vanaf welk niveau gras volstaat. Ten slotte wordt in paragraaf B.4 de relatie gelegd met de huidige semi-probabilistische voorschriften.

B.1 Faalmechanismebeschrijving: golfklap en golfoploop

Een grasmat kan beschadigd raken door inslaande golven (golfklap) en/of door oplopende golven (golfoploop). Als het dijklichaam vervolgens doorgaand erodeert, faalt de dijk. Falen is hierbij gedefinieerd als het verlies van waterkerend vermogen waardoor het door het dijktraject beschermde gebied zodanig overstroomt dat dodelijke slachtoffers of substantiële economische schade ontstaan (cf. concept-Waterwet).

Bij elke stormgebeurtenis is er sprake van zowel inslaande golven (golfklap) als oplopende golven (golfoploop). Dit is schematisch weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1. Illustratie van de grootte van de belasting op verschillende niveaus langs het talud door golfklappen en oplopende golven tijdens een enkele stormgebeurtenis met een bepaalde piekwaterstand.

Het TR Steenzettingen – Ontwerp (TAW, 2003) maakt onderscheid tussen twee zones:

1. Een zone onder het ontwerppeil waar de belasting op de bekleding relatief groot is. Dit is de zone waar het faalmechanisme golfklap wordt beschouwd. Deze zone wordt daarom ook wel de golfklapzone genoemd.
2. Een zone boven het ontwerppeil waar de belasting op de bekleding relatief laag is. Dit is de zone waar het faalmechanisme golfoploop wordt beschouwd. Deze zone wordt daarom ook wel de golfoploopzone genoemd.

Dit deterministische onderscheid tussen de zones met een relatief hoge en een relatief lage belasting is vanuit probabilistisch oogpunt onzuiver: het is alleen mogelijk om per belastinggebeurtenis (of in kanstermen) te spreken over een zone met een hoge en een lage belasting. Om verwarring te voorkomen, worden de begrippen golfklap- en golfoploopzone uit het TR Steenzettingen, die zijn opgehangen aan het ontwerppeil, in het navolgende niet langer gebruikt. Steeds zal worden gesproken over de faalmechanismen golfklap en golfoploop en zal worden aangegeven welk faalmechanisme op welk deel van het talud maatgevend is.

B.2 Betrouwbaarheidseis

B.2.1.1 Betrouwbaarheidseis gras erosie buitentalud (GEBU)

In dit rapport staat de vraag centraal vanaf welk niveau een grasbekleding zal volstaan. Daarom wordt gekeken naar de vraag vanaf welk niveau de faalkans van gras op het buitentalud voldoende klein is. Dit is het geval als de kans op het falen van de dijk door golfklappen of oplopende golven kleiner is dan de faalkanseis voor de erosie van gras op het buitentalud (GEBU):

$$P(F_{\text{GEBU}}) = P(F_{\text{golfklap}} \cup F_{\text{oploop}}) \leq P_{\text{T,GEBU}}$$

Waarin:

$P(\cdot)$ Kans (per jaar)

F_{GEBU} Falen van de beschouwde dijkdoorsnede door het falen van de grasbekleding op het buitentalud, gevolgd door erosie van het dijklichaam

F_{klap} Falen van de beschouwde dijkdoorsnede ten gevolge van golfklappen op de bekleding

F_{oploop} Falen van de beschouwde dijkdoorsnede ten gevolge van oplopende golven

$P_{\text{T,GEBU}}$ Faalkanseis op doorsnedeniveau (per jaar)

Noot: de scheiding tussen golfklap en golfoploop is instructief maar mogelijk niet volledig terecht. Wanneer golfoploop tot verzwakking leidt, waardoor golfklap tot falen kan leiden, dan is de splitsing in twee deelfaalmechanismen niet langer gerechtvaardigd. Er zou dan over één faalmechanisme moeten worden gesproken, waarin golfklap en golfoploop samen een rol spelen. Deze mogelijke interactie tussen golfklap en golfoploop wordt in deze Bijlage achterwege gelaten, om de toelichtingen niet onnodig te compliceren.

De faalkanseis op doorsnedeniveau wordt bepaald door:

1. de maximaal toelaatbare overstromingskans
2. het faalkansbudget voor het falen van een dijk door het falen van de bekleding,
3. verdere uitsplitsingen van de faalkansruimte vanwege de verschillende bekledingstypen en faalmechanismen van bekledingen
4. een factor voor het lengte-effect.

De faalkanseis op doorsnedeniveau kan als volgt worden berekend:

$$P_{T,GEBU} = f \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot P_{max} / N$$

Waarin:

- P_{max} Maximaal toelaatbare overstromingskans (per jaar). In de herziene Waterwet zullen naast maximaal toelaatbare overstromingskansen ook signaalwaarden zijn opgenomen. De maximaal toelaatbare overstromingskans is minder streng dan signaalwaarde. Bij het ontwerp dient te worden uitgegaan van de maximaal toelaatbare overstromingskans.
- f Faalkansbudget voor het falen van de bekleding en erosie van het dijklichaam (standaard $f = 0,1$)
- λ_1 Faalkansbudget voor grasbekleding ($\lambda_1 = 0,5$)
- λ_2 Faalkansbudget voor erosie van de grasbekleding door alleen golfklap en/of golfoploop, niet door afschuiving ($\lambda_2 = 0,9$)
- N Factor voor het lengte-effect (standaard $N=3$)

Het invullen van de standaardwaarden voor f , λ_1 , λ_2 en N geeft als faalkanseis op doorsnedeniveau:

$$P_{T,GEBU} = f \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot P_{max} / N = 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot P_{max} / 3 = 0,015 \cdot P_{max}$$

Opgemerkt wordt dat in het concept-WTI2017-kalibratierapport voor GEBU ook een faalkansbudget λ_3 wordt genoemd. Deze factor dient om te komen tot een losse faalkanseis voor golfoploop (ongeacht golfklap) en een losse faalkanseis voor golfklap (ongeacht golfoploop). In het bovenstaande gaat het echter over een eis aan de kans op falen door golfoploop *of* golfklap. Overigens is deze factor in de WBI2017-kalibratiestudie gelijk gesteld aan 1 omdat het falen van gras door het golfoploopmechanisme en het golfklapmechanisme zeer sterk gecorreleerd zijn. Deze factor zou dus hoe dan ook geen invloed hebben op de aan te houden faalkanseis.

B.2.1.2 De interactie met golfoverslag

Tussen erosie van het buitentalud en (GEBU) en erosie van de kruin en het binnentalud (GEKB) kan een sterkte correlatie bestaan. Dit biedt mogelijkheden tot optimalisatie. De faalkansbudgetten in de faalkansbegroting zijn namelijk additief. De kans op GEBU of GEKB is echter kleiner dan de kans op GEBU plus de kans op GEKB.

De kans op falen door GEBU of GEKB moet kleiner zijn dan de som van de faalkanseisen voor GEBU en GEKB:

$$P(F_{GEBU} \cup F_{GEKB}) \leq P_{T,GEBU} + P_{T,GEKB}$$

Waarin:

- $P(\cdot)$ Kans (per jaar)
- F_{GEBU} Falen van de beschouwde dijkdoorsnede door het falen van de grasbekleding op het buitentalud, gevolgd door erosie van het dijklichaam
- F_{GEKB} Falen van de beschouwde dijkdoorsnede ten gevolge van het falen van het de bekleding op de kruin of het binnentalud, gevolgd door erosie van het dijklichaam
- $P_{T,GEBU}$ Faalkanseis op doorsnedeniveau voor GEBU (per jaar)
- $P_{T,GEKB}$ Faalkanseis op doorsnedeniveau voor GEKB (per jaar)

Het uitschrijven van het linker lid geeft:

$$P(F_{\text{GEBU}} \cap \underline{F}_{\text{GEKB}}) + P(F_{\text{GEKB}}) \leq P_{\text{T,GEBU}} + P_{\text{T,GEKB}}$$

Hierin staat het “ \cap ”-teken voor “en”. Met de onderstreping wordt bedoeld op het niet optreden van een bepaalde gebeurtenis.

Bij het bepalen van de vereiste kruinhoogte evalueert men de voorwaarde: $P(F_{\text{GEKB}}) \leq P_{\text{T,GEKB}}$. Als aan de eis is voldaan, dan mag bij de beoordeling van de kans op erosie van het buitentalud uit worden gaan van de volgende voorwaarde:

$$P(F_{\text{GEBU}} \cap \underline{F}_{\text{GEKB}}) \leq P_{\text{T,GEBU}}$$

Dit betekent dat een bekleding niet gedimensioneerd hoeft te worden op condities waarbij de dijk faalt ten gevolge van golfoverslag. De interactie met golfoverslag wordt dus niet meegenomen door de faalkanseis voor de grasbekleding te corrigeren (deze blijft gelijk aan $P_{\text{T,GEBU}}$), maar door met deze correlatie rekening te houden in de faalkansberekening.

B.3 Probabilistische analyse

B.3.1.1 *Het verloop van de faalkans langs een grastalud*

Een dijkdoorsnede faalt als de belasting op de bekleding ergens groter is dan de sterkte van de bekleding en de reststerkte van de onderlaag en het dijklichaam. De kans dat een bepaalde bekledingsstrook wordt belast, wordt kleiner naarmate de strook zich hoger op het talud bevindt. Het verloop van de faalkans *gegeven* een belasting langs het talud wordt bepaald door de volgende factoren:

1. eventuele variaties in de sterkte van de grasbekleding langs het talud,
2. eventuele variaties in de reststerkte langs het talud,
3. de relatie tussen de golfcondities en de buitenwaterstand.

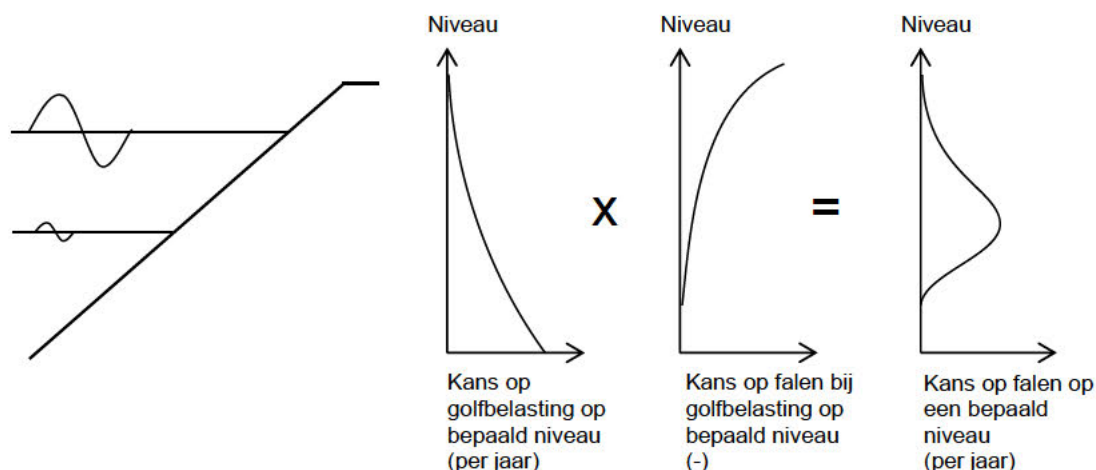
In het navolgende wordt aangenomen dat de sterkte van de grasbekleding langs het talud hetzelfde is. Het effect van reststerkte wordt gemakshalve genegeerd. Dit betekent dat alleen de relatie tussen de golfcondities en de waterstand van belang is voor variaties in de voorwaardelijke faalkans langs het talud.

Als de golfhoogte en de waterstand sterk gecorreleerd zijn, dan is bij een belasting hoog op het talud naar verwachting ook sprake zijn van een relatief grote belasting. De voorwaardelijke faalkans van de bekleding neemt dan toe langs het talud. Als de golfhoogte en de waterstand onafhankelijk zijn en de kansverdelingen van de golfhoogte en de golfperiode op elk niveau hetzelfde zijn, dan is de voorwaardelijke faalkans van de bekleding langs het talud constant.

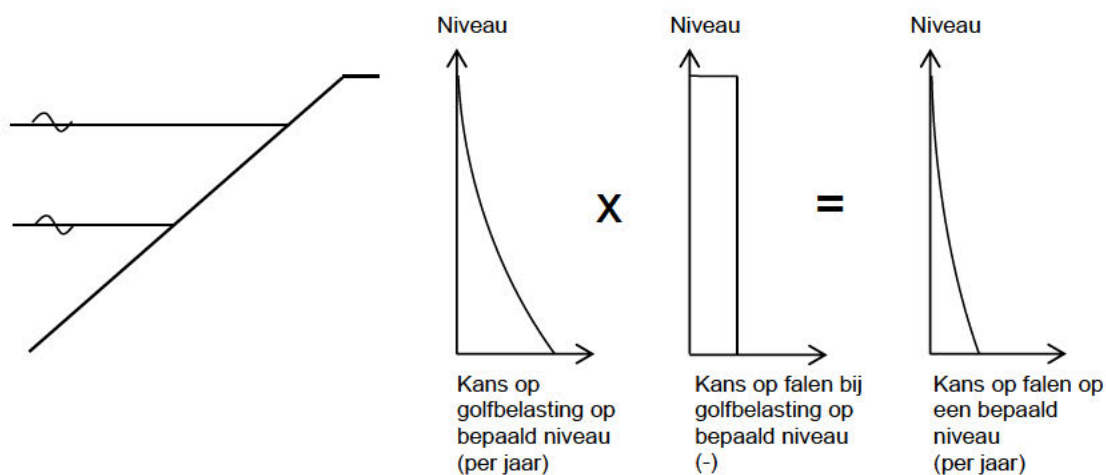
Door per bekledingsstrook de kans op een belasting te vermenigvuldigen met de kans op falen *gegeven* een belasting, kan het verloop van de faalkans langs het talud worden berekend. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.

A. Waterstand en golfcondities volledig gecorreleerd

Hoe hoger de buitenwaterstand, des te groter de golfbelasting

**B. Waterstand en golfcondities onafhankelijk**

De grootte van de golfbelasting is onafhankelijk van de buitenwaterstand



Figuur 2. Het verloop van de faalkans langs een grastalud voor een geval waarin de waterstand en golfcondities volledig gecorreleerd zijn (A) en een geval waarin zij onafhankelijk zijn (B).

Met het falen van de kruin en het binnentalud door golfoverslag (GEKB) kan rekening worden gehouden bij de berekening van het verloop van de voorwaardelijke faalkans van de bekleding langs het talud. De voorwaardelijke faalkans voor GEBU *en geen GEKB* zal, zeker hoog op het talud, kleiner zijn dan de voorwaardelijke faalkans voor GEBU (ongeacht GEKB).

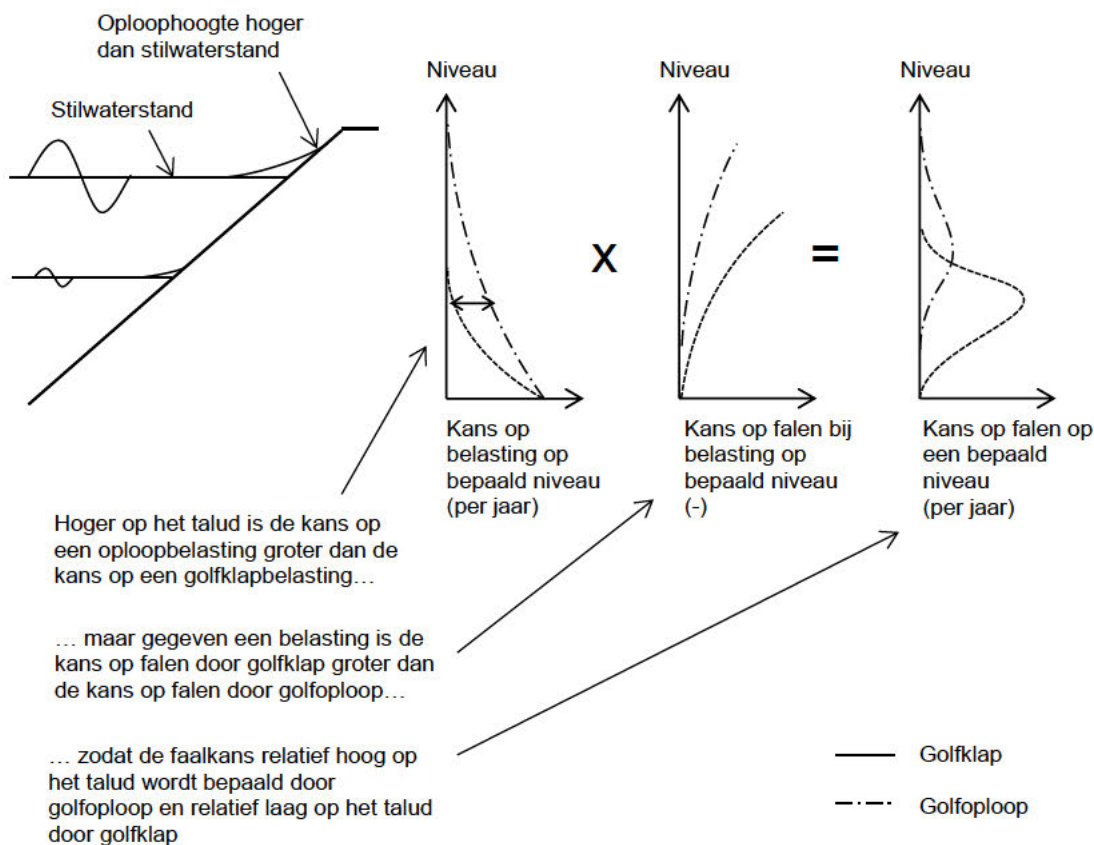
Omdat wordt aangenomen dat de onzekere eigenschappen langs het talud volledig gecorreleerd zijn, is de faalkans van de bekleding *ongeacht* het niveau waarop deze faalt, gelijk aan de *grootste* faalkans van de afzonderlijke bekledingsstroken.

B.3.1.2 De faalkansverlopen voor golfklap en golfoploop nader beschouwd

Het verloop van de faalkans langs een grastalud kan voor de faalmechanismen golfklap en golfoploop afzonderlijk in beeld worden gebracht. De faalkansverlopen zullen verschillend zijn. Deze verschillen hebben de volgende oorzaken:

1. Bij het faalmechanisme golfklap treedt de golfbelasting steeds op rond het niveau van de stilwaterlijn. De oplopende golven bereiken echter niveaus die hoger zijn. Hierdoor is de kans op een oploopbelasting hoog op het talud groter dan de kans dat daar een golfklapbelasting optreedt.
2. Het faalmechanisme golfklap leidt op het niveau van de piekwaterstand van een storm tot een grotere belasting dan het faalmechanisme golfoploop.

Het effect van deze verschillen is schematisch weergegeven in Figuur 3, voor een geval waarin de waterstand en de golfhoogte en de golfperiode sterk gecorreleerd zijn.



Figuur 3. Illustratie van het verloop van de faalkans van een grasbekleding langs het talud voor de faalmechanismen golfklap en golfoploop.

Omdat een golfklapbelasting steeds optreedt rond het niveau van de stilwaterlijn, is gras vanuit het oogpunt van golfklap zondermeer toegestaan boven het waterstandsniveau met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de faalkanseis op doorsnedeniveau. Dit is een waterstand met een overschrijdingskans van 0,15 maal de maximaal toelaatbare overstromingskans (zie paragraaf B.2). Bij een exponentieel verdeelde staart van de waterstandsverdeling is dit equivalent aan een niveau dat 1,8 decimeringshoogtes boven het ontwerppeil ligt. Als de waterstand en de golfcondities niet volledig gecorreleerd zijn, dan kan dit niveau mogelijk worden verlaagd. De kans op falen door golfoploop zal in de praktijk langs het gehele talud geëvalueerd moeten worden.

B.4 Eerste aanknopingspunten voor het semi-probabilistische ontwerp

In de voorgaande paragrafen is aangegeven op welke wijze een probabilistische beoordeling kan worden uitgevoerd. In de ontwerp praktijk wordt echter nog gewerkt met semi-probabilistische voorschriften. Dat betekent dat faalmechanismemodellen worden gevoed met rekenwaarden in plaats van kansverdelingen.

Bij semi-probabilistische beoordelingen van bekledingen met het WBI2017 en het OI2014 wordt standaard uitgegaan van een belasting met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. De overige rekenwaarden (representatieve waarden en partiële veiligheidsfactoren) zijn hierop afgestemd.

In Tabel 1 is weergegeven welke mogelijkheden er zijn om te bepalen of gras op het buitentalud volstaat met de nu beschikbare semi-probabilistische voorschriften. In aanvulling op Tabel 1 wordt opgemerkt dat een bekleding niet hoeft te worden gedimensioneerd op belastingcondities waaronder de dijk zal falen door golfoverslag.

Tabel 1. Mogelijkheden voor het bepalen van het niveau vanaf waar gras op het buitentalud volstaat met de beschikbare semi-probabilistische voorschriften.

Niveau dat wordt beschouwd	Ontwerpverificatie gras golfklap	Ontwerpverificatie gras golfoploop
Onder ontwerppeil (de waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de maximaal toelaatbare overstromingskans)	Met behulp van het semi-probabilistisch voorschrift uit OI2014v3/WBI2017	Met behulp van het semi-probabilistisch voorschrift uit OI2014v3/WBI2017
Tussen ontwerppeil en waterstandsniveau met overschrijdingskans van 0,15 x maximaal toelaatbare overstromingskans	Als het gras onder het ontwerppeil voldoet volgens het OI2014v3/WBI2017 en* dit in nog sterkere mate geldt voor grotere overschrijdingskansen dan de maximaal toelaatbare overstromingskans, dan voldoet gras ook in deze zone. Anders is nadere studie vereist.	(op grond van de concept-WBI2017-kalibratiestudie wordt verwacht dat het rekenen met een hydraulische belasting met een overschrijdingskans gelijk aan de maximaal toelaatbare overstromingskans geen belemmering vormt om gras dat relatief hoog op het talud ligt, te beoordelen voor golfoploop)
Boven waterstandsniveau met overschrijdingskans van 0,15 x maximaal toelaatbare overstromingskans	Geen verificatie nodig	

* Deze nevenvoorwaarde waarborgt dat het dalende verloop van de faalkans is ingezet en de faalkans niet groter wordt naarmate een hoger niveau wordt beschouwd.

Zoals getoond in Tabel 1 is een nadere uitwerking vooral van praktisch belang voor de omgang met het faalmechanisme golfklap, voor niveaus boven het ontwerppeil. Mogelijkheden voor verfijning zijn (naast de ontwikkeling van volledig probabilistische ontwerpinstrumenten):

1. Het ontwikkelen van een procedure om te bepalen vanaf welk niveau gras volstaat voor golfklap in de zone tussen het ontwerppeil en het waterstandsniveau met een overschrijdingskans van 0,15 x maximaal toelaatbare overstromingskans,.
2. Het aanscherpen van het niveau vanaf waar geen verificatie voor golfklap meer nodig is.

Als alternatief zou een semi-probabilistisch voorschrift voor golfklap kunnen worden geïntroduceerd waarin de overschrijdingskans van de belasting getalsmatig gelijk is aan de faalkanseis op doorsnedeniveau. De tussenzone uit Tabel 1 komt dan feitelijk te vervallen. Een belangrijk nadeel van een dergelijke aanpak is dat dit een sterk afwijkend voorschrift oplevert, waardoor gemakkelijk onbegrip en fouten kunnen ontstaan.

C Importance sampling for Monte Carlo simulations

Diermanse et al (2011) writes that Crude Monte Carlo (MC) sampling refers to the repeated sampling of each of the variables from their respective distributions ($f(X_1), f(X_2), \dots, f(X_n)$). The vector \mathbf{X} is defined as a single sample of the combined random variables, i. e. a vector of length n , where n is the number of random variables. For each sample, the limit state function $Z(\mathbf{X})$ is evaluated. The probability of failure, P_f , is estimated as the ratio of samples for which $Z(\mathbf{X}) < 0$, N_f , to the total number of samples, N :

$$P_f = \frac{N_f}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N I(Z(X))}{N} \quad (3.1)$$

With:

- P_f = probability of failure (-)
- N_f = number of samples in which failure occurred (-)
- N = total number of samples (-)
- $I()$ = 1 if failure occurred, 0 is no failure occurred at sample i
- $Z(X)$ = limit state function

Importance sampling is a method to increase the efficiency of the crude Monte Carlo method. It decreases the number of samples required to produce a reliable estimate of the failure probability. This is done by replacing the actual probabilities, f , of the random variables by a more efficient one, h . Efficient refers to the proportion of the samples which will result in failure. Because the sampling does not use the actual distribution function, the estimator of the failure probability as applied in Crude Monte Carlo needs to be adapted. This is done via the following formula (Diermanse et al 2011):

$$P_f = \frac{\sum_{i=1}^N I(Z(X)) \frac{f(X)}{h(X)}}{N} \quad (3.2)$$

With:

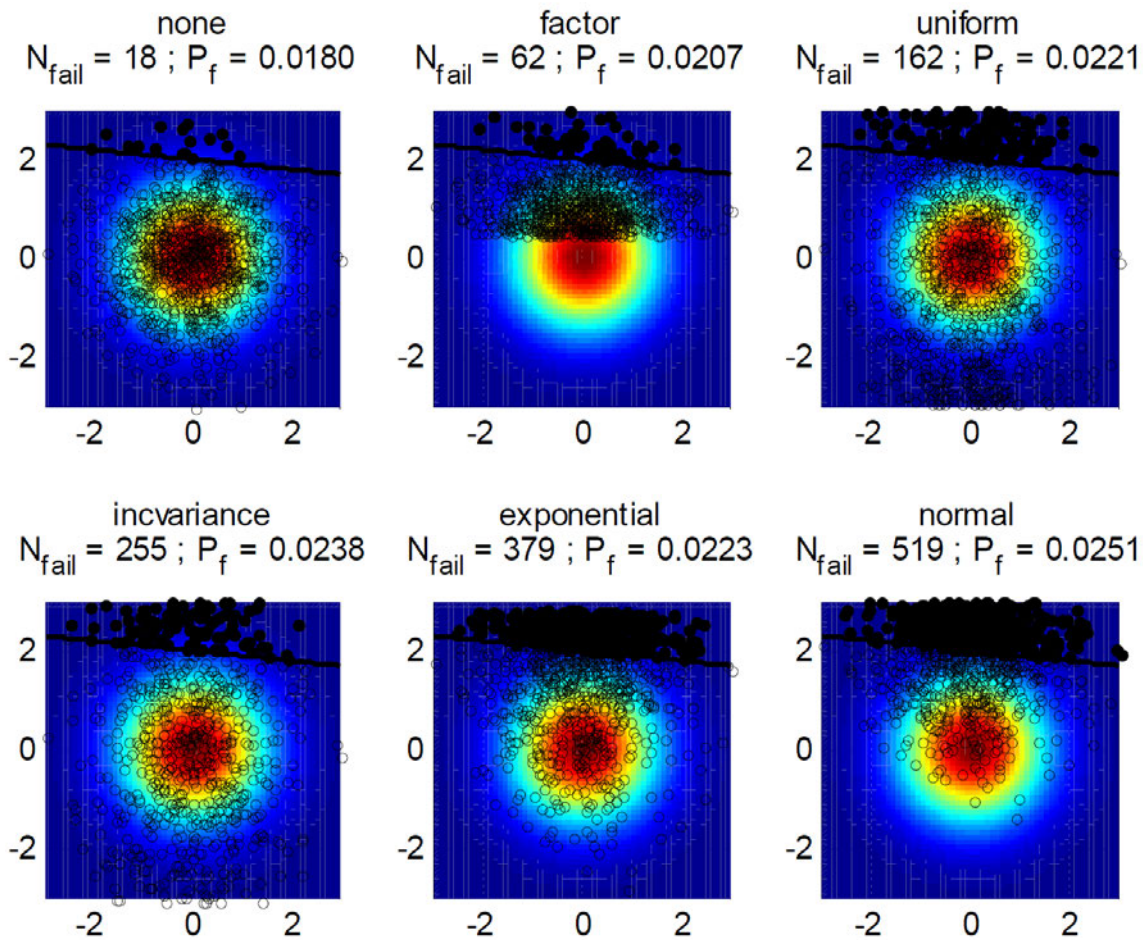
- $f(X)$ = actual probability density function (-)
- $h(X)$ = shifted probability density function (-)

The choice of function h determines the importance sampling method and therefore also its efficiency. This function can be taken equal to virtually any probability density function, see Figuur C.1. Efficient choices for h fully depend on the problem under consideration.

In the present project importance sampling was only applied for the water level and the density function h was a normal distribution. The values for the density function h were chosen for each location such that an optimum result was achieved (efficient calculation time and sufficient number of samples with failure). See Tabel C.1 for the chosen values.

Location	$\mu(h)$	$\sigma(h)$
Eemshaven-Delfzijl	3	1
Harlingen	3	1
Lauwersmeerdijk	3	1
Vlissingen	1	1
Ossensisse	3	1

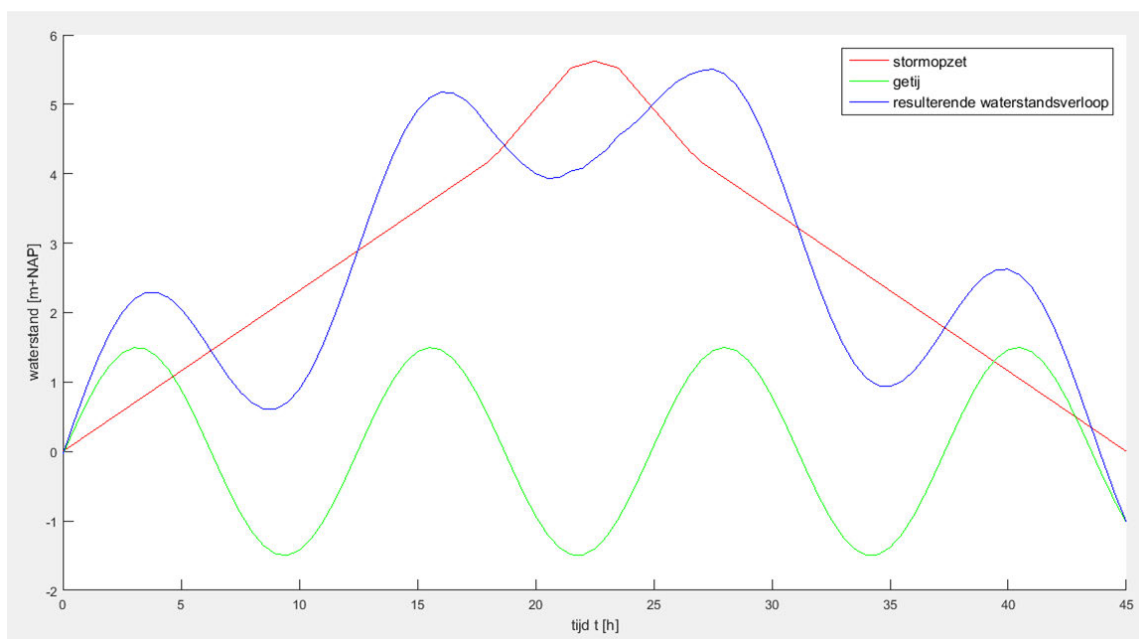
Tabel C.1 Used values for the importance sampling density function h



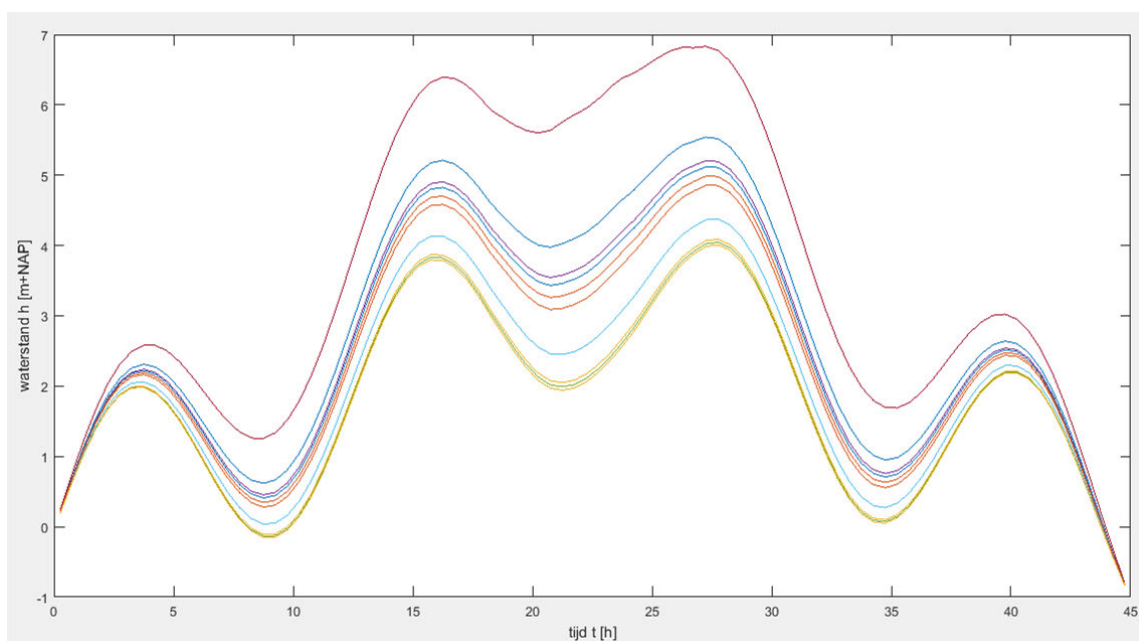
Figuur C.1 Importance samples for different methods in standard normal space and resulting estimates of the probability of failure. The background colors indicate the actual probability of occurrence if variables u_1 and u_2 are standard normally distributed, where red is a high probability and blue a low probability. The black line is the assumed limit state function, the filled dots are samples resulting in failure points and the open circles are non-failure samples (Diermanse et al 2011).

D Figuren

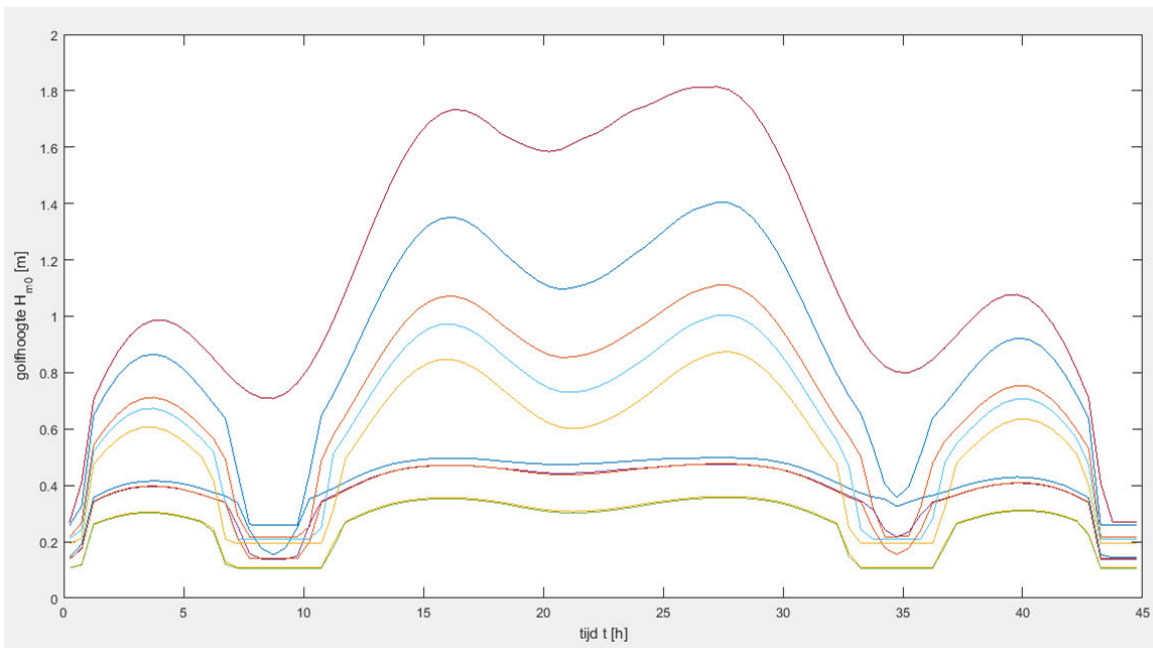
D.1 Eemshaven – Delfzijl



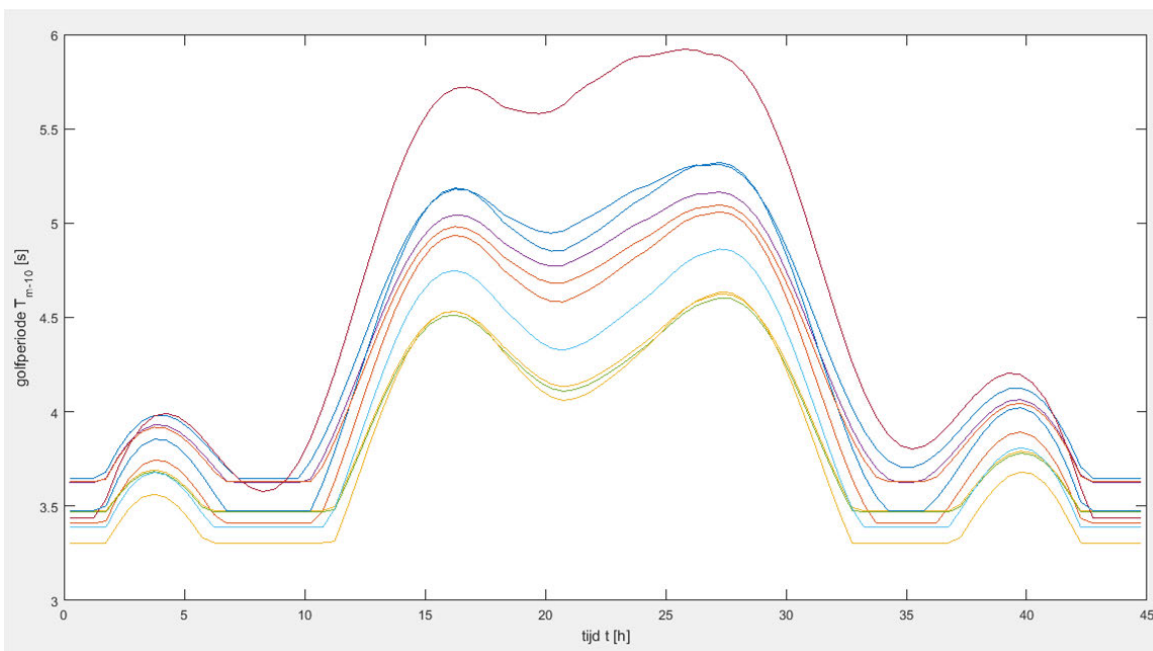
Figuur D.1 Waterstandsverloop als functie van de tijd van opzet, getij en som van beide.



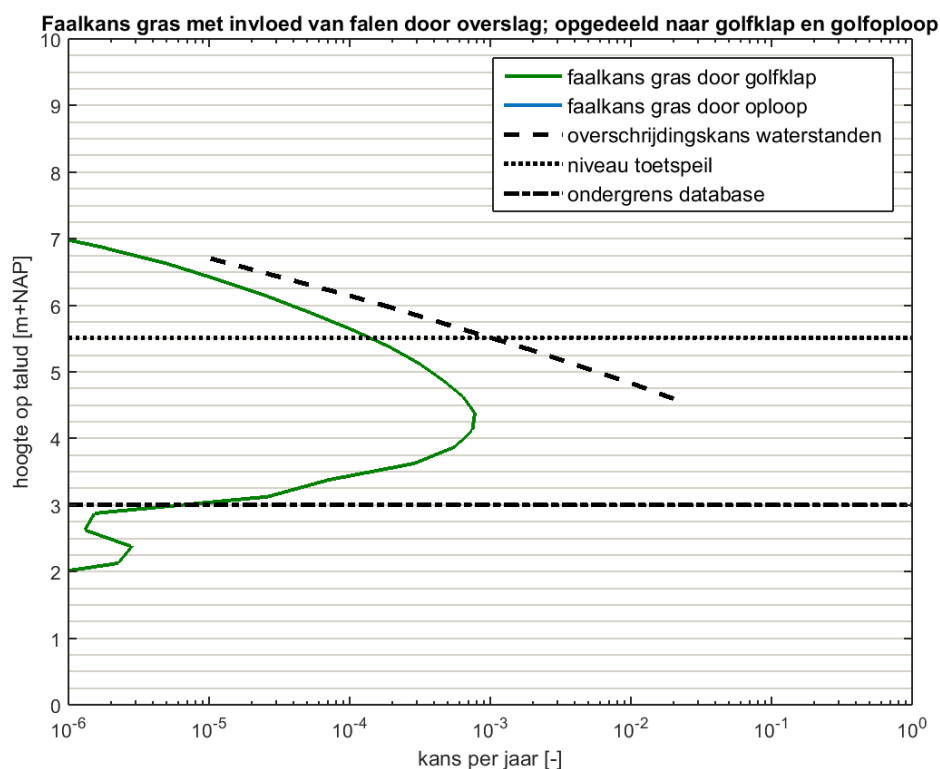
Figuur D.2 Voorbeeld van het waterstandsverloop als functie van de tijd in 10 stormen (selectie uit de stormen die gebruikt zijn in de Monte Carlo berekeningen).



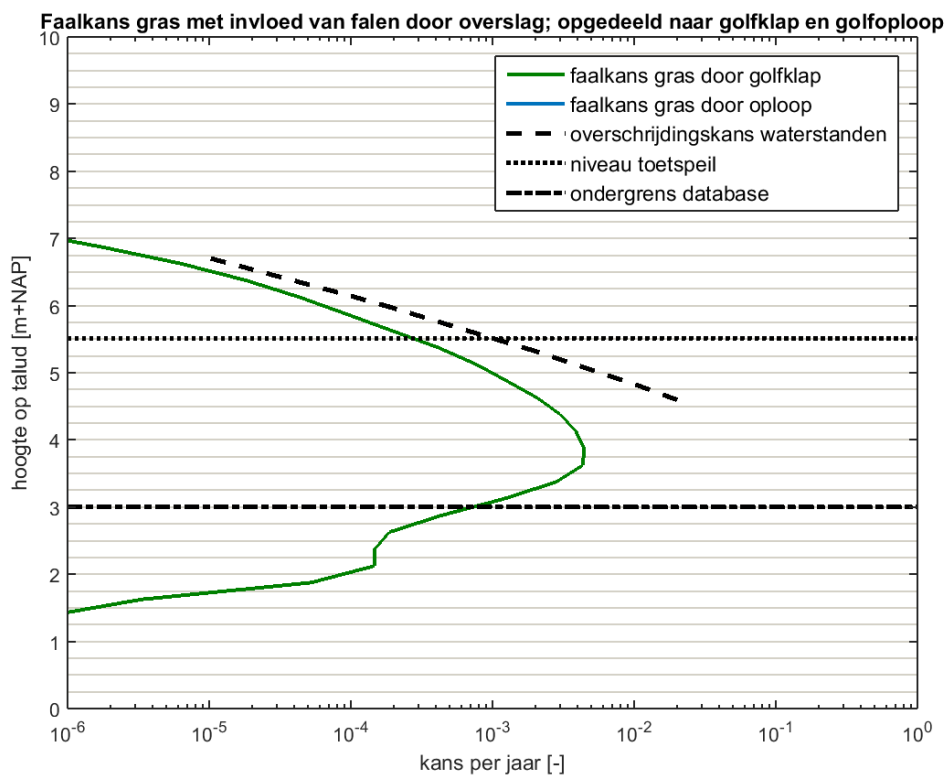
Figuur D.3 Verloop van de significante golfhoogte tijdens de 10 stormen uit Figuur D.2 (case ED 1) (als de waterstand onder NAP+1,0 m komt, wordt de golfhoogte constant gehouden).



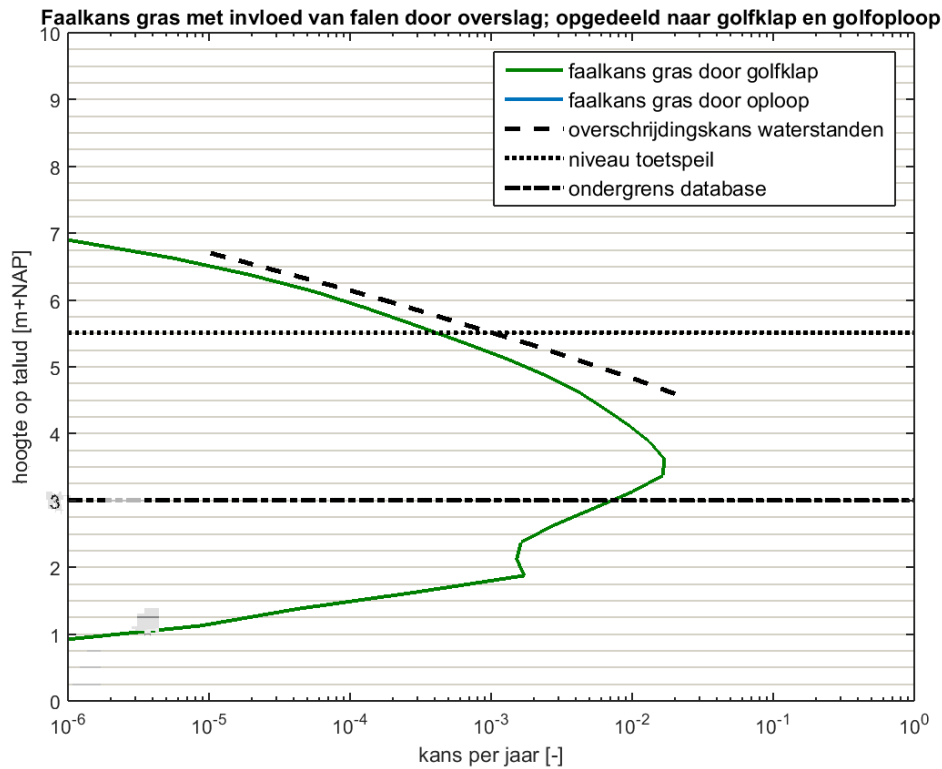
Figuur D.4 Verloop van de golfperiode tijdens de 10 stormen uit Figuur D.2 (case ED 1) (als de waterstand onder NAP+1,0 m komt, wordt de golfperiode constant gehouden).



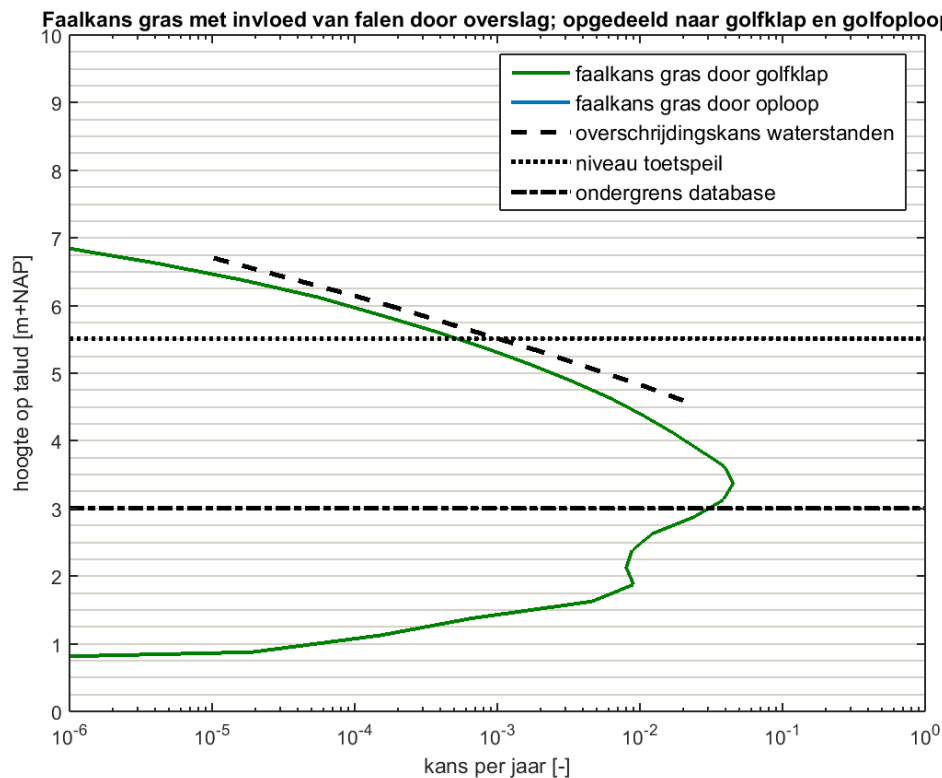
Figuur D.5 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case ED1).



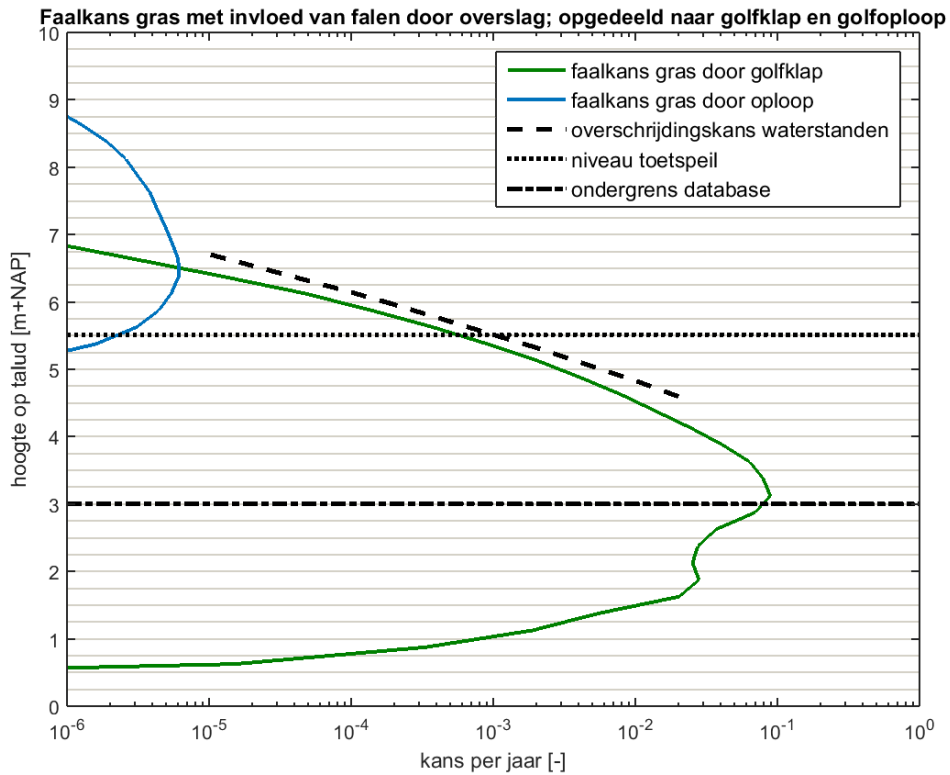
Figuur D.6 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case ED2).



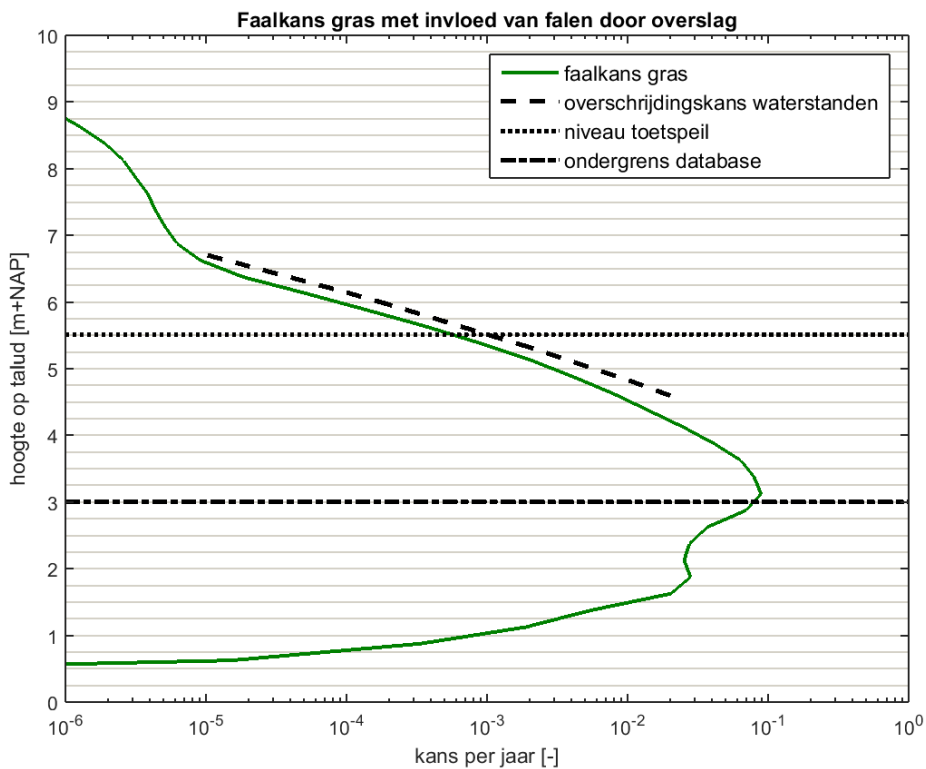
Figuur D.7 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case ED3).



Figuur D.8 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case ED4).

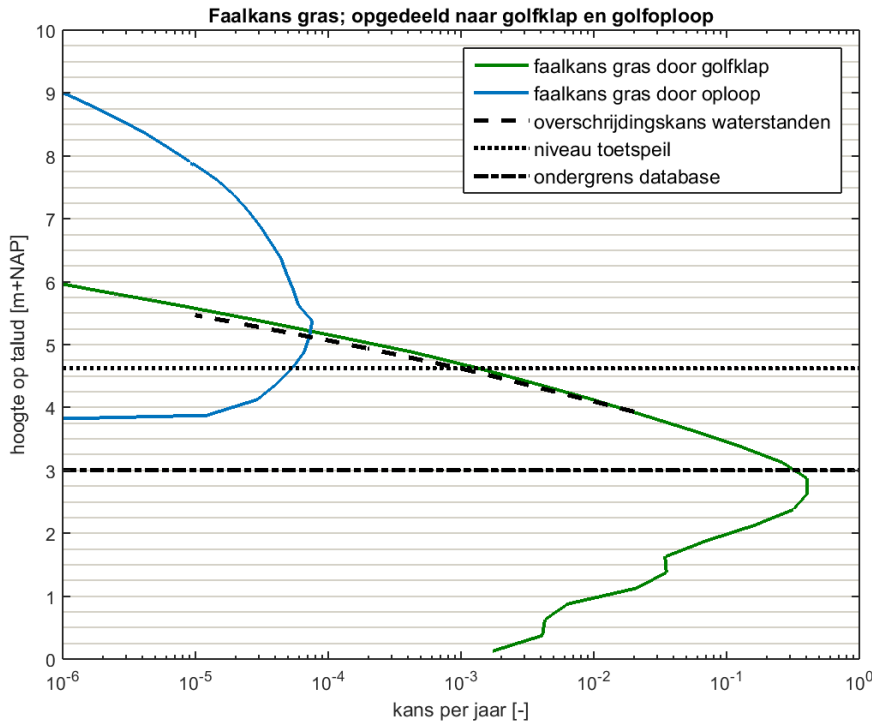


Figuur D.9 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case ED5).

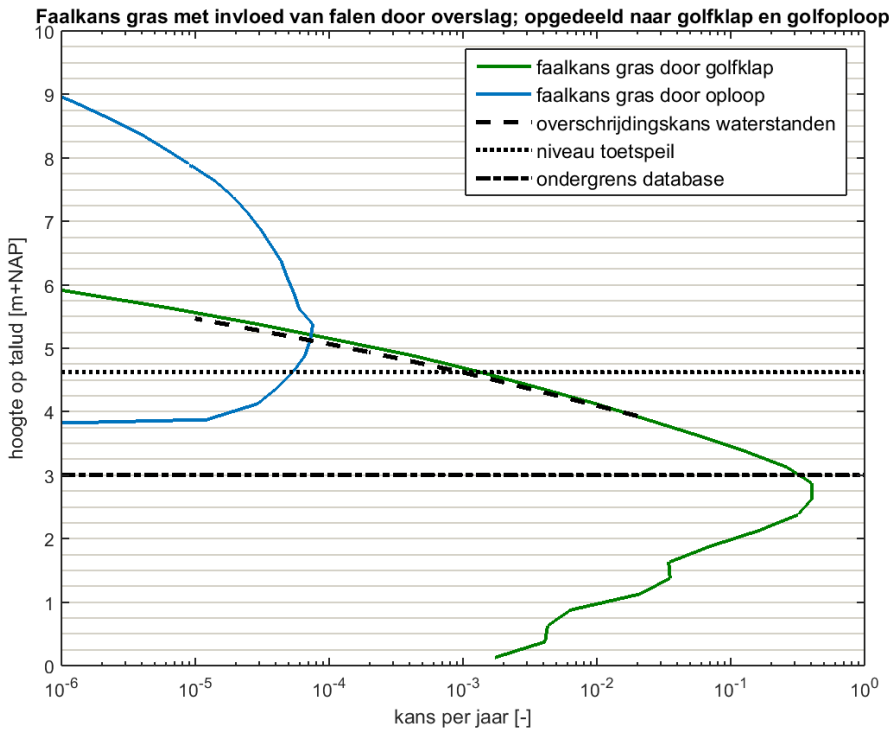


Figuur D.10 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, berekend met samengestelde erosie door het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case ED5).

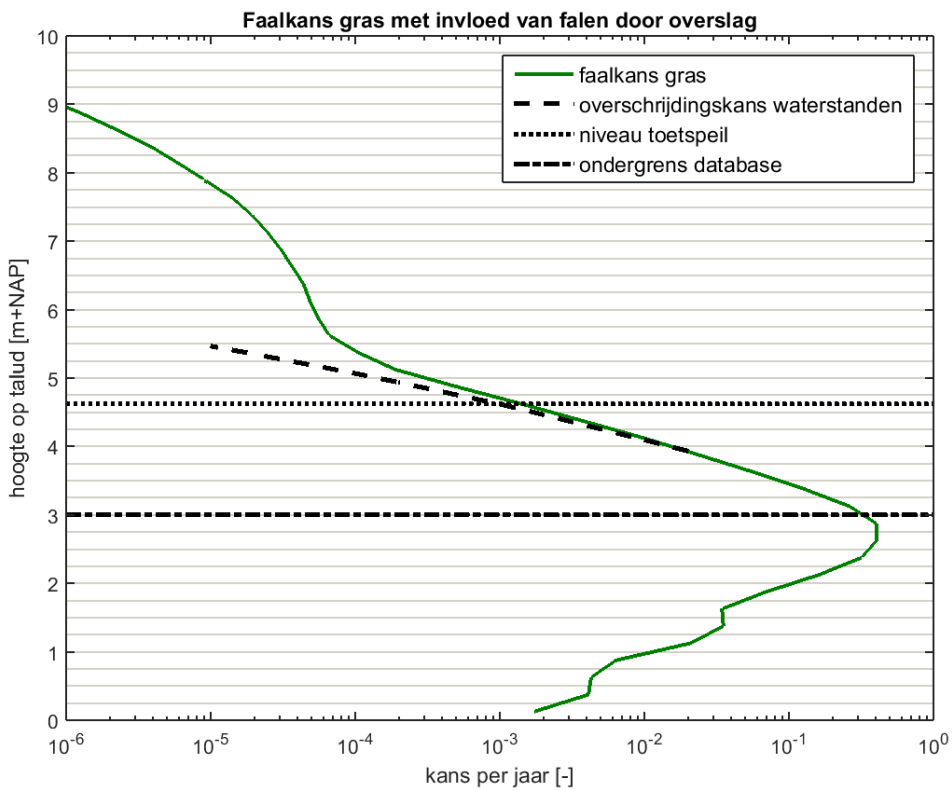
D.2 Harlingen



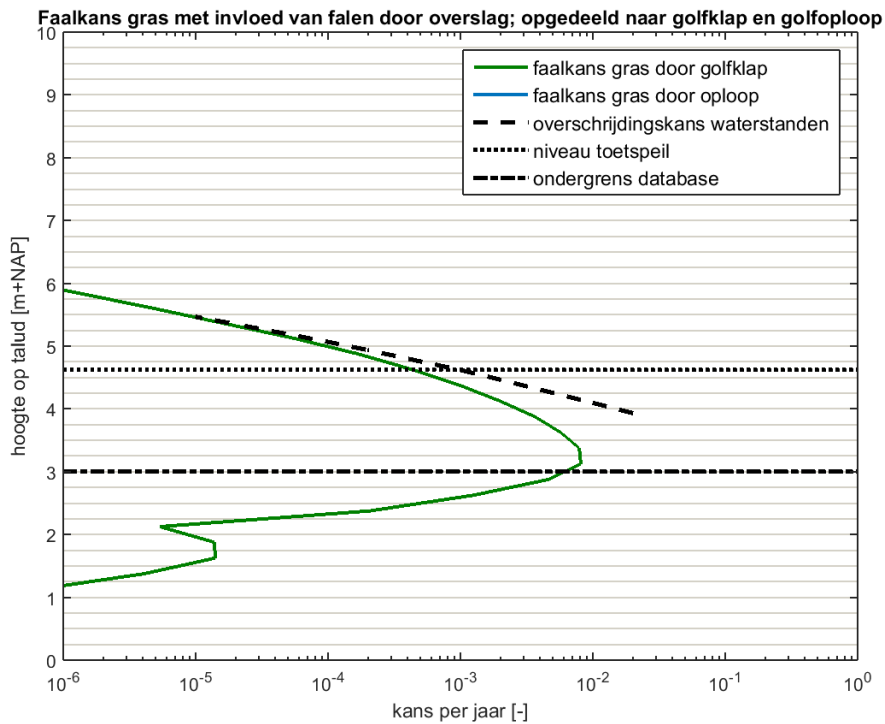
Figuur D.11 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfploop, zonder rekening te houden met het falen door golfoverslag (case HA1)



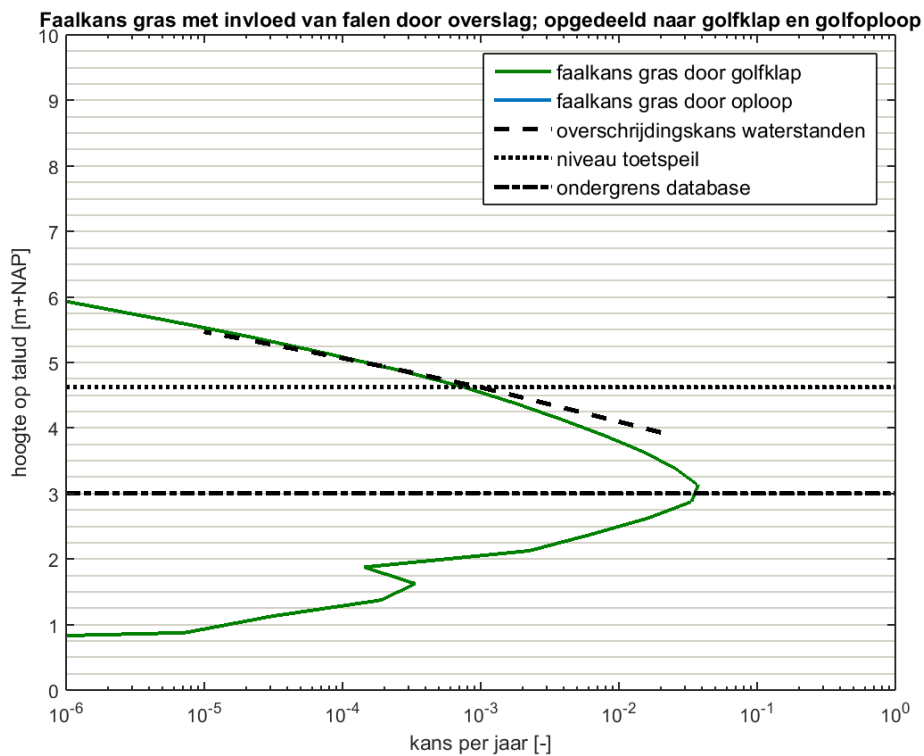
Figuur D.12 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case HA1).



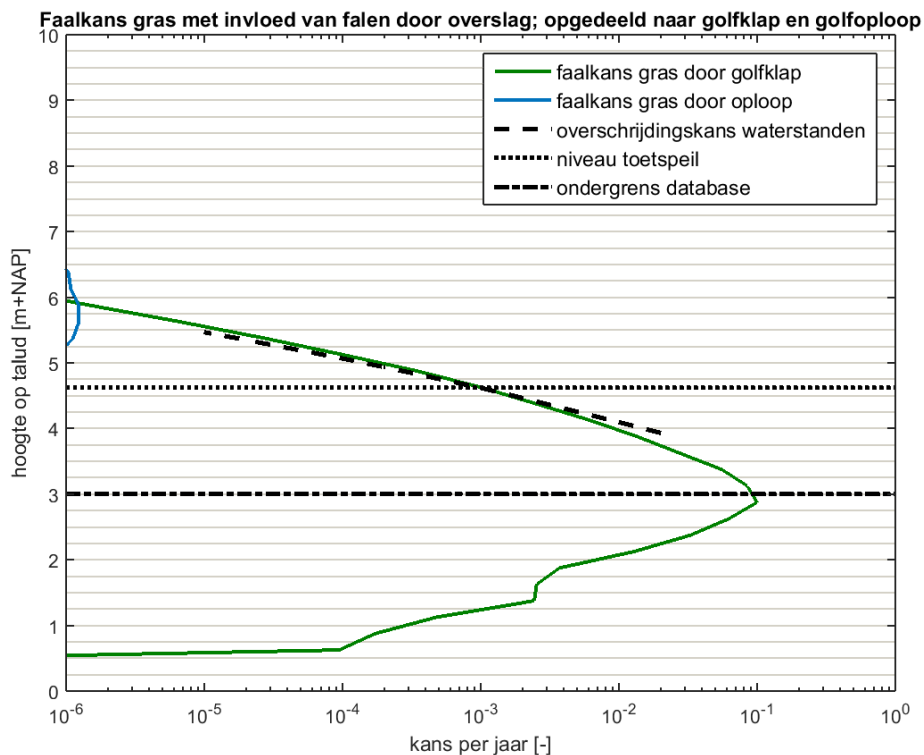
Figuur D.13 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, berekend met samengestelde erosie door het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case HA1).



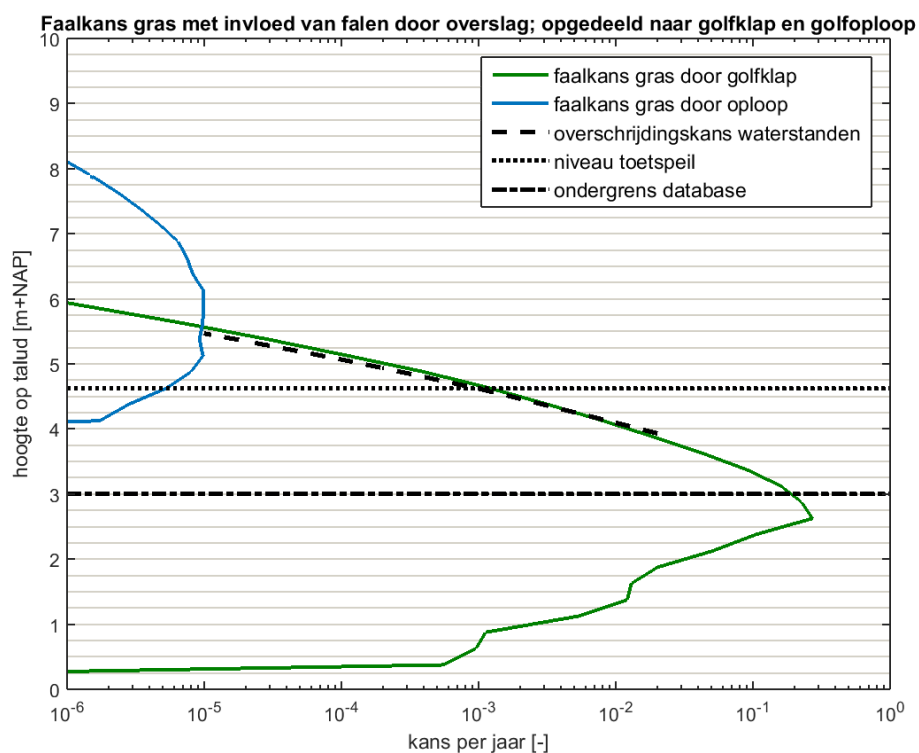
Figuur D.14 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case HA2).



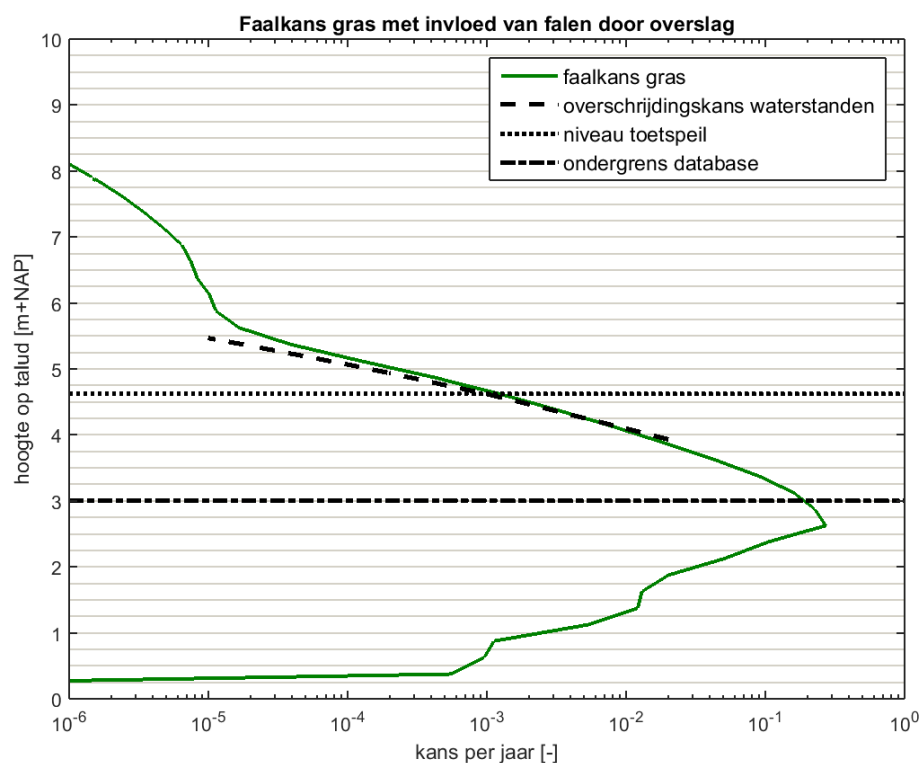
Figuur D.15 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case HA3).



Figuur D.16 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case HA4).

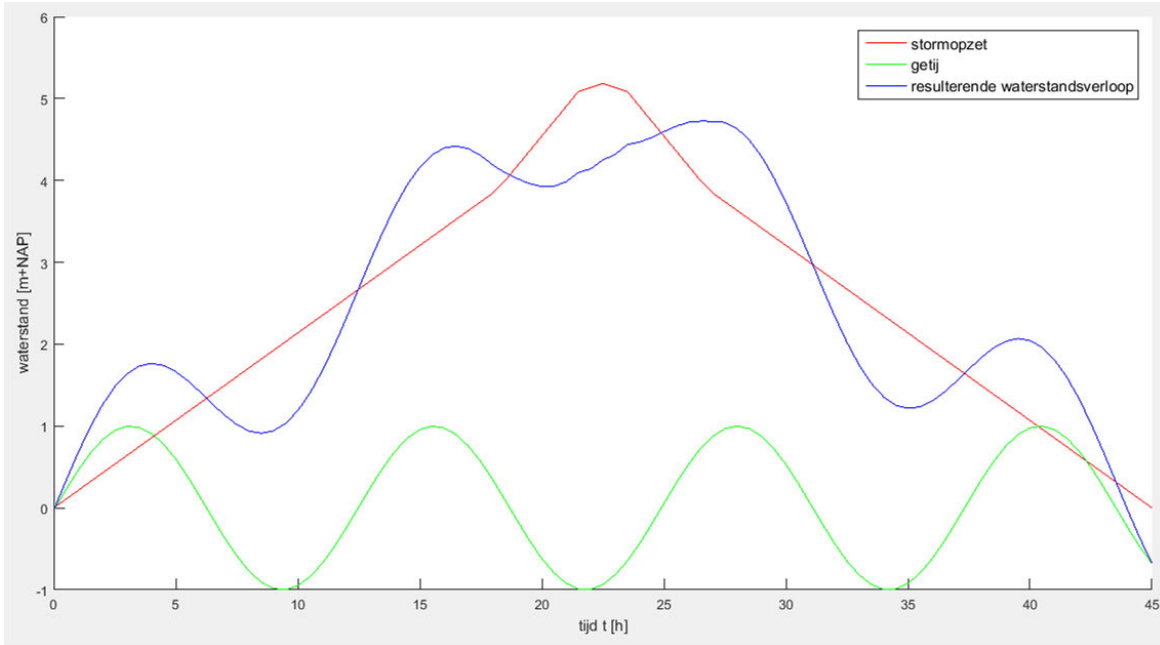


Figuur D.17 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case HA5).

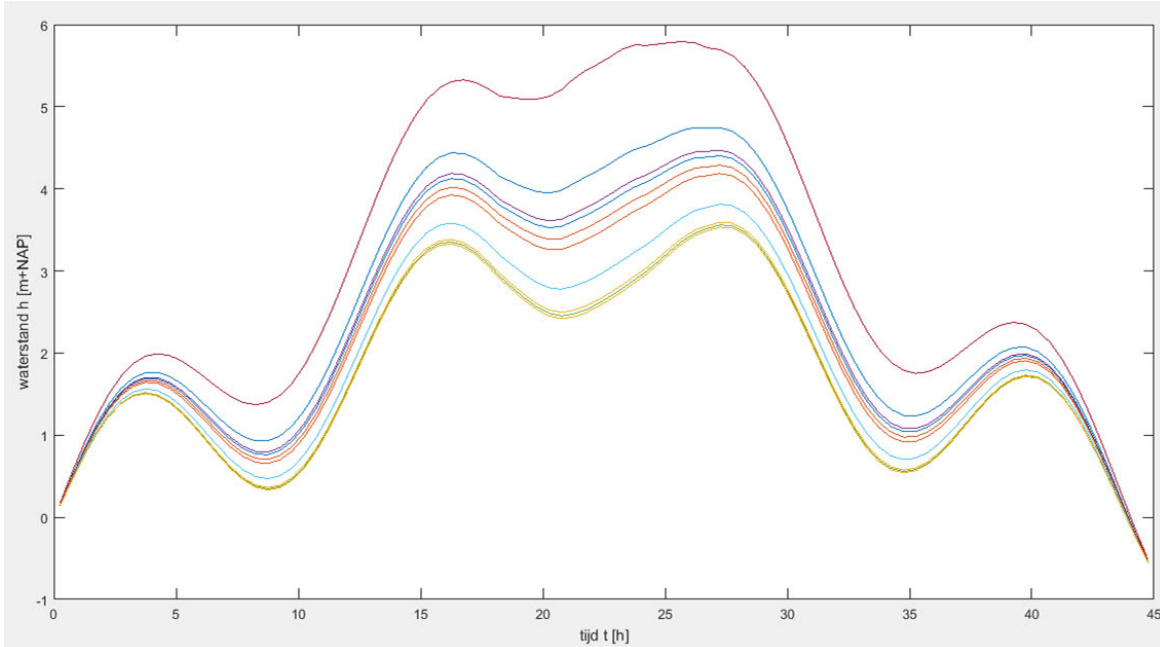


Figuur D.18 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, berekend met samengestelde erosie door het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case HA5).

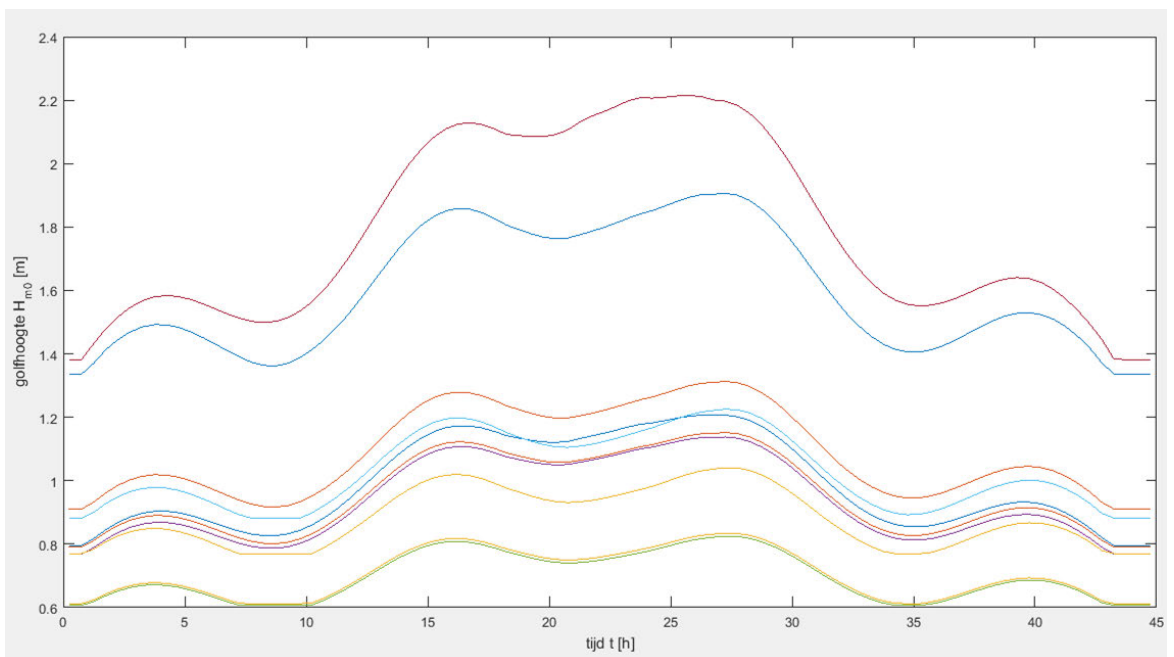
D.3 Lauwersmeerdijk



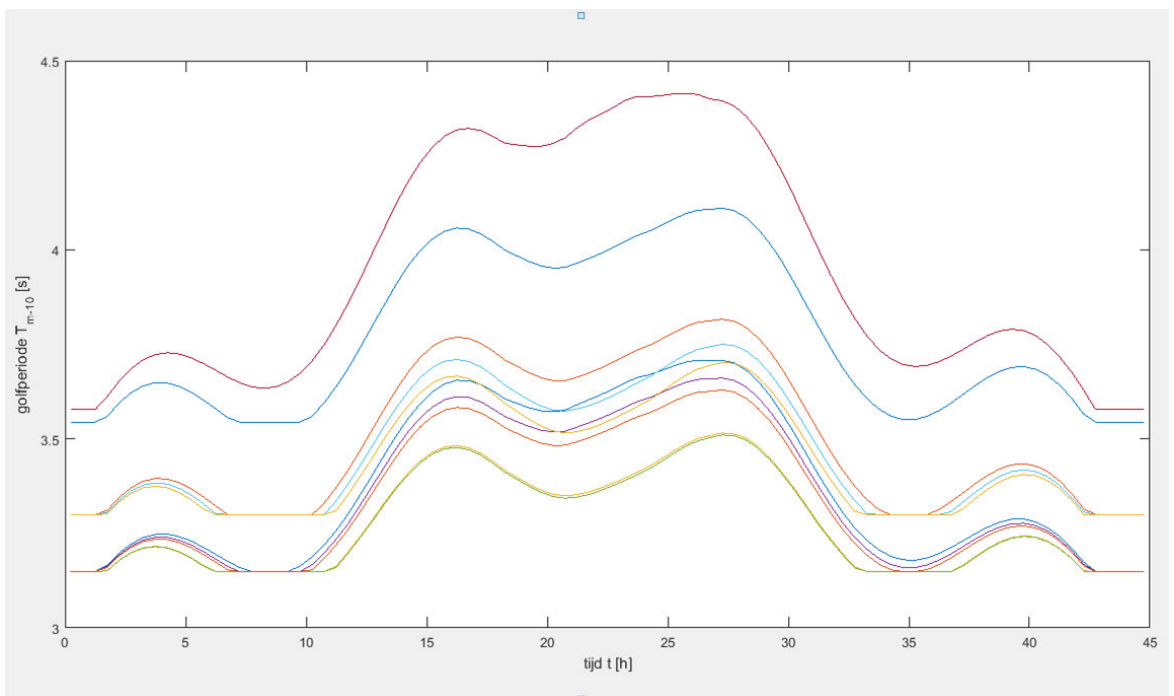
Figuur D.19 Waterstandsverloop als functie van de tijd van opzet, getij en som van beide.



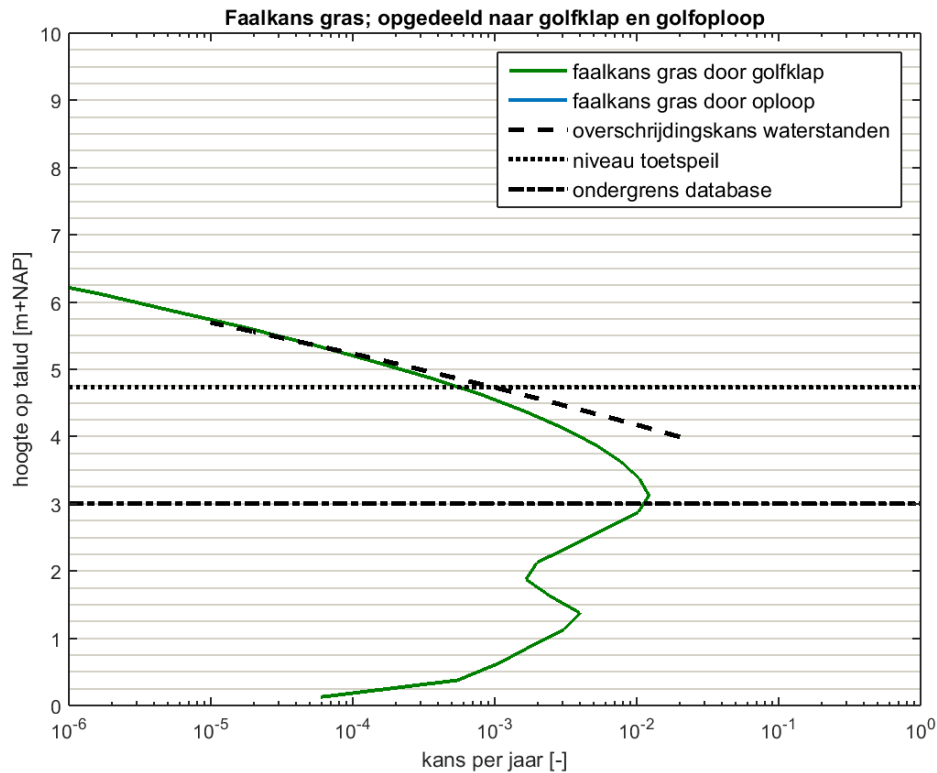
Figuur D.20 Voorbeeld van het waterstandsverloop als functie van de tijd in 10 stormen (selectie uit de stormen die gebruikt zijn in de Monte Carlo berekeningen).



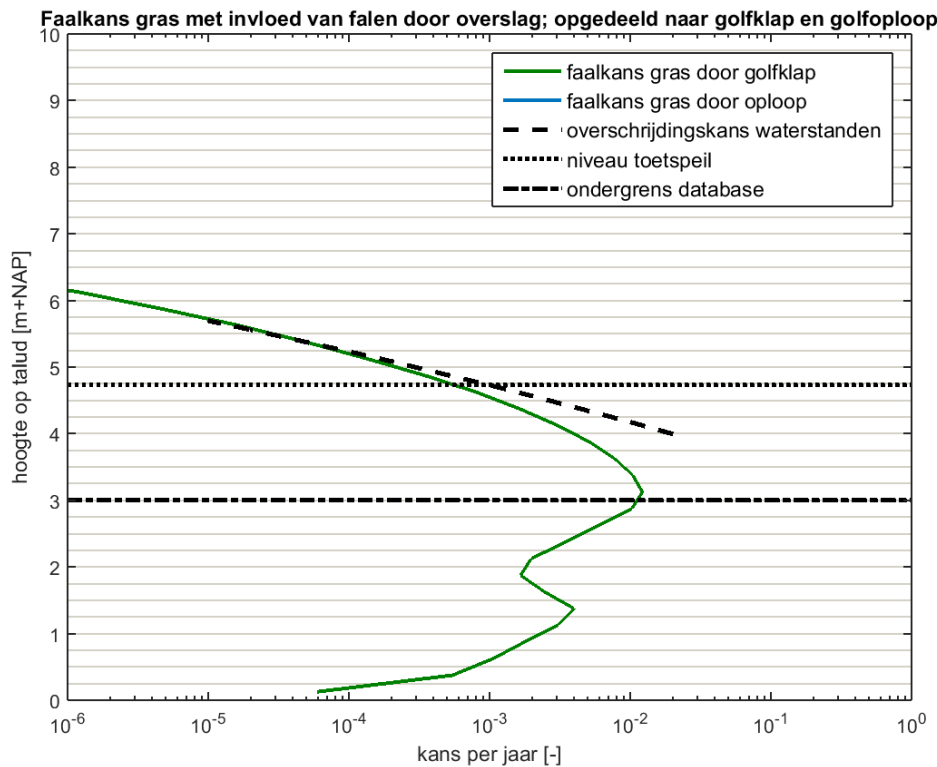
Figuur D.21 Verloop van de significante golfhoogte tijdens de 10 stormen uit Figuur D.20 (case LM) (als de waterstand onder NAP+1,0 m komt, wordt de golfhoogte constant gehouden).



Figuur D.22 Verloop van de golfperiode tijdens de 10 stormen uit Figuur D.20 (case LM) (als de waterstand onder NAP+1,0 m komt, wordt de golfperiode constant gehouden).

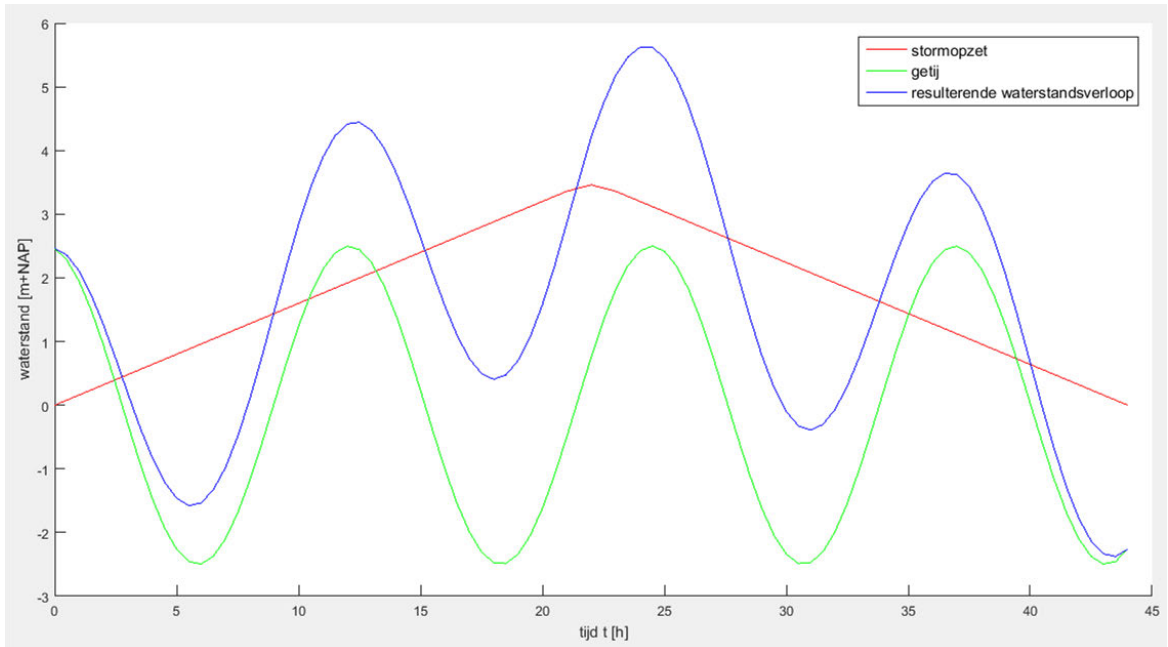


Figuur D.23 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfploop, zonder rekening te houden met het falen door golfoverslag (case LM)

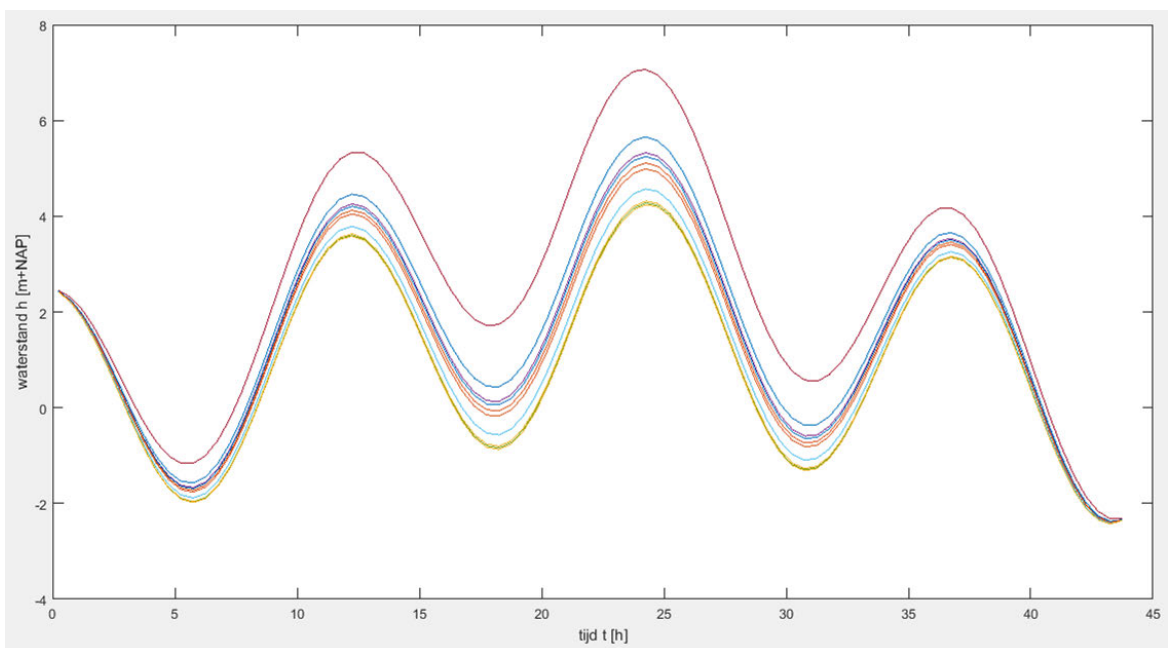


Figuur D.24 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case LM).

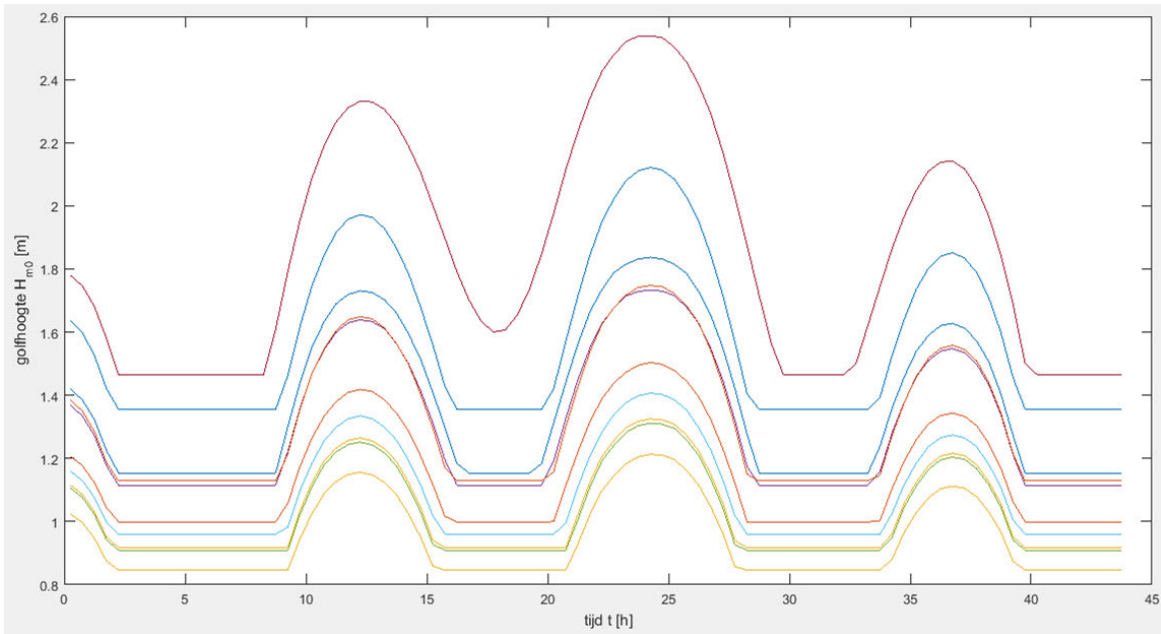
D.4 Ossenisse



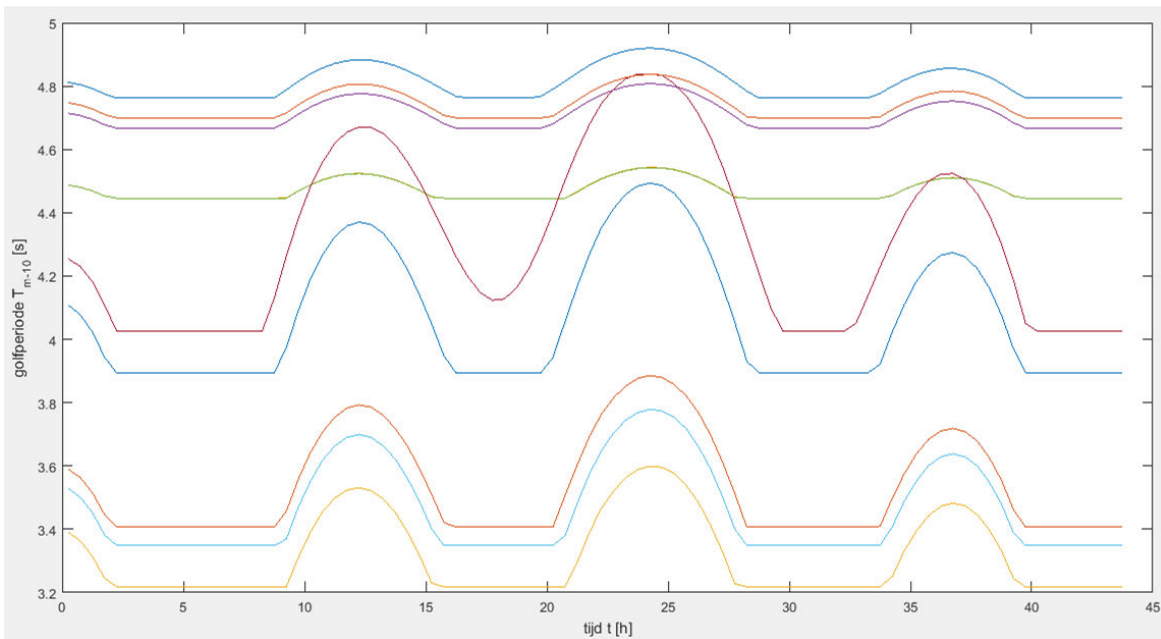
Figuur D.25 Waterstandsverloop als functie van de tijd van opzet, getij en som van beide.



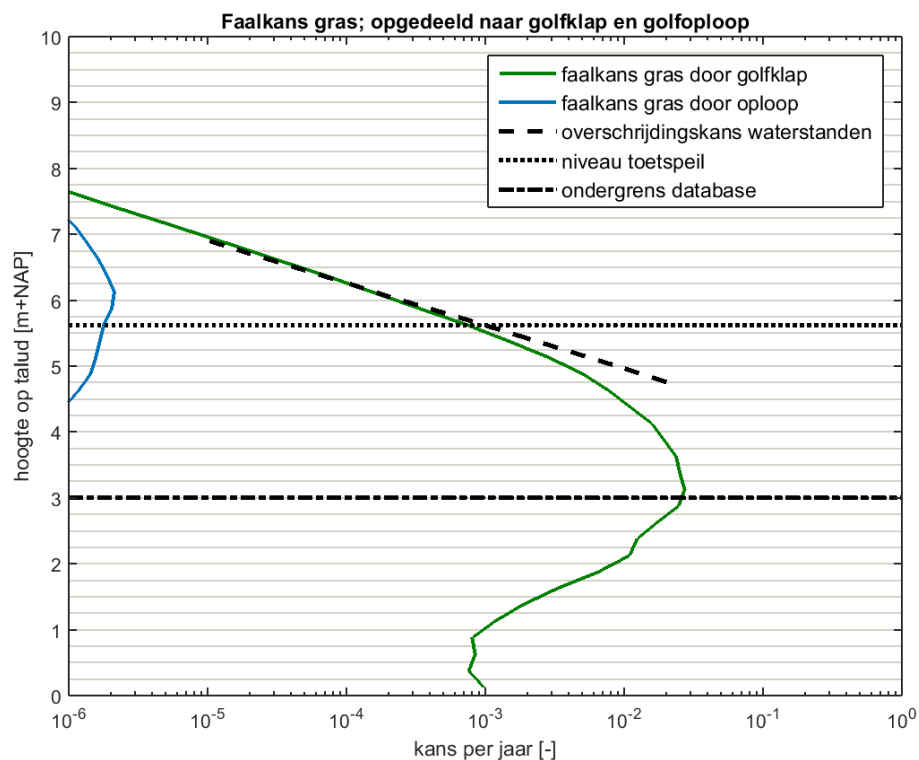
Figuur D.26 Voorbeeld van het waterstandsverloop als functie van de tijd in 10 stormen (selectie uit de stormen die gebruikt zijn in de Monte Carlo berekeningen).



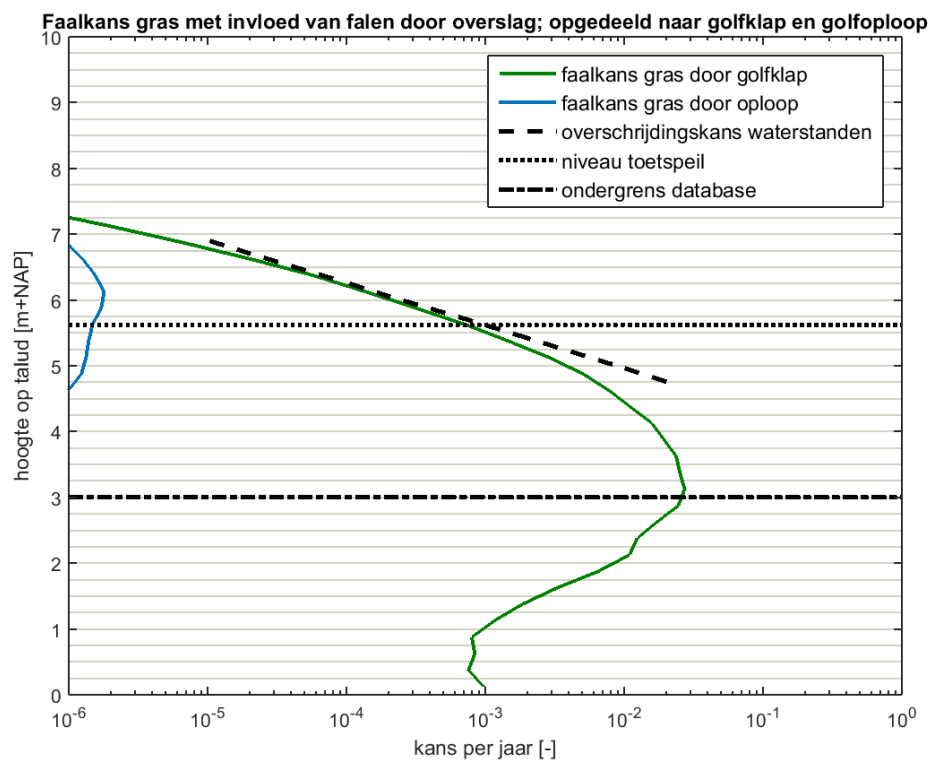
Figuur D.27 Verloop van de significante golfhoogte tijdens de 10 stormen uit Figuur D.26 (case OS) (als de waterstand onder NAP+1,0 m komt, wordt de golfhoogte constant gehouden).



Figuur D.28 Verloop van de golfperiode tijdens de 10 stormen uit Figuur D.26 (case OS) (als de waterstand onder NAP+1,0 m komt, wordt de golfperiode constant gehouden).

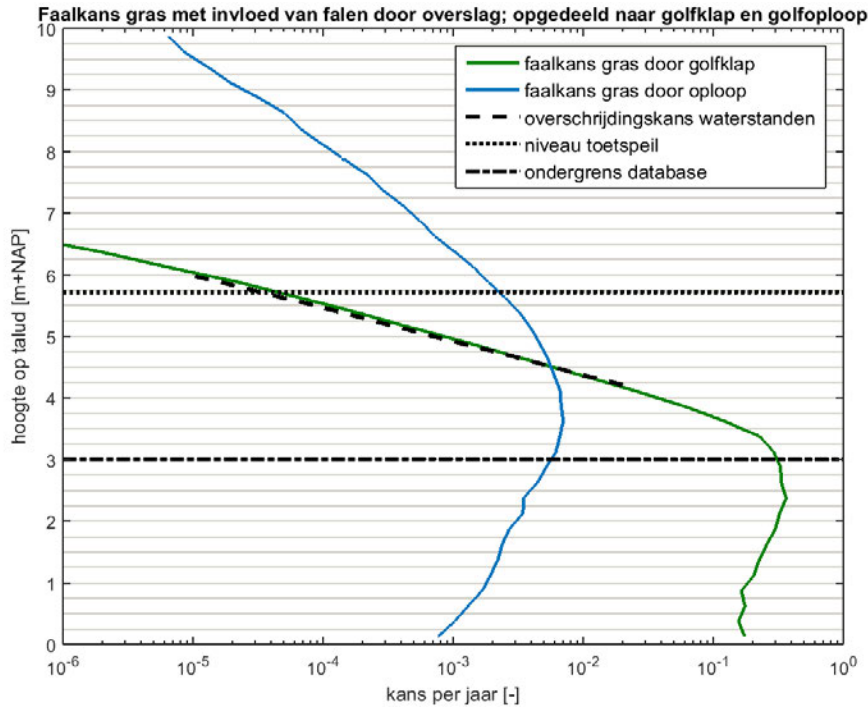


Figuur D.29 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop, zonder rekening te houden met het falen door golfoverslag (case OS)

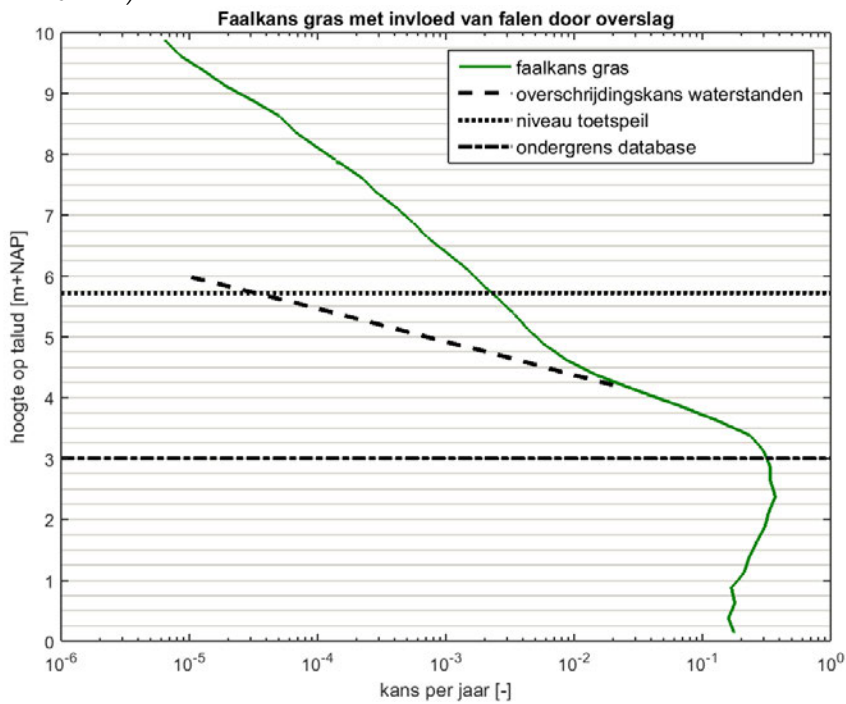


Figuur D.30 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case OS).

D.5 Vlissingen

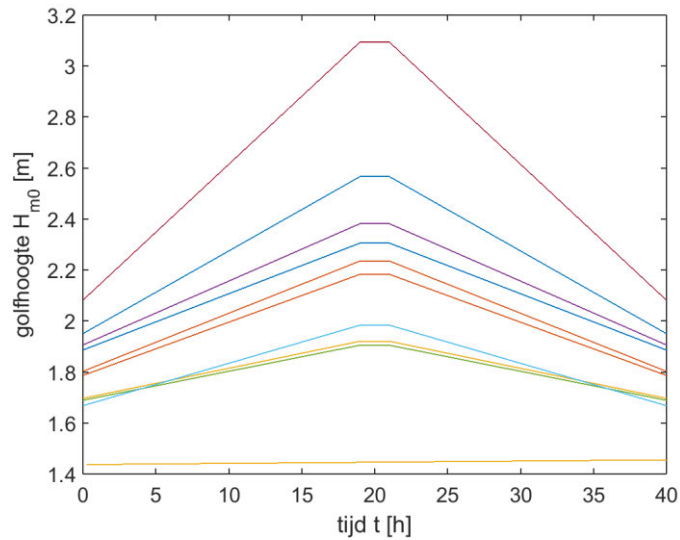


Figuur D.31 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case VL1 en VL2).

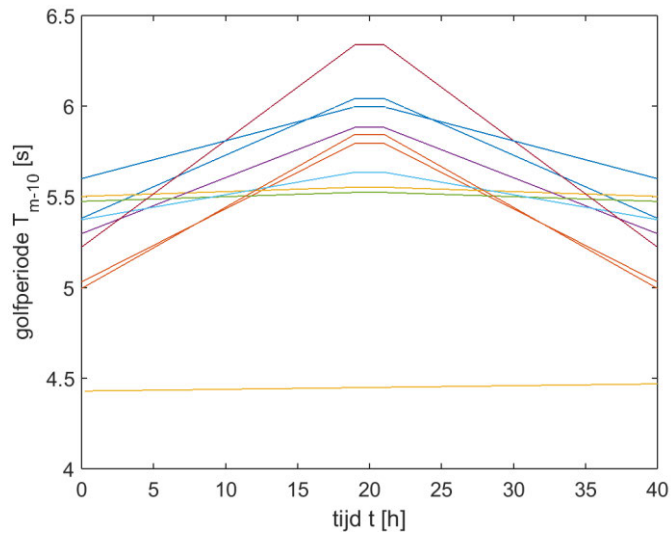


Figuur D.32 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, berekend met samengestelde erosie door het mechanisme golfklap en golfoploop, waarbij falen door golfoverslag wordt gezien als niet falen van het buitentalud (case VL1 en VL2).

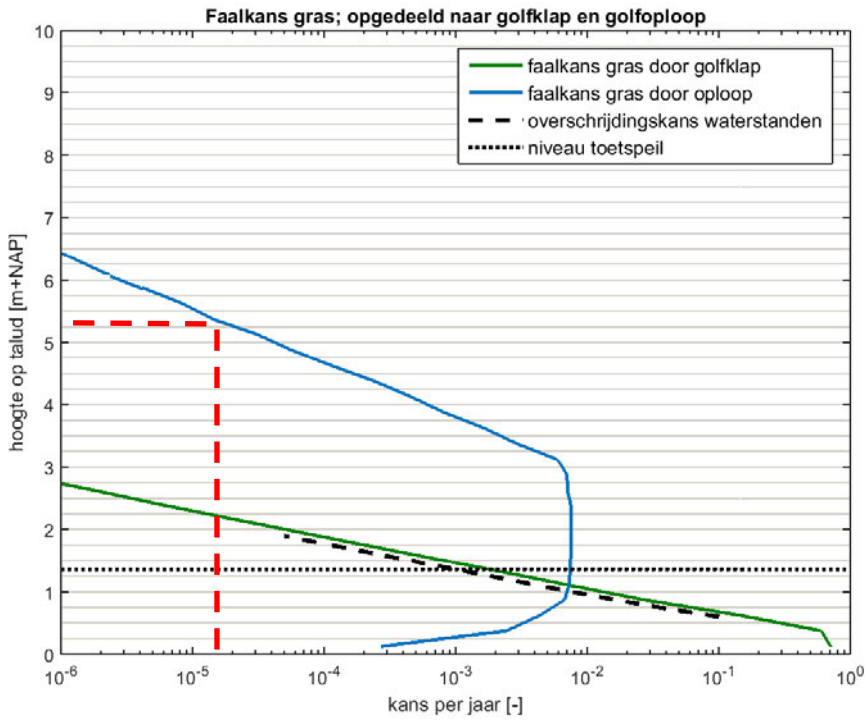
D.6 Urk



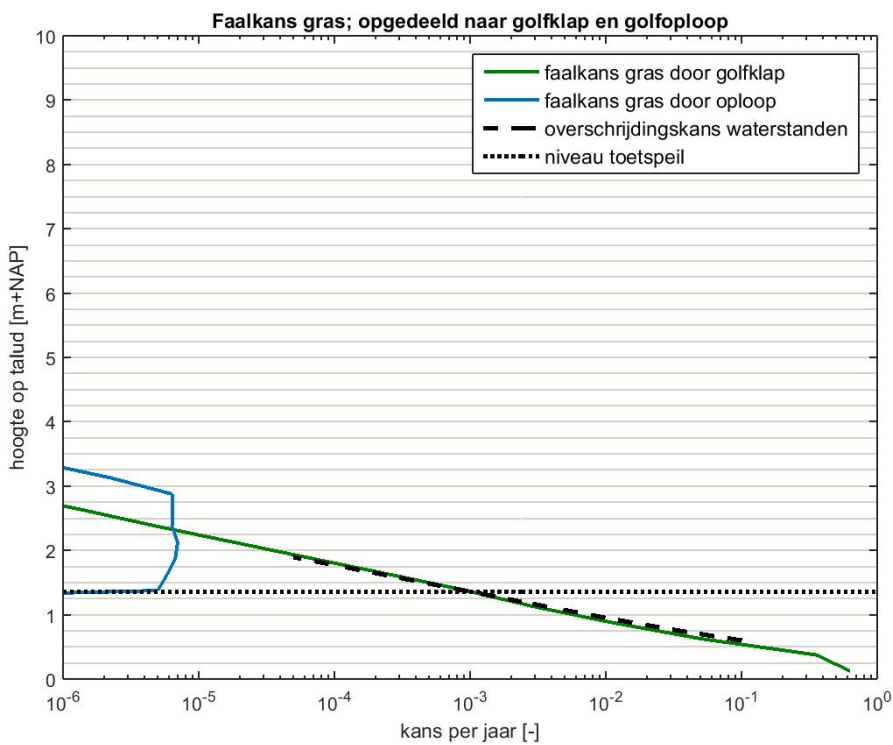
Figuur D.33 Verloop van de significante golfhoogte tijdens de 10 stormen uit Figuur 6.5 (case Urk 1).



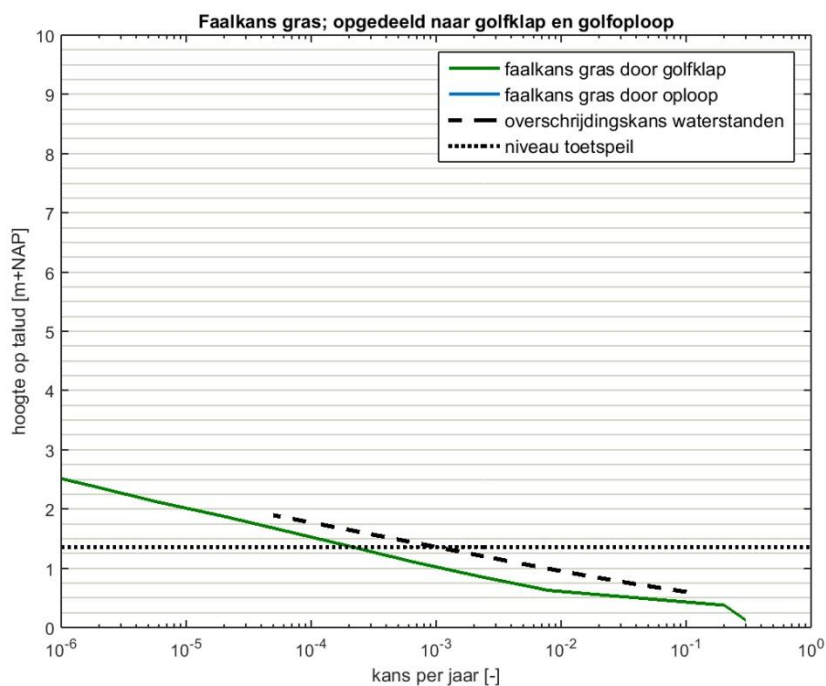
Figuur D.34 Verloop van de golfperiode tijdens de 10 stormen uit Figuur 6.5 (case Urk 1).



Figuur D.35 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Urk1)

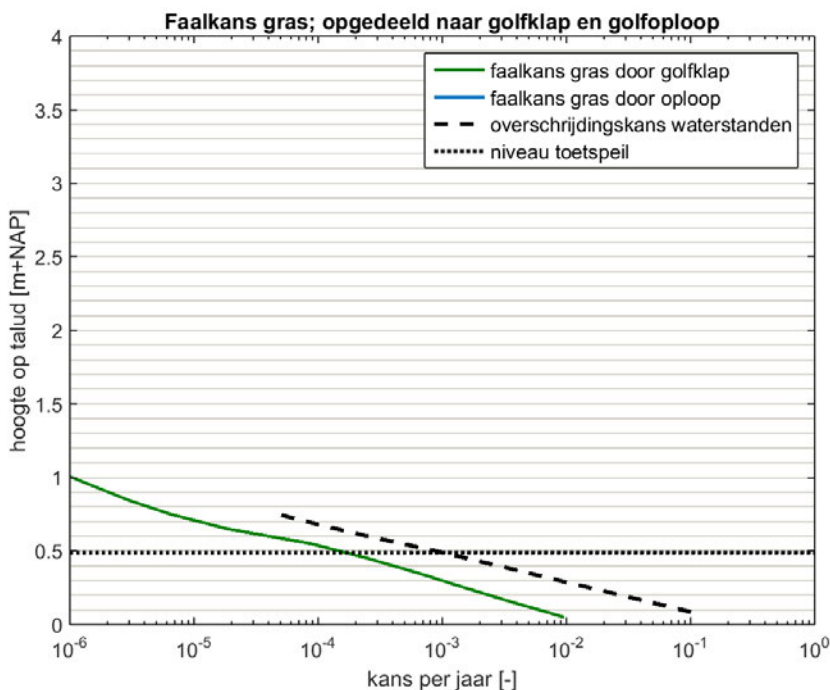


Figuur D.36 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Urk2)

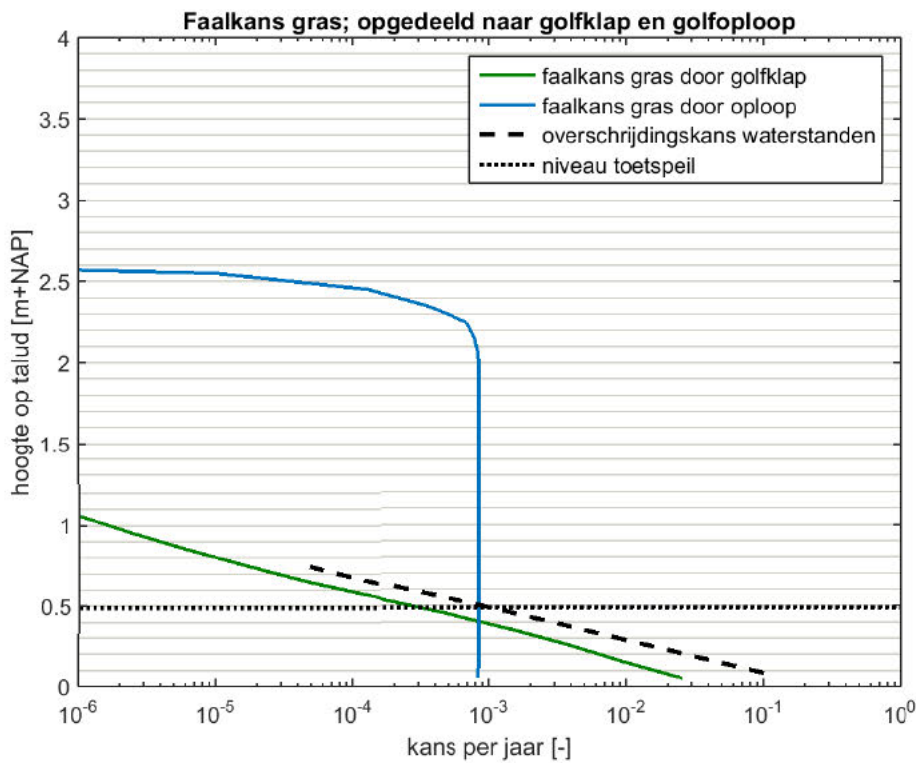


Figuur D.37 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Urk3)

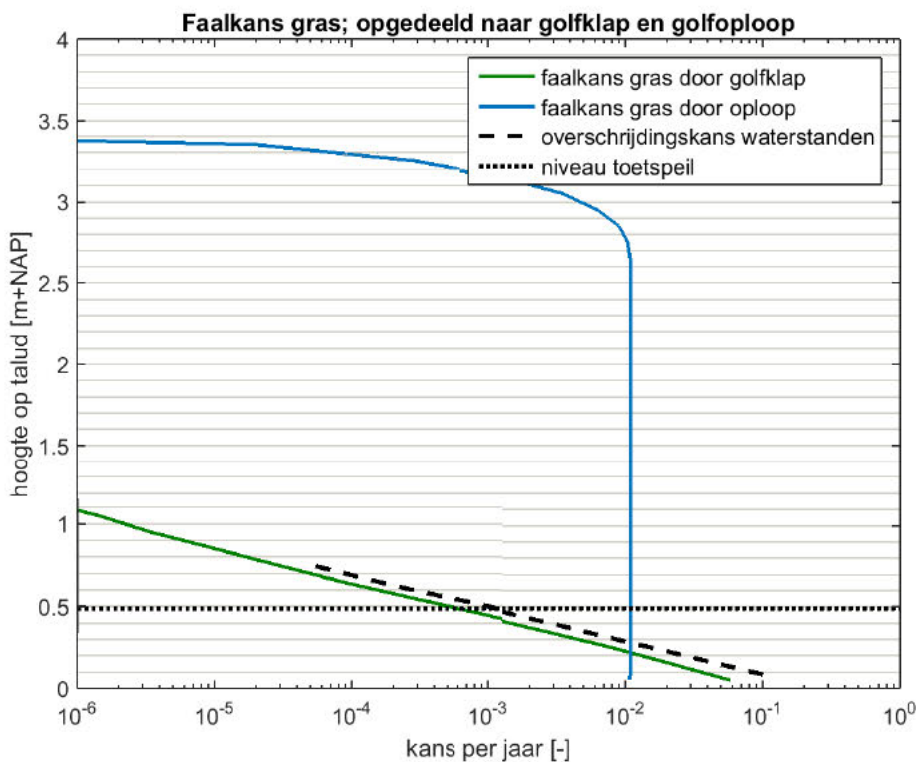
D.7 Edam op basis van trekking van waterstand en windrichting



Figuur D.38 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Edam1)

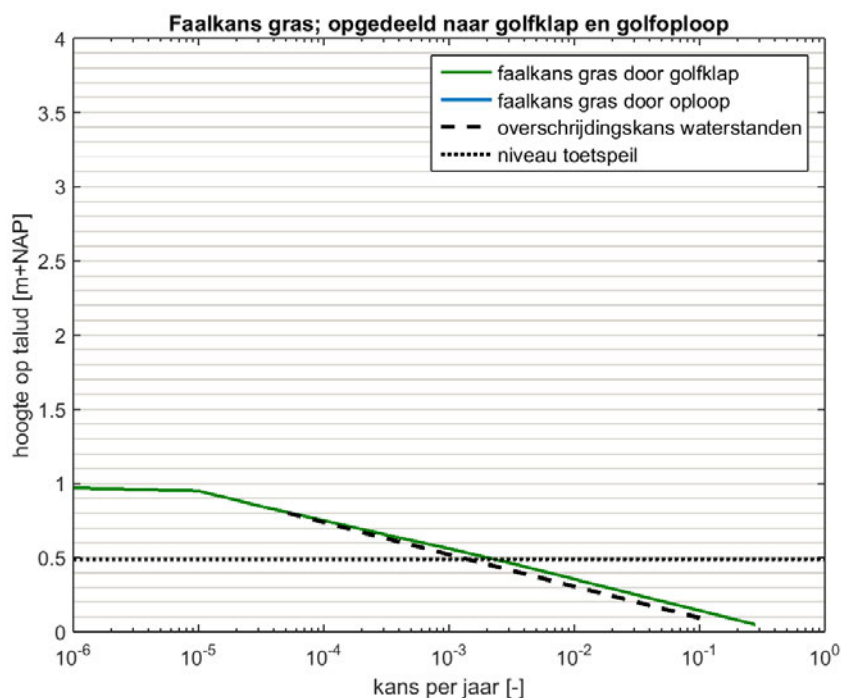


Figuur D.39 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud (case Edam2) (golfloopmechanisme berekend met 100.000 samples zonder Importance sampling)

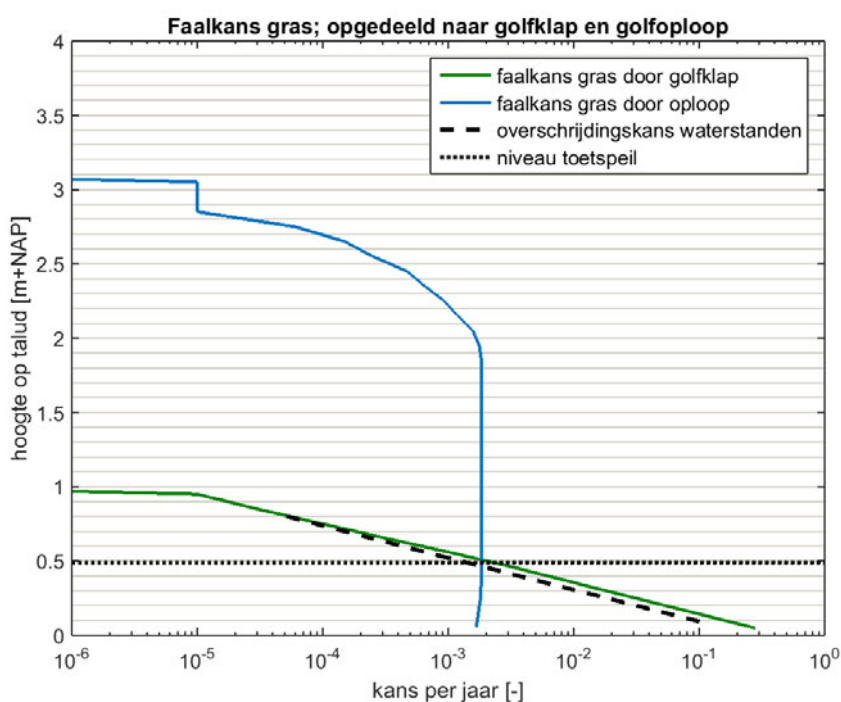


Figuur D.40 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfloop (case Edam3) (golfloopmechanisme berekend met 100.000 samples zonder Importance sampling)

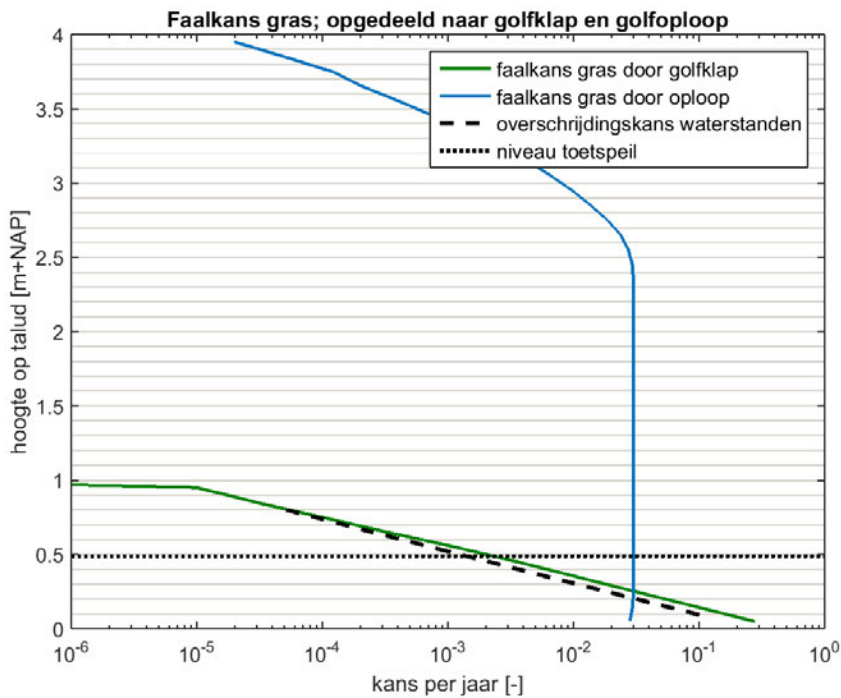
D.8 Edam op basis van marginale statistiek van waterstand en golfhoogte



Figuur D.41 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Edam1)

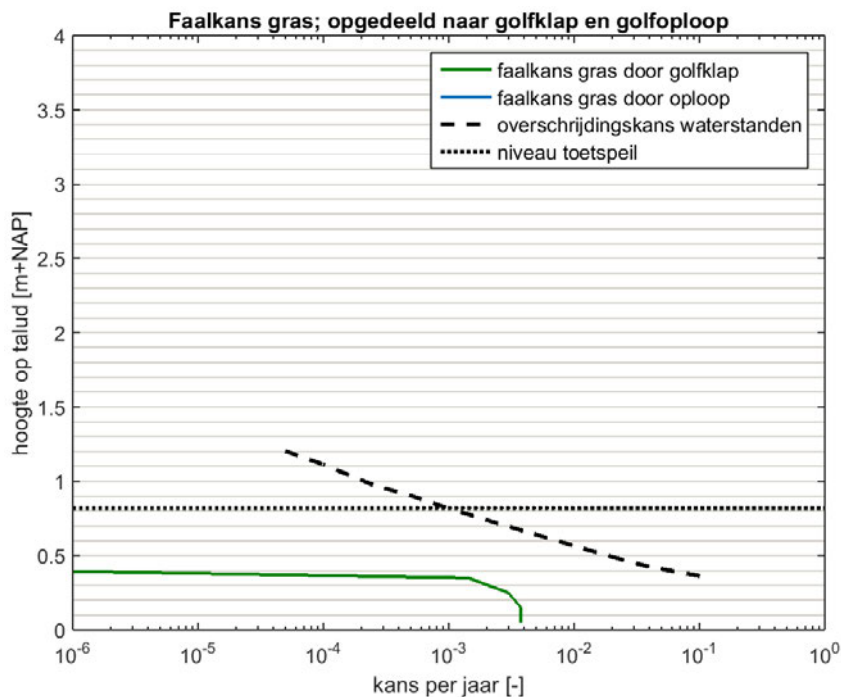


Figuur D.42 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Edam2)

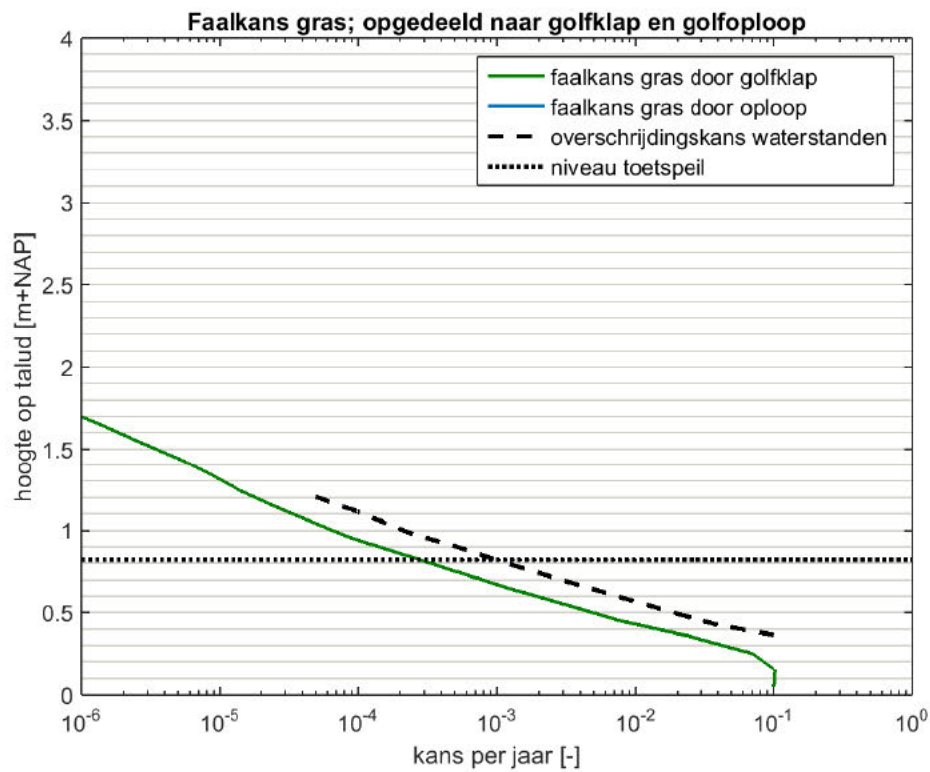


Figuur D.43 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Edam3)

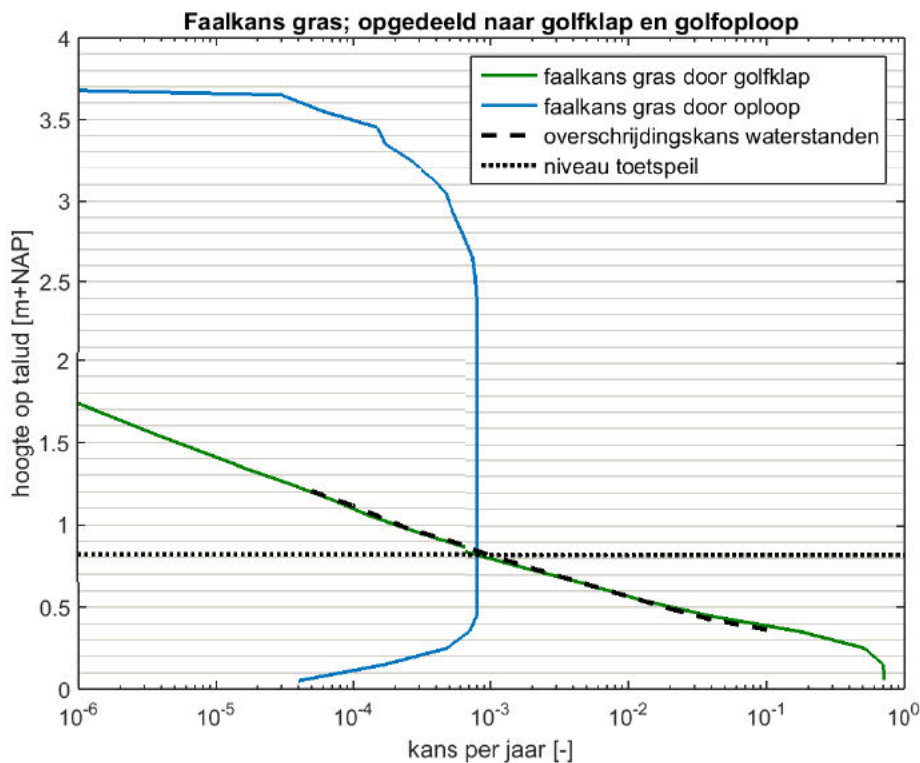
D.9 Enkhuizen op basis van trekking van waterstand en windrichting



Figuur D.44 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Enkhuizen1)

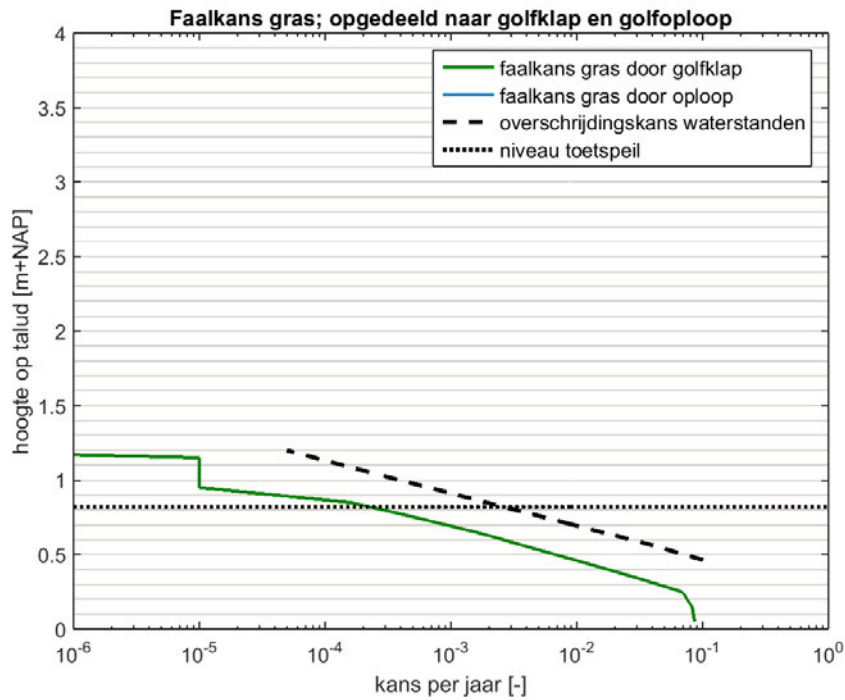


Figuur D.45 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Enkhuizen2)

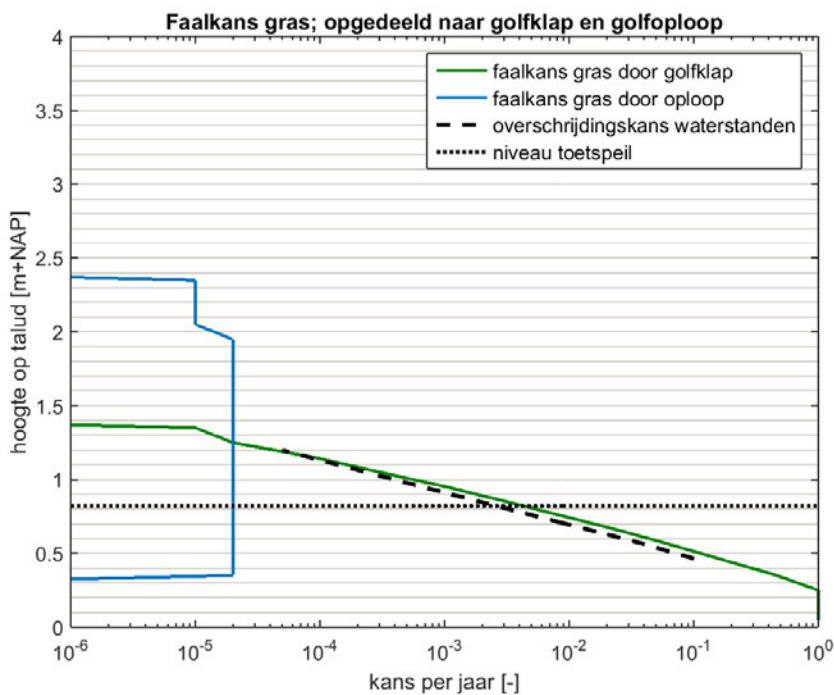


Figuur D.46 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Enkhuizen3) (golfoploopmechanisme berekend met 100.000 samples zonder Importance sampling)

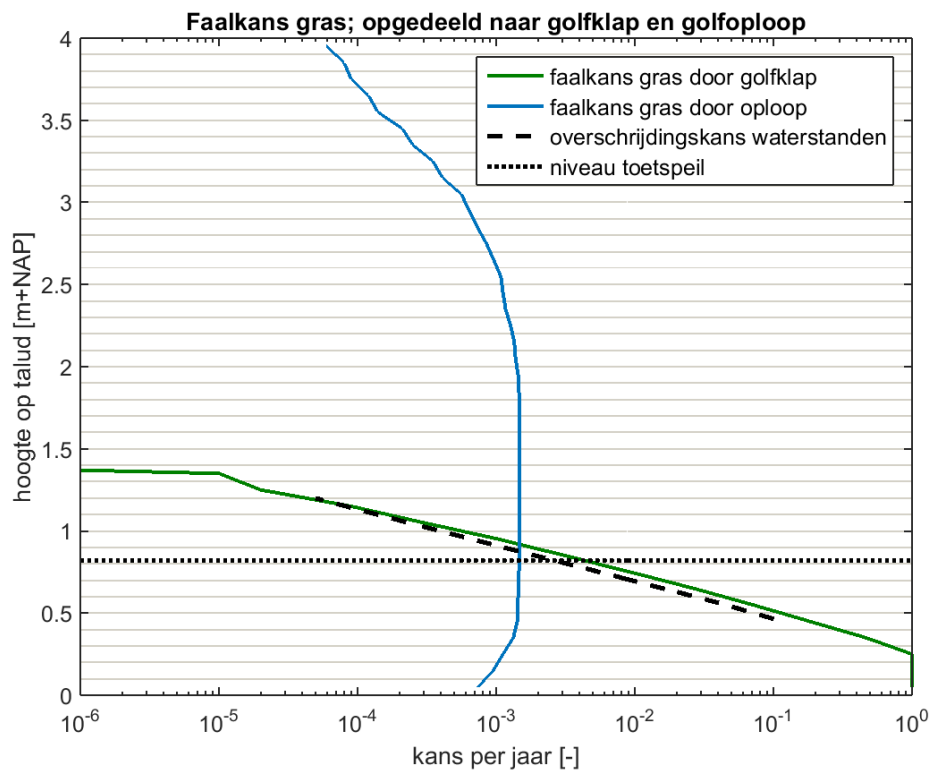
D.10 Enkhuizen op basis van marginale statistiek van waterstand en golfhoogte



Figuur D.47 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Enkhuizen1)



Figuur D.48 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Enkhuizen2)



Figuur D.49 Faalkans van het gras als functie van het niveau op het talud, opgesplitst naar het mechanisme golfklap en golfoploop (case Enkhuizen3)

E Werkwijze in voorgestelde rekenmethode

In deze bijlage is de rekenmethode stap voor stap beschreven. Voor een voorbeeldberekening wordt verwezen naar bijlage G.

E.1 Stap 1: overschrijdingskansen bepalen

Voor het bepalen van de noodzakelijke hoogte van de overgang van de harde dijkbekleding naar gras moet eerst de norm opgezocht worden in de Waterwet. Op basis van de daar vermelde maximaal toelaatbare faalkans P_{\max} wordt P_T berekend:

- maximaal toelaatbare faalkans voor het traject: bijvoorbeeld: $P_{\max} = 1/1000$ per jaar (de signaleringswaarde uit de wet is een factor 1 à 3 kleiner, dus bijvoorbeeld $1/3000$ per jaar)
- maximaal toelaatbare faalkans voor de bekledingen: $P_B = 0,1 \cdot P_{\max}$, in dit voorbeeld: $P_B = 1/10.000$ per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor gras voor het traject: $P_G = 0,5 \cdot P_B$, in dit voorbeeld: $P_G = 1/20.000$ per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor het traject: $P_{GE} = 0,9 \cdot P_G$, in dit voorbeeld: $P_{GE} = 1/22.000$ per jaar.
- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor een specifieke locatie op de dijk (dijkdoorsnede): $P_T = P_{GE}/3$, in dit voorbeeld: $P_T = 1/67.000$ per jaar. Hierin is de factor 3 de lengte-effectfactor voor de hoogte van de waterkering (zie bijlage A in OI2014v3 RWS (2015)).

E.2 Stap 2: hydraulische randvoorwaarden bij P_{\max} en P_T

De hydraulische randvoorwaarden worden berekend met de Hydra-software. In de uitvoer van illustratiepunten van de marginale statistiek van de waterstanden moeten de volgende waterstanden worden afgelezen:

- $h_{P_{\max}}$: waterstand met overschrijdingskans van P_{\max}
- h_{P_T} : waterstand met overschrijdingskans P_T

Opgemerkt moet worden dat in oktober 2016 de beoordelingsmethode van gras in de ophoopzone is aangepast. Sindsdien hoeft alleen nog de belasting met overschrijdingskans P_T beschouwd te worden (met aangepast veiligheidsfactoren). Deze wijziging is in dit rapport nog niet doorgevoerd.

In Hydra-software kunnen de hydraulische randvoorwaarden berekend worden voor diverse herhalingstijden (= $1/\text{overschrijdingskans}$). Mochten er rekenresultaten beschikbaar zijn, die niet precies overeenkomen met P_{\max} en P_T , dan kunnen tussenliggende waarden berekend worden door lineair te interpoleren met $\log(\text{herhalingstijd})$:

$$x_T = \frac{(x_2 - x_1)}{\log(T_2) - \log(T_1)} (\log(T) - \log(T_1)) + x_1 \quad (5.1)$$

Met:

x_T = waarde bij herhalingstijd T , die niet vermeld staat in de uitvoer, maar die wel benodigd is

x_1 = waarde bij herhalingstijd T_1 , die wel vermeld staat in de uitvoer
 x_2 = waarde bij herhalingstijd T_2 , die wel vermeld staat in de uitvoer
 T, T_1, T_2 = herhalingstijd

Vervolgens worden de golfcondities opgezocht in de uitvoertabellen 'Illustratiepunt bekledingen' van de Hydra-software. Dit moet worden opgezocht bij een overschrijdingskans van P_{\max} en P_T . Als de juiste overschrijdingskans niet in de uitvoer vermeld staat, kan er geïnterpoleerd worden met bovenstaande formules.

De golfcondities staan in deze tabellen vermeld bij verschillende waterstanden. Het gaat om de H_{m0} en $T_{m-1,0}$ (of T_p) bij elk van deze waterstanden.

E.3 Stap 3: controle of gras voldoet ten aanzien van het golfklapmechanisme bij hydraulische randvoorwaarden bij P_T

Bereken of het gras in staat is de golfklappen te weerstaan bij een hydraulische belasting met overschrijdingskans P_T . Zoek in de uitvoer van de Hydra-software naar het niveau met de grootste golfhoogte bij een overschrijdingskans P_T , en gebruik de rekenmethode uit bijlage A.1 om vast te stellen of het gras dit aankan. Voor stormgedomineerde locaties, zoals de meeste zeedijken en meerdijken aan de oostzijde van het IJsselmeer, moet het waterstandsverloop gehanteerd worden uit de VTV2006, die voor bekledingen is overgenomen in het WBI-2017. Voor meerpeilgedomineerde locaties, zoals op vele locaties langs de westzijde van het Markermeer en IJsselmeer, moet veiligheidshalve de duur van de meerpeilverhoging als belastingduur worden gehanteerd (720 uur).

Als het gras deze belasting kan weerstaan, dan kan gras op het gehele talud worden toegepast. Bedenk dat onderaan het talud, waar frequente golfbelasting optreedt, het desondanks nodig kan zijn om toch een harde bekleding toe te passen.

Als het gras deze belasting niet kan weerstaan, moet verder gegaan worden met stap 4.

E.4 Stap 4: berekening minimale hoogte van overgang van harde bekledingen naar gras

Bereken met de hydraulische randvoorwaarden met overschrijdingskans van P_{\max} het niveau vanaf waar het gras toegepast kan worden ten aanzien van het golfploopmechanisme. Dit kan berekend worden met de rekenmethode uit bijlage A.2 of de 'Basismodule Gras Buitentalud' van WBI2017.

Dit niveau is $z_{\text{oploop}, P_{\max}}$ en wordt weergegeven ten opzichte van NAP. Voor deze berekeningen is ook de golfploophoogte ($z_{2\%}$) nodig, die berekend wordt met bijvoorbeeld PC-Overslag. Voor de belastingduur geldt hetzelfde als in de vorige stap.

Tenslotte volgt de minimaal benodigde hoogte van de overgang uit de volgende formule:

$$z_{\text{overgang}} = \max(h_{PT}; z_{\text{oploop}, P_{\max}}) + z_{2\%} / 10 \quad (5.2)$$

Met:

z_{overgang} = niveau vanaf waar gras kan worden toegepast op het buitentalud (m+NAP)
 P_{\max} = maximaal toelaatbare faalkans op trajectniveau (/jaar)
 P_T = maximaal toelaatbare faalkans van graserosie in de beschouwde doorsnede (/jaar)
 h_{PT} = waterstand met overschrijdingskans van P_T (m+NAP)

- $Z_{\text{oploop}, P_{\text{max}}}$ = niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de formules voor het golfploopmechanisme bij golfcondities met overschrijdingskans P_{max} (m+NAP).
- $Z_{2\%}$ = golfploop ten opzichte van de waterlijn die door 2% van golven wordt overschreden bij golfcondities met overschrijdingskans P_{max} (m)

Als het golfploopmechanisme maatgevend is, terwijl dat niet het geval is bij een ongeveer 20% lagere golfhoogte, zal een probabilistische berekening mogelijk een beduidend lagere waarde van het benodigde niveau van de overgang geven. Het loont dan mogelijk de moeite om een probabilistische berekening uit te voeren.

E.5 Stap 5: Controle voor belastingen bij lagere waterstanden dan die bij P_{max}

Als de grootste golfhoogte en golfperiode niet bij een waterstand met overschrijdingskans P_{max} optreden, maar bij lagere waterstanden, dan kunnen die maatgevend zijn. Zoek in de uitvoer van de Hydra-software naar het niveau met de grootste golfhoogte en periode bij een overschrijdingskans P_{max} . Als dit gelijk is aan de waterstand die in stap 4 is gehanteerd voor de berekeningen, dan is het resultaat uit stap 4 het eindresultaat.

Zo niet, dan moeten de golfhoogte en periode bij een overschrijdingskans P_{max} voor elk niveau op het talud worden opgezocht in de uitvoer van de Hydra-software. Vervolgens moet Z_{oploop} (niveau waar het gras in staat is het golfploopmechanisme te weerstaan) berekend worden voor elk van deze combinaties van waterstand en golfcondities. De hoogste is maatgevend en moet worden gebruikt in de volgende formule:

$$z_{\text{overgang}} = \max(h_{PT}; z_{\text{oploop}, \text{max}}) + z_{2\%} / 10 \quad (5.3)$$

Met:

- $Z_{\text{oploop}, \text{max}}$ = niveau vanaf waar het gras voldoet volgens de formules voor het golfploopmechanisme bij de combinatie van waterstand en golfcondities waar deze waarde het grootste is (m+NAP).

Opgemerkt moet worden dat in oktober 2016 de beoordelingsmethode van gras in de oploopzone is aangepast. Sindsdien moet de golfploop bij overschrijdingskans van de belasting P_T beschouwd worden (met aangepast veiligheidsfactoren). Deze wijziging is in dit rapport nog niet doorgevoerd.

F Probabilistische berekeningen op basis van de statistiek van het HBN

Zoals beschreven in paragraaf 6.1.3 is het baseren van de probabilistische analyse op marginale statistiek van waterstand en bijbehorende illustratiepunten een beperkte doorsnede uit de mogelijke realisatie van combinaties van meerpeil en windsnelheid: er worden combinaties op basis van hoge waterstand geselecteerd waarbij bijdrage van golfbelasting onderbelicht is. Dat is terecht als het gaat om het golfklapmechanisme, maar niet als het gaat om het golfloopmechanisme aan de oostzijde van het IJsselmeer of Markermeer.

Het is dan beter om te kijken naar de illustratiepunten van de benodigde kruinhoogte (HBN): hierin wordt ook het belang van golfcondities meegewogen. Dit betekent dat de hierboven beschreven procedure aangepast dient te worden zodat het HBN als stochast in het probabilistische model wordt getrokken en dat op basis van de illustratiepunten behorende bij het getrokken HBN de tijdsverlopen van waterstand en golfcondities worden afgeleid.

Het aangepaste recept voor trekkingen op basis van statistiek van HBN ziet er dan als volgt uit:

Vorbereiding

- Bepaal per windrichting het meerpeil en windsnelheid in illustratiepunt bij HBN's met herhalings tijden 500, 1000, 5000, 10000 en 20000
- Bepaal de kansbijdrage per windrichting
- Construeer tabel C met meerpeil als functie van windrichting en HBN
- Construeer tabel D met windsnelheid als functie van windrichting en HBN

Per trekking

- Trek HBN en windrichting
- Bepaal op basis van interpolatie in tabel C het meerpeil
- Bepaal op basis van interpolatie in tabel D de windsnelheid
- Bepaal de piekwaterstand op basis van interpolatie in de database fysica met windrichting, windsnelheid en meerpeil
- Bepaal op basis van bijdrage meerpeil of tijdreeks wind of meerpeil gedreven is
- Bepaal waterstand als functie van tijd (meerpeil of wind gedomineerd)
- Interpoleer voor getrokken windrichting en gevonden windsnelheid de golfcondities als functie van tijd

Helaas is het niet gelukt om deze methode goed werkend te krijgen. Om onverklaarbare redenen klopte de statistiek van waterstanden en golfcondities niet met de gewenste statistiek. Daarom is als terugvaloptie gebruik gemaakt van de marginale statistiek van waterstanden en de marginale statistiek van golfhoogtes, zoals beschreven in paragraaf 6.1.4.

G Voorbeeldberekening

Als voorbeeld wordt de minimaal benodigde hoogte van de overgang van de harde bekleding naar gras berekend voor de dijk langs de Beatrixpolder, aan de westkant van het IJsselmeer. De taludhelling van deze dijk is 1:4 en er is geen berm. Dit is een fictieve case.

Stap 1: Overschrijdingskansen

Allereerst wordt de norm opgezocht in de Waterwet en de lengte-effectfactor in het OI-2014, zodat daarmee ook P_T kan worden berekend:

- maximaal toelaatbare faalkans voor het traject bij de Beatrixpolder: $P_{Max} = 1/1000$ per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor de bekledingen: $P_B = 0,1 \cdot P_{Max} = 1/10.000$ per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor gras voor het traject: $P_G = 0,5 \cdot P_B = 1/20.000$ per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor het traject: $P_{GE} = 0,9 \cdot P_G = 1/22.000$ per jaar.
- Lengte-effectfactor uit het OI-2014v3 is 2
- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor een specifieke locatie op de dijk (dijkdoorsnede): $P_T = P_{GE}/2 = 1/44.000$ per jaar.

Stap 2: hydraulische belastingen

De hydraulische belasting bij een overschrijdingskans P_{max} en P_T is volgens de Hydra-software op deze locatie als volgt (de waarden bij grasbekledingen):

Ontwerp- peil	NAP+0 m		NAP+0,25 m		NAP+0,5 m		NAP+0,75 m		NAP+0,82 m	
	H_{m0}	T_p	H_{m0}	T_p	H_{m0}	T_p	H_{m0}	T_p	H_{m0}	T_p
(m+NAP)	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)
0,818	1,26	4,27	1,04	6,07	1,02	5,08	0,79	3,39	0,79	3,39

Tabel G.1 Ontwerpcndities met overschrijdingsfrequentie P_{max} (1/1000 per jaar)

Ontwerp- peil	NAP+0 m		NAP+0,5 m		NAP+0,75m		NAP+1,0 m		NAP+1,25m		NAP+1,31m	
	H_{m0}	T_p	H_{m0}	T_p	H_{m0}	H_{m0}	H_{m0}	T_p	H_{m0}	T_p	H_{m0}	T_p
m+NAP	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(m)	(m)	(s)	(m)	(s)	(m)	(s)
1,307	1,29	4,27	1,41	5,22	1,22	6,63	1,06	4,09	1,00	3,53	1,00	3,53

Tabel G.2 Ontwerpcndities met overschrijdingsfrequentie P_T (1/44000 per jaar)

De golfcondities op ontwerppeil zijn niet berekend met de Hydra-software, maar zijn aangenomen gelijk te zijn aan de golfcondities bij de dichtstbijzijnde waterstand die wel doorgerekend kon worden.

In de genoemde waarden zijn de onzekerheden en de invloed van klimaatverandering verdisconteerd.

Stap 3: controle of gras voldoet ten aanzien van het golfklapmechanisme

In de derde stap wordt gekeken of de golfcondities bij een overschrijdingskans P_T zodanig mild zijn dat het gras die kan weerstaan. Daarvoor moet de grootste golfhoogte gehanteerd worden met overschrijdingskans 1/44.000 per jaar. In Tabel G.2 is te zien dat dit optreedt bij een niveau NAP+0,5 m, namelijk $H_{m0} = 1,41$ m.

Gerekend wordt met een stormduur van 40 uur die samenvalt met de top van het waterstandsverloop (met constante waterstand, omdat het meerpeil gedomineerd is en het waterstandsverloop zich dus uitstrekt over 30 dagen).

De berekeningen met de rekenmethode uit bijlage A.1 of met de 'Basismodule Gras Buitentalud' van WBI2017 laten zien dat het gras deze belasting niet aankan. Er moet dus verdergegaan worden met stap 4.

Stap 4: berekening van het minimaal benodigde niveau van de overgang

In deze stap wordt eerst met de hydraulische belastingen met overschrijdingskansen van P_{\max} het niveau berekend vanaf waar het gras toegepast kan worden ten aanzien van het golfoplooptmechisme. Dit kan berekend worden met de rekenmethode uit bijlage A.2 of de 'Basismodule Gras Buitentalud' van WBI2017. Dit niveau is $Z_{\text{oploop},P_{\max}}$ en wordt weergegeven ten opzichte van NAP.

In de formules wordt gebruikgemaakt van de hydraulische belastingen uit Tabel G.1, die ook ingevoerd kunnen worden in de 'Basismodule Gras Buitentalud' van WBI2017. In deze stap wordt gerekend met een topwaterstand gelijk aan het ontwerppeil: NAP+0,818 m. Er wordt gerekend met een stormduur van 40 uur die samenvalt met de top van het waterstandsverloop (meerpeil gedomineerd).

De software is alleen in staat om te bepalen of het gras op een gekozen niveau in staat is de belasting te weerstaan. Dit niveau moet iteratief zodanig gekozen worden dat het gras hier nog net de belasting kan weerstaan (en op een iets lager gekozen niveau niet). Uit de berekeningen blijkt dat in dit geval voor elk niveau het gras voldoende sterk is. We kiezen dan de heersende waterstand als niveau: $Z_{\text{oploop},P_{\max}} = \text{NAP}+0,818$ m.

Tenslotte volgt de minimaal benodigde hoogte van de overgang uit de volgende formule:

$$z_{\text{overgang}} = \max(h_{PT}; Z_{\text{oploop},P_{\max}}) + z_{2\%} / 10 \quad (7.1)$$

Met:

$$h_{PT} = \text{NAP}+1,307 \text{ m}$$

$$Z_{\text{oploop},P_{\max}} = \text{NAP}+0,818 \text{ m}$$

Voor deze berekeningen is ook de golfoploophoogte ($z_{2\%}$) nodig, die berekend wordt met bijvoorbeeld PC-Overslag. We gebruiken daarvoor de golfcondities op de top van de storm. Dit levert $z_{2\%} = 1,6$ m.

Het resultaat van deze stap wordt hiermee:

$$z_{\text{overgang}} = \max(1,307; 0,818) + 1,6 / 10 = 1,47 \text{ m} \quad (7.2)$$

Stap 5: controle voor belastingen bij lagere waterstanden

In dit geval is in Tabel G.1 te zien dat de golfhogtes met overschrijdingskansen P_{\max} bij het ontwerppeil (NAP+0,82 m) niet het hoogste zijn. Bij lagere waterstanden is de golfbelasting groter. Daarom moet stap 4 overgedaan worden bij de andere waterstanden om te zien welke waterstand maatgevend is.

De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in Tabel G.3. Hieruit blijkt dat voor golfoploop de maatgevende waterstand 0,20 m+NAP is en de bijbehorende maatgevende waarde voor $Z_{\text{oploop},P_{\max}} = 2,65$ m+NAP.

Die waarde moet nu gebruikt worden in formule (7.1), samen met de golfoploophoogte $z_{2\%}$ bij de golfcondities horende bij een waterstand van 0,20 m+NAP:

$$z_{\text{overgang}} = \max(1,307; 2,65) + 2,9/10 = 2,94 \text{ m} \quad (7.3)$$

Dit is nu het eindresultaat: de overgang naar gras moet tenminste op NAP+2,94 m hoogte gelegd worden.

waterstand	Z_{oploop,Pmax}
0,00 m+NAP	0,00 m+NAP
0,15 m+NAP	2,45 m+NAP
0,20 m+NAP	2,65 m+NAP
0,25 m+NAP	2,55 m+NAP
0,50 m+NAP	2,35 m+NAP
0,75 m+NAP	0,75 m+NAP
0,82 m+NAP	0,82 m+NAP

Tabel G.3 Niveau waar gras in staat is het golfoploopmechanisme te weerstaan bij golfcondities met overschrijdingskans P_{\max} als functie van de waterstand