

## FACTSHEET

Aan : Kennisplatform Risicobenadering  
Van : Alfons Smale (KPR)  
Review : Deon Slagter/Robert Vos/Marcel Bottema (KPR)  
Kopie aan :  
Datum : 27 februari 2018  
Versie : 1  
Onderwerp : Golfcondities bij ontwerpen en toetsen (GEKB en GEBU)

Kennisplatform  
Risicobenadering  
Zuidersluis 1  
3439 LA Nieuwegein  
Postbus 2232  
3500 GE Utrecht  
[kpr@rws.nl](mailto:kpr@rws.nl)

### 1. Aanleiding

Met de vrijgave van WBI2017 en OI2014 kunnen beheerders met behulp van het WBI2017 instrumentarium de veiligheidsopgave vaststellen/herzien. Het instrumentarium (specifiek het belastingen deel) is opgesteld om een realistische schatting van de Hydraulische Randvoorwaarden te geven. Waar kennis onvolledig is of niet uniform over het land toepasbaar is, is soms uit noodzaak gekozen voor een licht conservatieve aanpak. Dit leidt ertoe dat lokaal sprake kan zijn van een overschatting van de Hydraulische Randvoorwaarden. Deze factsheet geeft een overzicht van mogelijke bronnen van conservatisme in golfcondities en een werkwijze waarop deze aangescherpt kunnen worden in de beoordeling en het ontwerp.

De volgende mogelijke bronnen van conservatisme worden in dit memo besproken<sup>1</sup>:

Aspect	Watersysteem	Potentiele impact (orde)	Complexiteit
Niet-verdisconteren golfreductie tussen uitvoerpunt en dijkteen	Overall	- HBN: tot 0.2 meter - Bekledingen: tot 0.2 meter $H_{mo}$	Kan met bestaand instrumentarium (Riskeer/Hydra-NL)
Strijklengte (bovenrivieren)	Bovenrivieren	- HBN: tot 0-0.3 meter - Bekledingen: tot 0-0.2 meter $H_{mo}$	Kan met bestaand instrumentarium (Hydra-NL)
Voorland/bodemligging (bovenrivieren)	Bovenrivieren	- HBN: tot 0.5 meter - Bekledingen: tot 0.2 meter $H_{mo}$	Kan met bestaand instrumentarium (Riskeer/Hydra-NL)
Probabilistisch kritiek overslagdebiet (overall)	Overall	- HBN: tot 0.5 meter	Kan met bestaand instrumentarium (Riskeer) voor zichtjaar 2015
Wijze van verdisconteren onzekerheden golfcondities	Overall	Zeer locatie afhankelijk	Correctie achteraf op basis van vuistregel
Kansverdeling golfhoogte (ondiepe "voorlanden")	Overall	- HBN: nog onbekend - Bekledingen: tot 2 meter hoogte overgang hard-gras	Specialistisch advies
Effect stroming	Bovenrivieren	- HBN: tot 0.3 meter - Bekledingen: tot 0.3 meter $H_{mo}$	Specialistisch advies
Effect vegetatie	Overall	- HBN: tot 0.3 meter - Bekledingen: tot 0.3 meter $H_{mo}$	Specialistisch advies

<sup>1</sup> Let op: potentiële effecten van individuele aspecten mogen niet bij elkaar opgeteld worden omdat er een interactie tussen aspecten is. Verder geldt dat effecten erg locatie/situatie specifiek zijn.

Een deel van deze punten is reeds besproken in de factsheet golfcondities (IenM, 2017) of de Werkwijzer voor afleiden van HOR voor OI2014 (Deltares, 2018).

De lezer wordt erop geattendeerd dat deze factsheet is opgesteld met een pragmatische insteek. De hier gepresenteerde werkwijzen om te komen tot aangescherpte Hydraulische (Ontwerp) Randvoorwaarden moeten dan ook gezien worden als ontwerpoptimalisaties en/of een aanzet tot een 'Toets op maat'.

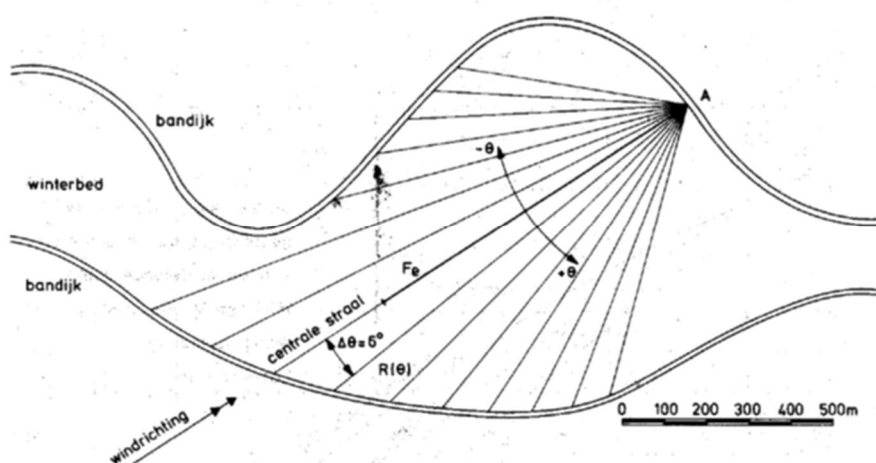
## 2. Niet-verdisconteren golfreductie tussen uitvoerpunt en dijkteen

Het kan gebeuren dat er nog sprake is van significante golfreductie tussen het WBI-uitvoerpunt en de dijkteen, zeker wanneer het uitvoerpunt meer dan enkele tientallen meters voor de dijkteen ligt. Bijvoorbeeld door de golfreducerende werking van een havendam, die dan wel standzeker moet zijn onder de beschouwde belasting condities. Of doordat de bodem significant oploopt tussen het uitvoerpunt en de dijkteen. Of, en zo ja hoe, het voorland meegenomen kan worden bij de bepaling van hydraulische condities staat beschreven in de bij WBI2017 behorende schematiseringshandleiding "Hydraulische condities bij de dijkteen" (IenM 2016).

*Advies: Ga conform de WBI217 schematiseringshandleiding "Hydraulische condities bij de dijkteen" na of en zo ja hoe de het voorland meegenomen kan worden.*

## 3. Strijklengte gehanteerd voor golfcondities bepaald met Bretschneider

De golfcondities voor de "smalle wateren" worden afgeleid met behulp van de Bretschneider-formule. Smalle wateren zijn de Bovenrivieren (Rijntakken en Maas), de bovenstroomse delen van de overgangsgebieden (Benedenrivieren, IJsseldelta en Vechtdelta), Veluwerandmeer, Grevelingen, Volkerak-Zoommeer, en Hollandsche IJssel. Voor de bepaling van golfcondities met behulp van Bretschneider zijn een effectieve strijklengte en een gemiddelde bodemligging benodigd. Deze zijn bepaald aan de hand van een Baseline schematisatie. Voor WBI2017 is dit "foto van het rivierbak" van 2014, voor OI2014 is dit een "foto van de rivierbak" van 2012 (hier zit dus geen toekomstige bodemdaling in). De strijklengtes zijn per windrichting bepaald middels een middeling van de afstand van de uitvoerlocatie tot de in de schematisatie gehanteerde banddijk. De gemiddelde bodemligging is bepaald op basis van een gewogen gemiddelde van winter- en zomerbedhoogte.

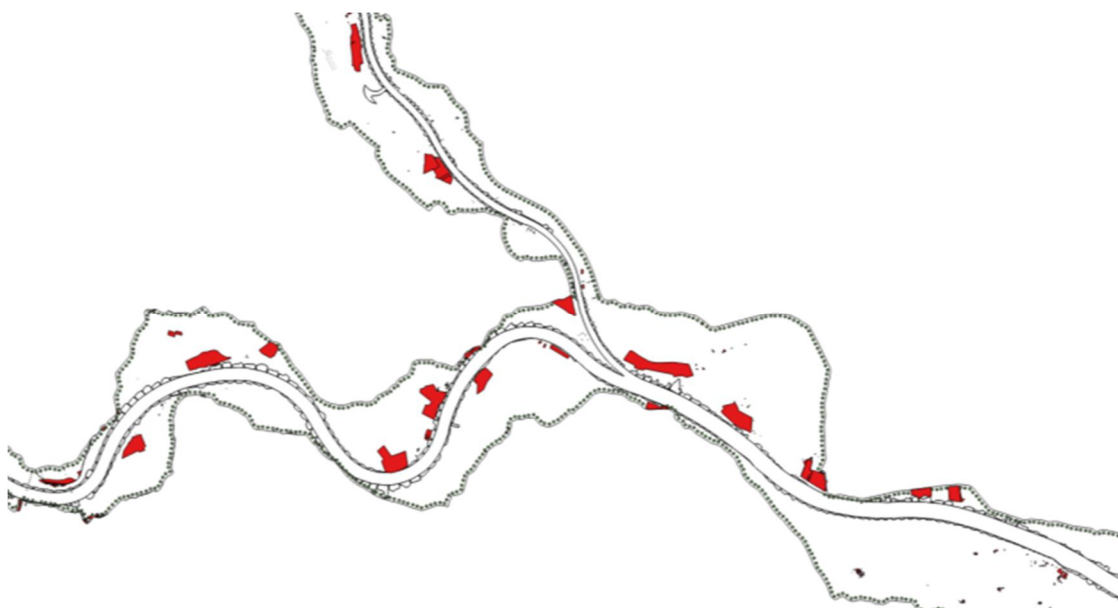


Figuur 1 Definitie van raaien gehanteerd voor strijklengte en bodemligging voor Bretschneider

Zoals beschreven in IenM (2017), houdt de bepaling van de strijklengtes en bodemliggingen geen rekening met aanwezige hoogwatervrije gebieden. Dit zijn gebieden waarvoor geldt dat een vergunning is afgegeven die het mogelijk maakt een "oneindig" hoog element op deze locatie te realiseren. Er zijn in het rivierengebied slechts in beperkte mate van dergelijke vergunningen aanwezig. Het niet meenemen van deze vergunningen (het gaat om vergunde ingrepen, niet om wat er werkelijk aanwezig is) in de strijklengtebepaling wordt als conservatief maar niet over-conservatief beschouwd. Een voorbeeld wordt gegeven in Figuur 2, waarin de zwarte punten de uitvoerlocaties zijn en de rode vlakken de hoogwatervrij vergunde gebieden. De hoogwatervrije terreinen zijn niet meegenomen in de strijklengtebepaling, maar wel meegenomen in de bepaling van de gemiddelde bodemligging vanwege de wijze waarop deze informatie opgeslagen is. Merk op dat de bodemligging van de hoogwatervrijegebieden meestal de actuele hoogte betreft en niet "oneindig" hoog.

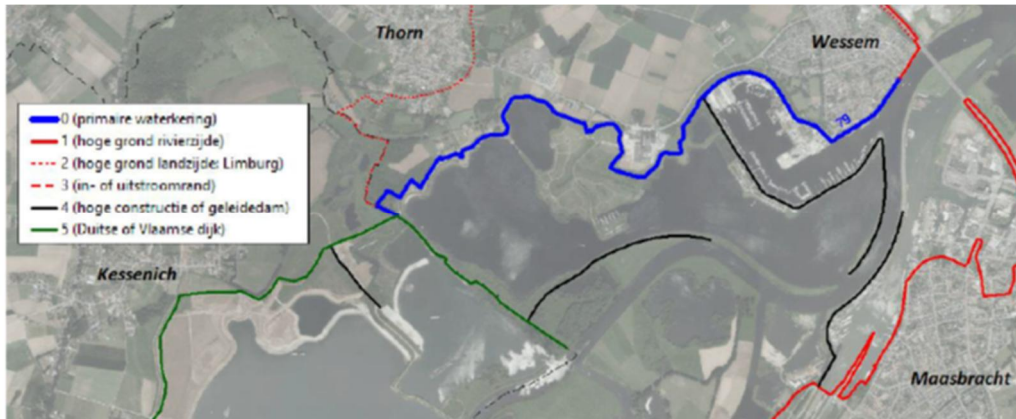
Te zien is dat er diverse hoogwatervrije gebieden zijn, maar dat in veel gevallen de strijklengte slechts voor een beperkt aantal windsectoren korter zou moeten worden genomen. Voor de overige windrichtingen blijft de strijklengte ongewijzigd, waardoor het effect (na uitvoeren probabilistische berekening) beperkt zal zijn. Dit komt doordat er een weging van verschillende windrichtingen plaats vindt, wat ertoe leidt dat een afname van strijklengte (en dus golfcondities) in 1 windrichting "gedeeltelijk gecompenseerd" wordt door de andere windrichtingen.

Alleen in die gevallen waar het hoogwatervrije gebied meerdere sectoren significant beïnvloedt kan een significant effect verwacht worden. Dit is bijvoorbeeld het geval als het hoogwatervrije gebied gelegen is direct voor de uitvoerlocatie: in die gevallen kan het hoogwatervrije gebied meegenomen worden als voorland via de voorlandmodule.



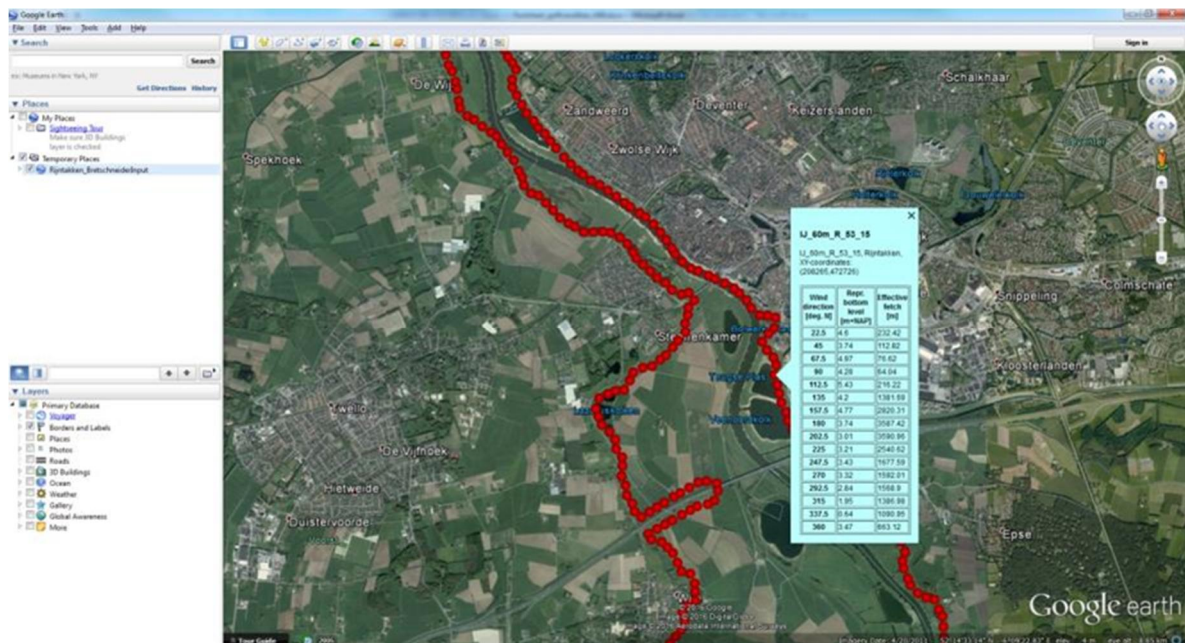
Figuur 2 Voorbeeld van hoogwatervrij vergunde elementen(rood) in het rivierengebied (Pannerdense Kop)

Specifiek langs de Maasvallei geldt dat de strijklengtes zijn bepaald onder aanname dat de Maaskaden overstroomd zijn en dat strekdammen de golfgroei niet reduceren (zie bijvoorbeeld Figuur 3). Dit betekent in een aantal gevallen dat de strijklengte wordt overschat als de waterstand in het ontwerppunt van de berekening voor Hydraulisch Belasting Niveau (HBN) lager of gelijk is aan de hoogte van de dam. De grootste relatieve overschatting vindt over het algemeen plaats in raaien dwars op de rivier (dan is de totale strijklengte het kortst en de relatieve overschatting het grootst). Veelal zijn dat echter niet de maatgevende strijklengtes: die worden gevormd door richtingen de meer parallel (bv 45 gaden) aan de rivier lopen. Voor deze strekkingen is de relatieve overschatting dan juist weer veel kleiner.



Figuur 3 Voorbeeld in de Limburgse Maas met strekdammen (zwart), welke niet in de bepaling van de golfcondities zijn meegenomen.

De afgeleide strijklengtes en bodemliggingen per windrichtingssector per uitvoerlocatie zijn opgenomen in een Google-Earth file, welke beschreven is in Deltares (2015). Figuur 4 toont een snapshot van deze file, welke beschikbaar is op de WBI site van de Helpdesk Water.



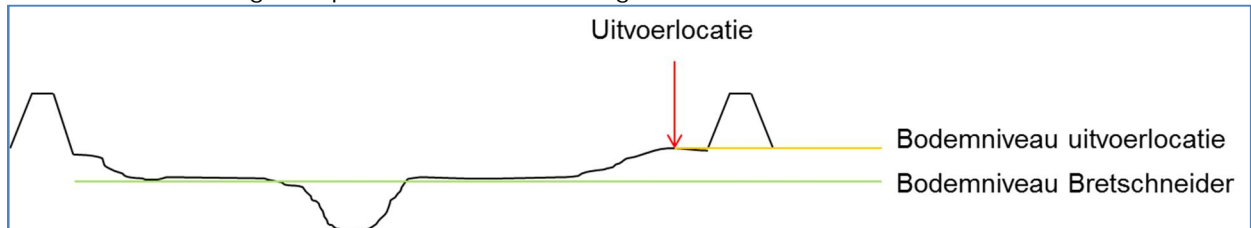
Figuur 4 Snapshot van de Google-Earth-file met gehanteerde strijklengtes en bodemliggingen per windrichting

Voor de bepaling van het Hydraulisch Belasting Niveau (HBN) geldt dat de bijbehorende waterstanden over het algemeen hoog zijn en dat de aanname van strijklengte van banddijk tot banddijk vaak correct is. Voor de belasting voor bekledingen geldt echter dat dit ook over situaties met lagere waterstanden gaat. In die gevallen hoeft de aanname van een strijklengte van banddijk naar banddijk niet correct te zijn (denk aan de aanwezigheid van zomerkaden) en dat leidt mogelijk tot conservatieve golfbelastingen. Dit conservatisme kan worden weggenomen door bij de bepaling van de golfcondities voor een specifiek niveau op het talud rekening te houden met de strijklengte welke hoort bij de waterstand overeenkomstig het te beschouwen niveau op het talud.

*Advies: controleer de strijklengtes gehanteerd voor de bepaling van de golfcondities en pas deze desgewenst aan. Voer de aanpassing door met inachtneming van de waterstand behorende bij het beschouwde mechanisme (HBN of bekledingen). Indien strijklengtes worden aangepast dient geverifieerd te worden om de gehanteerde bodemligging representatief is voor de aangepaste strijklengte.*

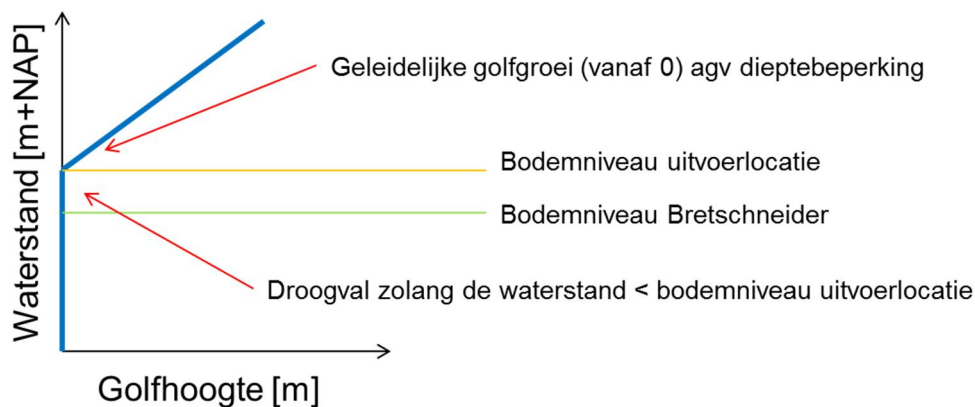
4. Voorland/bodemligging gehanteerd voor golfcondities bepaald met Bretschneider Indien gebruik wordt gemaakt van een database fysica waarvan de golfcondities met de Bretschneider-formule zijn bepaald, dan kan het zijn dat de berekende golfcondities conservatief zijn. Dit conservatisme is het gevolg van het beperkt meenemen van droogval en dieptegelimiteerde golfcondities in gevallen waarbij er een groot verschil is tussen het bodemniveau van de uitvoerlocatie en het bodemniveau voor de Bretschneider berekening. Dit kan als volgt worden verklaard (overgenomen uit Deltares (2018)):

Veronderstel het volgende profiel in de windrichting:



Figuur 5 Voorbeeld doornede over winterbed

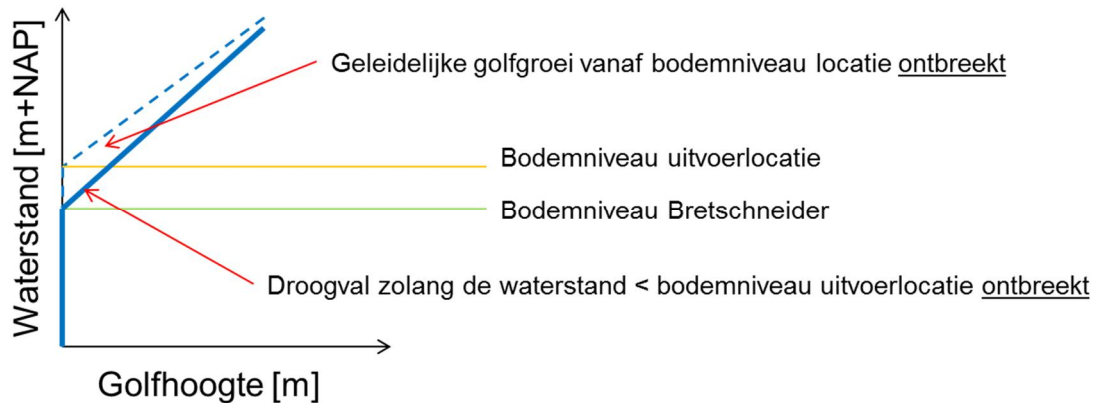
Op basis van het verloop van het bodemniveau ter plaatse van de uitvoerlocatie kunnen we, gegeven een windsnelheid, de golfhoogte als functie van de waterstand weergeven (zoals je in werkelijkheid/volgens de fysica zou verwachten):



Figuur 6 Verloop golfhoogte als functie van waterstand zoals je in werkelijkheid zou verwachten

Als we nu de golfhoogte als functie van waterstand plotten, maar nu met golfhoogte gebaseerd op de (in dit voorbeeld grotere) Bretschneider diepte, dan krijgen we onderstaande figuur (gestippeld is "werkelijk"/Figuur 6, doorgetrokken de golfhoogte volgens Bretschneider). Bij voldoende hoge waterstand is het verschil "nul" omdat de invloed van de bodem dan verwaarloosbaar klein wordt. Dit is wat er gebeurt bij herberekenen van strijklengtes binnen Hydra-NL: dan worden strijklengtes en bodemligging opnieuw bepaald op basis van (eigen) GIS-informatie en worden golfcondities bepaald zonder droogval in acht te nemen.

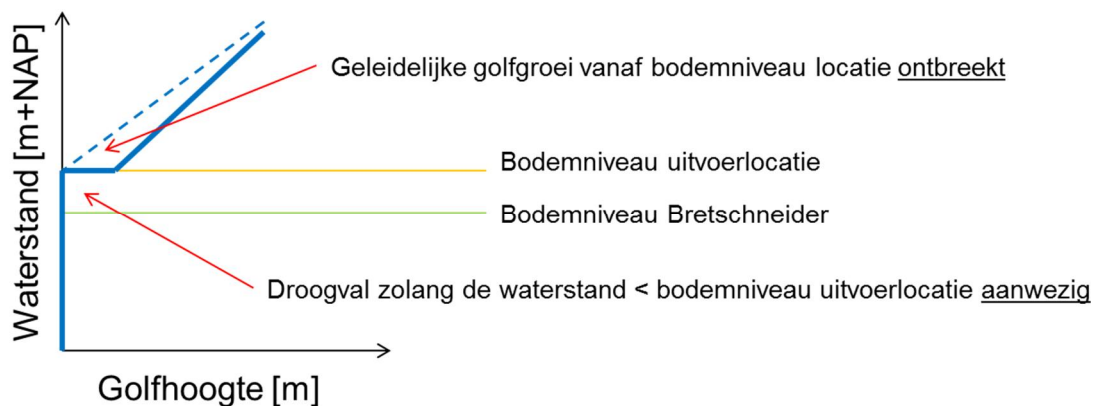




Figuur 7 Verloop golfhoogte als functie van waterstand op basis van Bretschneider diepte

Verder is van belang dat in de Bretschneider-schematisatie de gemiddelde bodemdpte van banddijk tot banddijk wordt genomen (zie Figuur 2). Daardoor wordt de vrijwel volledige golfdemping op net-niet-drooggevallen delen van uiterwaarden ook niet meegenomen. Er is ook een onveilige keerzijde van die bodemmiddeling: het WBI kan met Bretschneider tot te lage golfhoogtes komen wanneer bijvoorbeeld sprake is van een schaarndijk met een relatief diepe geul vlak voor de dijk. Wanneer zo'n diepe geul breed genoeg is, dan kunnen de werkelijke gaven hoger uitvallen dan Bretschneider 'toelaat' op basis van de van banddijk tot banddijk gemiddelde bodemdpte.

Als we nu ook het effect van de lokale bodemligging meenemen middels een droogvalprocedure, maar wel nog met Bretschneider bodemligging voor bepaling golven, dan krijgen we onderstaand. Dit is hoe de WBI2017-databases voor de Bovenrivieren tot stand zijn gekomen. Als gevolg van de toepassing van droogval is bij de range aan waterstanden tussen bodemniveau Bretschneider en bodemniveau uitvoerlocatie de golfhoogte gelijk aan nul: dit is minder conservatief dan het verloop gepresenteerd in Figuur 7.



Figuur 8 Verloop golfhoogte als functie van waterstand op basis van Bretschneider diepte en droogval

Het is in Hydra-NL mogelijk om de WBI golfcondities te negeren en op basis van (eigen) GIS-informatie opnieuw Bretschneider berekeningen uit te voeren, maar zonder droogval in acht te nemen. Op basis van de bovenstaande beschouwing kan gesteld worden dat het terug rekenen van strijklengtes binnen Hydra-NL tot de meest conservatieve golfcondities leidt. Het hanteren van de WBI databases leidt tot minder conservatieve golfcondities, maar nog steeds conservatief ten opzichte van de werkelijkheid.

De mate van conservatisme als gevolg van deze problematiek hangt af van het verschil in bodemniveau locatie en Bretschneider:

- Bodemniveau locatie < Bretschneider: niet conservatief (potentieel onveilig)
- Bodemniveau locatie  $\approx$  Bretschneider: niet conservatief (neutraal)
- Bodemniveau locatie > Bretschneider & dieptegelimiteerde golven in relevante herhalingstijden: conservatief

Het is wenselijk om zo dicht mogelijk bij de werkelijkheid (Figuur 6) te komen. Daarvoor is het nodig om: (i) het effect van nat/droog tov bodemniveau locatie mee te nemen en (ii) het effect van de beperkte waterdiepte mee te nemen. Dit is mogelijk door gebruik van de voorlandmodule binnen Hydra-NL (deze wordt geactiveerd zodra een voorland gespecificeerd is in het dijkprofiel).

*Advies:*

- 1) *Indien overgestapt wordt van golfcondities in de database naar strijklengtes en bodemligging: voorlandmodule gebruiken*
- 2) *Indien WBI-database gebruikt: (i) controleer bodemniveau gehanteerd in Bretschneider berekening voor maatgevende windrichting en (ii) bodemniveau locatie >> bodemniveau Bretschneider: voorlandmodule gebruiken*
- 3) *No regret: altijd voorlandmodule gebruiken (uitgezonderd locaties bij een schaaldijk, zie onderstaand)*

Houd er in gebieden waar Bretschneider wordt gebruikt rekening mee dat WBI hier mogelijk aan de onveilige/optimistische kant is als de bodemligging vlak voor de dijk dieper is dan de strijklengte gemiddelde bodemligging (bijvoorbeeld bij schaaldijken) en dat een Toets/Ontwerp op Maat dan gewenst kan zijn. Check daarom eerst of je kan goedkeuren met ongewijzigde strijklengte, en waarbij je de gemiddelde bodemligging van banddijk tot banddijk gelijk stelt aan de (grotere) waterdiepte vlak voor de schaaldijk. Check ook of je zou afkeuren wanneer je een Bretschneidersom doet met zojuist genoemde grotere waterdiepte, en een gereduceerde strijklengte die alleen het diepe deel bestrijkt. Wanneer voornoemde testen niet tot evidente goedkeuring of afkeuring leiden, dan wordt diepgravender maatwerk geadviseerd; KPR kan hierbij advies geven.

## 5. Probabilistisch kritiek overslagdebiet

Het Ontwerpinstrumentarium 2014 (OI2014) schijft voor de bepaling van de benodigde kruinhoogte een semi-probabilistische aanpak voor. Dit betekent dat gerekend wordt met een probabilistisch belastingmodel, maar dat de sterkte middels een rekenwaarde wordt vertegenwoordigd: het kritieke overslagdebiet. Deze rekenwaarde voor het kritieke overslagdebiet is, afhankelijk van de kwaliteit van de grasmat 1, 5 of 10 l/s/m.

De rekenwaarde voor het kritieke overslagdebiet volgt uit een kalibratiestudie. Op basis van een groot aantal volledig probabilistische berekeningen (dus ook een kansverdeling voor het kritieke overslagdebiet) is de rekenwaarde van het kritieke overslagdebiet die in een semi-probabilistische berekening een vergelijkbare kruinhoogte oplevert als een probabilistische berekening. De rekenwaarde van het kritieke overslagdebiet is vanwege de brede toepasbaarheid voor veel gevallen conservatief.

In het WBI2017 wordt gebruik gemaakt van een volledig probabilistische berekening om de hoogte te toetsen (GEKB). Dit betekent dat, gegeven de werkwijze gehanteerd voor bepaling van de rekenwaarde voor het kritieke overslagdebiet, de volledig probabilistische som tot een lagere kruinhoogte zal leiden. Door bij de bepaling van de toets- of ontwerpogave ook uit te gaan van een probabilistische som kan de opgave naar verwachting in 90% van de gevallen in meerdere of mindere mate verkleind worden.

*Veiligheidsopgave*

De veiligheidsopgave kan eenvoudig met een probabilistische beschrijving van het kritieke overslagdebiet bepaald worden door gebruik te maken van Riskeer. Hierbij wordt opgemerkt dat de te hanteren kansverdelingen voor het kritieke overslagdebiet beschreven staan in de WBI2017 schematiseringshandleiding voor gras (sectie 6.7.4). Deze kansverdelingen zijn een functie van (i) graskwaliteit en (ii) golfhoogte in het ontwerppunt van de GEKB berekening. Dit vraagt om een iteratieve aanpak: eerste een som met een kansverdeling met lage golfhoogte, daarna controleren of golfhoogte in ontwerppunt past bij gehanteerde kansverdeling en eventueel een extra som met kansverdeling behorende bij gevonden golfhoogte uitvoeren.

Deze aanpak wordt volledig gefaciliteerd voor gras op klei, maar niet voor gras op zand. Voor gras op zand bestaan op dit moment geen generieke kansverdelingen van het kritieke overslagdebiet. Wel is er kennis omtrent deze kansverdelingen: mogelijk kan via expert judgement iets gezegd worden over dergelijke kansverdelingen of anders dienen experimenten uitgevoerd te worden.

*Ontwerpopgave*

Ook voor de bepaling van de ontwerpopgave zal het hanteren van een probabilistische aanpak voor GEKB een verlagend effect hebben op de benodigde kruinhoogte voor 90% van de gevallen. Voor de ontwerpopgave geldt echter ook dat rekening moet worden gehouden met klimaatverandering, waardoor gebruik van Riskeer niet mogelijk is (Riskeer bevat alleen statistiek van het zichtjaar 2015-2023).

*Hoe?*

Voor een beperkt aantal gebieden (bijvoorbeeld Veluwerandmeren) kan gewoon Riskeer gebruikt worden met de databases die vanuit WBI2017 worden aangeboden. Voor gebieden met klimaatverandering of waar in de toekomst de fysica veranderd is het gebruik van Riskeer op dit moment nog niet mogelijk. Wel kan een beeld van het effect van het probabilistisch rekenen voor GEKB in beeld worden gebracht door voor zichtjaar 2015-2023 de resultaten van een GEKB som in Riskeer te vergelijken met een HBN som in Hydra-NL.

KPR kan adviseren en helpen bij het doen van aanpassingen bij het rekenen met Riskeer ten behoeve van het ontwerp van dijkversterkingen.

*Advies: Stel het verschil vast tussen semi-probabilistisch en volledig probabilistisch kritiek overslagdebiet voor zichtjaar 2015-2023. Verdisconteer (een deel van) dit verschil eventueel in het dijkontwerp. Indien gerekend wordt met een probabilistische aanpak voor hoogte, dan dient geverifieerd te worden of er als gevolg van het hogere overslagdebiet geen problemen ontstaan met macro-stabiliteit of komberging.*

## 6. Verdiscontering onzekerheden golfcondities

In WBI2017 worden voor het eerst statistische en modelonzekerheden als stochasten in de belastingen meegenomen. Het meenemen van deze extra stochasten kan in sommige gevallen tot onverwachte resultaten leiden. In de praktijk zijn op dit moment twee soorten van onverwachte resultaten bekend: (i) grote bijdrage van modelonzekerheid aan de belasting (dus hoge modelfactor in illustratiepunt) en (ii) grote golfsteilheden op basis van de golfcondities in het illustratiepunt.

*Grote bijdrage modelonzekerheid*

Een grote bijdrage van de modelonzekerheid is vaak het gevolg van een flauwe overschrijdingscurve van de belasting in geval onzekerheden niet meegenomen kunnen worden. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de dieptelimitering van de golfhoogte: een toename van de wind leidt dan soms niet tot een toename van de golfhoogte. De enige manier om dan een grotere belasting te krijgen is door een ongunstiger modelonzekerheid te hebben. Deze modelonzekerheid is (over het algemeen) afgeleid door een vergelijking te maken tussen model en meting en een kansverdeling te fitten op deze modelfout. Zolang de gevonden waarde voor



de modelfout binnen de geobserveerde modelfouten valt is er geen reden om aan te nemen dat dit onterecht is.

Uitzondering hierop zijn fysisch onrealistische condities, waaronder grote verhoudingen  $Hm0/d$ . Wanneer bij het WBI-uitvoerpunt sprake is van én een vrijwel vlakke bodem, én een golfhoogte-waterdiepte-verhouding ( $Hm0/d$ ) groter dan 0,8 [-], dan is er een redelijk vermoeden dat de golfcondities te conservatief zijn ten opzichte van wat fysisch is te verwachten.

#### *Grote golfsteilheden*

Een tweede situatie die zich voor kan doen is het vinden van een combinatie van golfhoogte en golfperiode (met inbegrip van onzekerheden) welke relatief steil is. Dit is veelal het gevolg van het niet gecorreleerd zijn van de stochastische modelonzekerheid golfhoogte en modelonzekerheid golfperiode. Hierdoor wordt vaak een grote modelonzekerheid golfhoogte gevonden in het illustratiepunt met een kleine modelonzekerheid golfperiode. Dit leidt, deels onterecht, tot een grote golfsteilheid. Golfsteilheden van meer dan 0.1 [-] in combinatie met een vrijwel vlakke bodem doen vermoeden dat de gevonden golfcondities niet overeenkomen met wat fysisch verwacht mag worden.

Voor beide situaties (grote bijdrage modelonzekerheid en grote golfsteilheid) geldt dat er maatwerk mogelijk is om hier duiding aan te geven en desgewenst een correctie toe te passen.

*Advies: indien sprake is van onrealistische golfhoogte/waterdiepte verhoudingen of onrealistische golfsteilheden, dan kan KPR helpen met duiding en handelingsperspectief (er zijn oplossingen, maar het gaat te ver om deze oplossingen hier toe te lichten)*

## 7. Kansverdeling golfhoogte

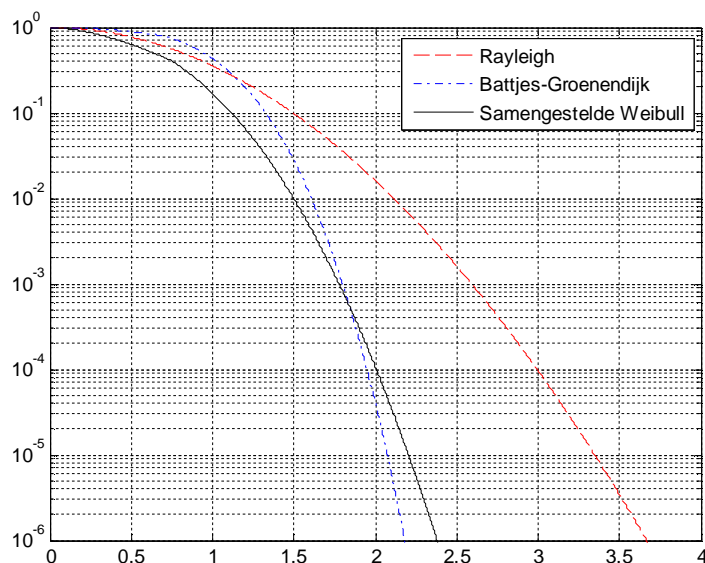
In de BM Gras is de cumulatieve overbelastingbenadering geïmplementeerd voor de beschrijving van de sterkte van de grasmat. Hierbij wordt gekeken naar het cumulatieve effect van alle individuele golfoplopen binnen een stormgebeurtenis. Op elk niveau van de bekleding kan de cumulatieve overbelasting worden berekend. Hoe hoger de grasbekleding ligt, des te kleiner de kans is dat een individuele golf oploopt tot het niveau van de grasbekleding en de cumulatieve overbelasting te groot wordt. De kansverdeling van de individuele golfhoogtes binnen een stormgebeurtenis (of: de tijdreeks van golven) is zodoende van invloed op het niveau waarop een grasbekleding kan volstaan vanuit het oogpunt van golfoploop.

In de BM Gras is standaard aangenomen dat de individuele golfhoogtes Rayleigh verdeeld zijn. Dit betekent dat er een relatief grote kans is op golfhoogtes die bijvoorbeeld 1,5-2 keer groter zijn dan de significante golfhoogte. De Rayleigh-verdeling geeft een realistische beschrijving van de individuele golfhoogtes wanneer sprake is van diepwatercondities, wanneer de golven niet of nauwelijks worden beïnvloedt door de bodem.

In geval van toetsen van keringen gaat de veronderstelling van diep water echter niet altijd op (vermoedelijk vaker niet dan wel). De kansen op relatief grote golven zijn in ondiep water aanzienlijk kleiner dan volgens een Rayleigh-verdeling. Voor de condities in ondiep water kan bijvoorbeeld worden uitgegaan van de kansverdeling van Battjes-Groenendijk. Dit is een samengestelde Weibull-verdeling die bestaat uit een Weibull-verdeling met exponent gelijk aan 2 (ofwel: een Rayleigh verdeling) voor de lagere golfhoogtes en een Weibull-verdeling met een exponent groter dan 2 voor de grotere golfhoogtes (Battjes and Groenendijk, 2000). Figuur 9 toont het verschil tussen een Rayleigh en Battjes-Groenendijk verdeling voor een locatie in het IJsselmeer. De afbeelding toont eveneens een gefitte verdeling op basis van metingen ter plaatse. De afbeelding laat duidelijk zien dat voor dit geval het toepassen van een Rayleigh verdeling tot een significante overschatting van de individuele golfhoogtes leidt voor deze specifieke combinatie van waterdiepte en golfcondities.

Uit een korte analyse voor het project Markermeerdijken is gebleken dat cumulatieve belasting voor de grasbekleding in de olopzone lineair schaal met de afname van de kans op

overschrijden van de kritieke individuele golfhoogte. Dit betekent dat de belasting van gras in de oploopzone fors kan afnemen. Dit effect is sterk afhankelijk van de combinatie van waterdiepte en golfcondities: op "diep" water is het effect klein, op "ondiep" water is het effect groot.



Figuur 9 Een voorbeeld van een gefitte, samengestelde Weibull-verdeling ten opzichte van Rayleigh en Battjes-Groenendijkverdelingen. Op de horizontale as staat de individuele golfhoogte in meter, op de verticale as staat de overschrijdingskans.

Opgemerkt wordt dat de keuze voor de Battjes-Groenendijk golfhoogteverdeling nog niet vast ligt: er zijn indicaties dat voor sommige gevallen (sterk niet-lineair golven) de Battjes-Groenendijkverdeling een onderschatting geeft van de kansverdeling.

Verder geldt eveneens dat niet alleen de BM gras module uitgaat van een Rayleigh kansverdeling voor individuele golfhoogte, maar dat dit ook in de aannames voor Gras Erosie Kruin en Binnentalud is opgenomen. Ook hier kan mogelijk winst behaald worden door het effect van een andere kansverdeling in beeld te brengen.

*Advies: KPR kan projecten faciliteren met het in beeld brengen van het potentiële effect van een andere kansverdeling voor de individuele golfhoogte op de veiligheids- en/of ontwerp-opgave.*

## 8. Effect stroming op golfcondities

In het kader van een onderzoek uitgevoerd door Deltares is duidelijk geworden dat voor de Bovenrivieren het meenemen van stroming bij de bepaling van de golfcondities meestal tot een verlaging van de golfcondities leidt. Dit is het gevolg van het feit dat wind in dezelfde richting als de stroming tot minder golfgroei leidt (lagere effectieve windsnelheid) en in omgekeerde richting eveneens tot lagere golfcondities leidt als gevolg eerder breken op steilheid in combinatie met wave blocking.

Het effect van stroming is het grootst in gevallen waar de dominante wind/golfrichting over langere strekkingen de invloed van stroming ondervindt. Dit is typisch het geval bij dijkstrekkingen welke gelegen zijn bij bochten in rivieren. In die gevallen kan het effect van de stroming op de golven oplopen tot 0.3-0.4 meter (bij golfcondities van 0.5 tot 0.8 meter), zie Deltares (2016). Vanwege het feit dat de kruinhoogte probabilistisch bepaald wordt, wordt dit effect uitgemiddeld met andere richtingen, waardoor er 0.2 tot 0.3 meter verlaging van de kruinhoogte overblijft.

Het in rekening brengen van stroming op de golfcondities in het Bovenrivierengebied (en de overgangsgebieden) is specialistisch werk en vraagt relatief veel inspanning. De berekening van de golfcondities dient uitgevoerd te worden met bijvoorbeeld SWAN, gevoed met WAQUA stromingsvelden. Het aantal berekeningen kan aanzienlijk zijn omdat voor een probabilistische berekening meerdere combinaties van afvoer en windsnelheid/windrichting doorgerekend moeten worden. Verder vraagt het opzetten van het SWAN model om speciale aandacht vanwege de grote variaties in de ruimte van bodem en stroomsnelheden. KPR kan desgewenst meedenken over de benodigde activiteiten voor het in rekening brengen van stroming.

*Advies: In situaties waar golfbelasting groot is en leidt tot hoge benodigde kruinhoogte of aanbrengen harde bekleding kan overwogen worden om stroming als aanscherping van de HOR mee te nemen. KPR kan meedenken over relevantie van stroming voor specifiek locaties.*

## 9. Effect vegetatie op golfcondities

Bij de afleiding van golfcondities wordt, in tegenstelling tot waterstandsberekeningen, over het algemeen uitgegaan van een "kale" bodem. Aanwezige vegetatie wordt niet meegenomen bij de golfberekeningen en ontwerpen met vegetatie is niet zonder meer mogelijk met bestaande toets- en ontwerpinstrumenten. Uit een studie uitgevoerd in opdracht van Waterschap Rivierenland (Deltares, 2016) is gebleken dat het ontwerpen met vegetatie, onder een aantal specifiek voorwaarden, kan leiden tot een verlaging van de benodigde kruinhoogte en/of sterkte van de bekleding op het buitentalud.

Het bereiken van een significante reductie in de golfcondities is mogelijk als er een voldoende brede strook met voldoende "dichte" vegetatie aangelegd wordt of aanwezig is. Een strook van 60 meter breedte begroeid met wilgen (Griend) leidt tot een potentiële reductie van de kruinhoogte van orde 0.3-0.7 meter op plaatsen waar golfaanval significant is (lange strijklengtes, leidend tot golfhoogtes tot 0.8 meter).

Het eerste orde effect van het in rekening brengen van een strook vegetatie kan voor de Bovenrivieren afgeschat worden door het toepassen van onderstaande rekenrecept (uitgangspunt is geen correlatie tussen wind en waterstand). Merk op dat dit gebaseerd is op een geometrie van de uiterwaarden aan de noordzijde van de Waal tussen Tiel en Waardenburg en dat het opstuwende effect van vegetatie niet is meegenomen (aannee dat vegetatie in bergend deel van de rivier staat).

Rekenrecept voor Bovenrivieren uit Deltares (2016):

- 1 Zoek conform OI2014 het illustratiepunt op voor HBN. Dit zijn de waterstand en golfcondities zoals beschreven in de Hydra-uitvoer onder "hoofdillustratiepunt" bij gezochte herhalingstijd (bijvoorbeeld 41.667 jaar)
- 2 Zoek in onderstaande Tabel 1 de relatieve reductie van de golfhoogte op, gegeven de keuze voor vegetatietype en strookbreedte. Indien men wil rekenen met een strookbreedte tussen de 20 en 60 meter, dan mag de golfhoogtereductie worden bepaald middels lineaire interpolatie van de gevonden reductie bij 20 en 60 meter.
- 3 Pas de reductie toe op de golfhoogte behorende bij het hoofdillustratiepunt: dit is de golfhoogte te hanteren bij het vaststellen van de benodigde kruinhoogte (golfperiode en golfrichting kunnen ongewijzigd worden overgenomen van het hoofdillustratiepunt)
- 4 Bepaal het verschil tussen de waterstand gevonden in het hoofdillustratiepunt voor HBN en de waterstand welke een herhalingstijd overeenkomstig de herhalingstijd van het HBN heeft (bijvoorbeeld MHW bij 41.667 jaar).
- 5 Vermenigvuldig het gevonden verschil in waterstand met de relatieve golfhoogtereductie en tel deze op bij de waterstand gevonden in het hoofdillustratiepunt: dit is de waterstand te hanteren bij het vaststellen van de benodigde kruinhoogte.

	Golfaanval < 0.5 meter				Golfaanval > 0.5 meter			
	Gemiddeld effect [%]		Maximum effect [%]		Gemiddeld effect [%]		Maximum effect [%]	
	B=20	B=60	B=20	B=60	B=20	B=60	B=20	B=60
Vegetatietype	B=20	B=60	B=20	B=60	B=20	B=60	B=20	B=60
Zachthout oobos	0%	0%	-13%	-13%	-1%	-2%	-2%	-6%
Hardhout oobos	0%	0%	-13%	-13%	0%	0%	-5%	-2%
Struweel	-1%	-1%	-13%	-16%	-7%	-13%	-13%	-28%
Ruigte	0%	-1%	-13%	-13%	-2%	-4%	-5%	-11%
Griend (geknot)	-1%	-1%	-13%	-16%	-9%	-17%	-18%	-31%
Fictieve vegetatie (vf=0,7)	-1%	-2%	-15%	-20%	-13%	-21%	-25%	-37%

Tabel 1 Indicatie mogelijk reductie golfhogte als gevolg van vegetatie in het riviereengebied (in dit geval in de uiterwaarden langs de Waal benedenstrooms van Tiel), overgenomen uit Deltares (2016)

Ook bij kwelders en kwelderachtige voorlanden zou vegetatie voor golfreductie kunnen zorgen. Er is echter nog weinig tot niets bekend over de standzekerheid van de vegetatie bij maatgevende condities. Wel is duidelijk dat golfaanval tijdens reguliere winterstormen een groot deel van de bovengrondse stengels afbreekt of wegslaat, en dat na zulke stormen niet veel meer dan een veld met korte stoppels overblijft. Verdisconteren van kweldervegetatie blijft vooralsnog een lastige zaak die het nodige maatwerkonderzoek vraagt gezien de vele kennisleemtes. Die kennisleemtes liggen onder andere op standzekerheid bij maatgevende condities, de te hanteren bodemwrijving, het gedrag van de golfperiode, en de te hanteren modelonzekerheden.

*Advies: In situaties waar de golfbelasting groot is en leidt tot een hoge benodigde kruinhoogte of aanbrengen harde bekleding kan overwogen worden om vegetatie als innovatieve maatregel mee te nemen. Bovenstaande rekenregel geeft een eerste orde indicatie van de potentiële toegevoegde waarde van vegetatie. Los hiervan dient een oordeel geveld te worden over de standzekerheid van betreffende vegetatie (is de vegetatie aanwezig als we die nodig hebben?)*

## 10. Referenties

Deltares (2015). Input database for the Bretschneider wave calculations for narrow river areas. Deltares rapport 1209433-000-HYE-0013. A. Camarena Calderon, A. Smale en J. van Nieuwkoop. December 2015.

Deltares (2016). Vegetatie als maatregel voor reductie benodigde kruinhoogte voor het traject Tiel Waardenburg. Deltares rapport 1220539-001-ZWS-0004, Versie 2. A.J. Smale en M.J.A. Borsboom. 22 november 2016, definitief

Deltares (2017). Hoogte van overgang van harde dijkbekleding naar gras. Semi-probablistische ontwerpmethode. Deltares rapport 11200575-012-GEO-0006, Versie 2. M. Klein Breteler D. Kaste en A. Smale. 11 december 2017, definitief.

Deltares (2018). Werkwijzer bepaling hydraulische ontwerpvoorwaarden. Aanvulling OI2014, versie 5. Deltares rapport 11200575-009-GEO-0006, Versie 5, 7 februari 2018, definitief.

IenM (2016). Schematiseringshandleiding hydraulische condities bij de dijkteen WBI 2017. 1 december 2016.

IenM (2107). Factsheet (aanpassen) golfcondities in WBI2017. 29 november 2017.

*Het kennisplatform risicobenadering is opgericht ter ondersteuning van de keringbeheerder bij toepassen van de nieuwe normering en de risicobenadering. Adviezen en ondersteuning van het kennisplatform risicobenadering hebben een informele status en staan gelijk aan collegiaal advies.*