

Effectiviteit Voorlanden HR Samenvattende rapportage

Samenvatting resultaten, handreiking en aanbevelingen



Opdrachtgever: POV-W
Projectmanager: Jan Hateboer
Opsteller(s): Henk Steetzel (Arcadis), Jacco Groeneweg (Deltares) en Vincent Vuik (HKV)
Projectnummer: OW.11503/L / C03011.000544
Dossiernummer: WFN.1714325
Versie: 1.0
Datum: maandag 10 februari 2020
Status: Definitief

Afbeelding op de voorzijde betreft Google Earth opname van de dijk met het voorland ter plaatse van het HWBP-versterkingstraject Koehool-Lauwersmeer, met de positie van de dijk en de bij de teen en op de rand van het voorland aanwezige WBI-uitvoerlocaties.

Inhoudsopgave

1	Inleiding en achtergronden	5
1.1	Kader en fasering	5
1.2	Achtergrond voorlandstudie	5
1.3	Doelstelling voorlandstudie	6
2	Belangrijkste resultaten onderzoek Effectiviteit Voorlanden HR	6
2.1	Belang vegetatie	7
2.2	Bruikbare beschrijving lokale stormkarakteristieken	7
2.3	Gevoeligheidsanalyses gedetailleerd SWAN-model	8
2.4	SWAN levert overschatting gemeten golfhoogte en incorrecte weergave periode	8
2.5	Effect op gemiddelde periode nader beschouwd	8
2.6	Effect op belasting dijk qua kruinhoogte en bekleding	8
2.7	Implicaties voor het versterkingsproject Koehool- Lauwersmeer	9
3	Handreiking voor de toepassing van voorlanden	10
3.1	Inleiding	10
3.2	Stabiliteit van de toplaag	10
3.2.1	Algemeen	10
3.2.2	Literatuur	10
3.2.3	Waarnemingen in de Waddenzee	11
3.2.4	Berekening bodemschuifspanningen	12
3.2.5	Conclusie	13
3.3	Richtlijn instelling ruwheid	13
3.3.1	Algemeen	13
3.3.2	Richtlijnen voor bodemruwheid	13
3.3.3	Gevoeligheidsanalyse bodemruwheid	14
3.3.4	Conclusies en aanbevelingen	15
3.4	Effect zomerkades	15
3.4.1	Introductie	15
3.4.2	Effect van zomerkades volgens HKV (2018)	16
3.4.3	Effect van zomerkades volgens Van der Reijden (2019)	17
3.4.4	Reflectie op beide studies	18
3.5	Inzet voorlanden	19
3.5.1	Introductie	19
3.5.2	Situatie 1: Bepalen veiligheidsopgave in een WBI-beoordeling	20
3.5.3	Situatie 2: Bepalen versterkingsopgave voor een HWBP-project	22
3.5.4	Situatie 3: Aanleg van voorlanden als oplossingsrichting	23
4	Aanbevelingen en relaties met andere studies	25
4.1	Inleiding	25
4.2	Openstaande onderzoeksvragen	25
4.2.1	Introductie	25
4.2.2	Ontbrekende fysica in SWAN	25
4.2.3	Voorstel voor meetcampagne	26
4.2.4	Golfoverslag	26
4.2.5	Bodemruwheid vegetatie	27
4.2.6	Standzekerheid kwelders	27
4.2.7	Faseverschillen wind-opzet-getij-golven	28
4.2.8	Windmodellering	28
4.2.9	Getijslag	28
4.2.10	Modelkoppeling aanpak	28
4.3	Modelonzekerheid periode	28

4.4	Advies richting BOI-ontwikkelingstraject.....	29
4.5	Relatie met andere studies.....	30
4.5.1	Inleiding	30
4.5.2	Model technisch gerelateerde studies	30
4.5.3	Beleids technisch gerelateerde studies.....	30
	Bronnen	31

1 Inleiding en achtergronden

1.1 Kader en fasering

Het onderzoek 'Effectiviteit Voorlanden HR' is onderdeel van de Projectoverstijgende Verkenning Waddenzeedijken (POV Waddenzeedijken, 2015). Dit onderzoek moet inzicht geven in het effect van een voorland op de maatgevende belasting op de achterliggende waterkering, dit met het oog op de toepassing ervan voor het toetsen (beoordelen) en ontwerpen van waterkeringen. Wanneer voorlanden volledig kunnen worden meegenomen bij de beoordeling van een waterkering levert dit potentieel een kostenbesparing op ten opzichte van een situatie op waarbij dit niet (voldoende) gebeurt.

Het onderzoek 'Effectiviteit Voorlanden HR' is, vergelijkbaar met de andere POV-onderzoeken, opgedeeld in vier fasen:

- Fase A: Startfase;
- Fase B: Literatuuronderzoek en data inventarisatie/Inventariserend onderzoek;
- Fase C: Casestudie/Nader onderzoek;
- Fase E: Evaluatie/Afsluitende rapportage.

Fase D (monitoring) is in dit onderzoek niet van belang.

Fase B, het inventariserende onderzoek, is in het voorjaar van 2017 afgesloten met een eindrapportage (Arcadis, Deltares, HKV, 2017a). Het in het kader van Fase C uitgevoerde verdiepend onderzoek heeft in het voorjaar van 2018 geresulteerd in een omvangrijke eindrapportage van deze studiefase (Arcadis, Deltares, HKV, 2018).

Voorliggende rapportage geeft een samenvatting van de belangrijkste resultaten en beschrijft de resultaten van de laatste afrondende fase van dit onderzoek, waarin een praktische vertaling is gegeven naar de toepassing voor de versterkingsprojecten in het algemeen en het project Koehool-Lauwersmeer in het bijzonder. Ook zijn hierin aanbevelingen gedaan richting het zogenaamde Basis Ontwerp Instrumentarium (BOI)-ontwikkelingstraject.

1.2 Achtergrond voorlandstudie

De aanwezigheid van een (voldoende hoog en breed) voorland voor een dijk kan een reducerend effect hebben op de hydraulische belasting op de achterliggende dijk. Door dit gunstige effect expliciet mee te nemen, neemt de belasting op de (gecombineerde) waterkering af, kan de noodzaak om de achterliggende dijk te versterken wegvallen of kan (ten opzichte van de situatie zonder voorland) een minder zware dijkversterking nodig zijn.

Door het uitvoeren van aanvullend onderzoek om dit effect nog beter te kwantificeren kan mogelijk extra bespaard worden op een versterkingsopgave. Hierdoor kunnen de thans beschikbare financiële middelen dus doelmatiger worden ingezet. Ook kan mogelijk een waterkering met voorland worden ontworpen die niet alleen waterkering technische voordelen heeft, maar bovendien een andere (ecologische of maatschappelijke) meerwaarde levert.

Naast de vorm (breedte en niveau) van het voorland speelt ook de aanwezigheid van vegetatie op het voorland een rol. Deze heeft ook een reducerend effect op de resterende golfbelasting, al hangt dit natuurlijk wel af van de standzekerheid van deze vegetatie.

Kennis over de effectiviteit van voorlanden is in deze dus een cruciaal gegeven.

De hydraulische randvoorwaarden bij de teen voor de achterliggende dijk vormen de basis voor de toetsing (tegenwoordig beoordeling) en het Wettelijk Beoordeling Instrumentarium (WBI). Inmiddels is het WTI₂₀₁₁ vervangen door het WBI₂₀₁₇-instrumentarium dat de feitelijke situatie beter beschrijft en waarbinnen de geometrie van het voorland voor een deel al expliciet is

meegenomen. De voor de belasting op de dijk te hanteren hydraulische randvoorwaarden zijn nu (vergelijkbaar met de situatie in 2011) ook beschikbaar op 50 m uit de teen van de dijk. De betrouwbaarheid van deze laatste randvoorwaarde is echter nog een aandachtspunt.

1.3 Doelstelling voorlandstudie

De doelstelling van dit onderzoek naar de effectiviteit van voorlanden was in eerste aanzet vierledig, namelijk:

- Het technisch inzichtelijk krijgen van het effect van een voorlandconfiguratie op de maatgevende belasting op de achterliggende waterkering;
- Het definiëren van een adequate procedure voor het ontwerp van een voorland;
- Het bijdragen aan de definitie van een (verbeterd) toetsingsprotocol;
- Het inzichtelijk maken van de bestuurlijke/beheersmatige consequenties.

De eerste drie onderdelen hebben hierbij een technisch karakter. De laatste doelstelling is meer gekoppeld aan het beheer van de waterkering waarbij momenteel nog het uitgangspunt is dat de waterkering slechts wordt gevormd door de dijk en dat het voorland hier vaak nog geen onderdeel van uitmaakt. Het inzichtelijk maken van deze bestuurlijke/beheersmatige consequenties betreft het beantwoorden van proces-vragen. Wanneer uit het onderzoek blijkt dat meenemen van voorlanden daadwerkelijk winst oplevert bij dijkversterking komen afspraken met (natuur)beheerders in beeld. Dan ontstaan ook vragen als of de legger moet worden aangepast en of het voorland in beheer en onderhoud zal moeten worden genomen en door wie dan. Het vormgeven van het hele proces hier omheen vraagt een ander type onderzoek dan het technisch georiënteerde POV-W-onderzoek 'Effectiviteit voorlanden HR'. Dit deelonderzoek wordt daarom uitgevoerd binnen het nog in uitvoering zijnde POV-W-onderzoek 'Dijk met Voorland'.

De eerste (drie) technische (sub)doelen zijn in de aanloop naar de uitvoering van Fase B geherformuleerd tot de volgende doelstelling:

Doel van het gehele onderzoek 'Effectiviteit voorlanden HR' is het geven van inzicht in het effect van een voorland op de maatgevende belasting op de achterliggende waterkering en de wijze waarop dit effect, met het oog op zowel de toetsing (beoordeling) als het ontwerp van de achterliggende dijk, op een goede manier in rekening kan worden gebracht.

De aandacht richt zich in deze studie primair op deze specifieke doelstelling, namelijk het technisch inzichtelijk krijgen van het effect van een voorlandconfiguratie op de maatgevende belasting op de achterliggende waterkering. De buitenrand van het voorland is in deze studie gedefinieerd als de NAP+1,0 m dieptecontour. Dit is bij benadering het niveau waarboven de kweldervegetatie zich vestigt.

2 Belangrijkste resultaten onderzoek Effectiviteit Voorlanden HR

Het onderzoek Effectiviteit Voorland HR is augustus 2016 gestart. Het onderzoeksteam bestond uit specialisten vanuit Arcadis, Deltares, HKV, Rijkswaterstaat en Wetterskip Fryslân. In het kader van kwaliteitsborging en voor een zo breed mogelijke acceptatie is een klankbordgroep samengesteld bestaande uit medewerkers van Wageningen Universiteit, Rijkswaterstaat WVL, It Fryske Gea en de Project Overstijgende Verkenning Voorlanden (POV-VL).

Fase B had grotendeels het karakter van een inventariserend literatuuronderzoek waarbij een aantal specifieke onderwerpen nader zijn onderzocht. Dit waren: relevantie en fysische werking, kansrijke locaties, beschikbare metingen en instrumentarium en de bijdrage van de vegetatie. Hierbij is onder andere gebruik gemaakt van de resultaten van veldmetingen welke in het kader van het BE SAFE

onderzoek zijn uitgevoerd. Voor details wordt verwezen naar de rapportage "Inventariserend literatuuronderzoek, Fase B" (Arcadis, Deltares, HKV, 2017a).

Voortbordurend op de resultaten van het Inventariserend literatuuronderzoek zijn tijdens Fase C een aantal onderwerpen verder uitgewerkt en verdiept:

- Stabiliteit vegetatie tijdens maatgevende omstandigheden;
- Validatie SWAN-golfrandvoorwaarden op het 50 m punt;
- Invloed van voorlanden (kwelders) op de golfperiode;
- Effect op maatgevende belastingen;
- Toepassing voor HWBP-project.

Voor details wordt verwezen naar de rapportage "Verdiepend onderzoek, Fase C (Arcadis, Deltares, HKV, 2018).

In het vervolg van dit hoofdstuk is een samenvattend overzicht gegeven van de belangrijkste resultaten van het onderzoek.

2.1 Belang vegetatie

De stabiliteit van vegetatie tijdens stormen kan worden ingeschat op basis van de mechanische karakteristieken van de stengels, en wordt uitgedrukt in de vorm van een kritische orbitaalsnelheid. Als de kritische orbitaalsnelheid van een stengel wordt overschreden door de orbitaalsnelheid onder een golf, breekt de stengel. In deze verkenning is gefocust op de stabiliteit van enkele veel voorkomende en hoog groeiende (>50 cm) plantensoorten: zeeaster, zeekweek, Engels slijkgras en schorrenkruid. De stabiliteit van het dunne en zeer flexibele zeekweek is het hoogst van deze vier plantensoorten. Orbitaalsnelheden waarbij deze vegetatie zal breken liggen gemiddeld in de orde van 0,8-1,4 m/s.

De tijdens ontwerpcondities voor de dijk optredende orbitaalsnelheden (1/4.000 per jaar, oude normering) zijn langs de Waddenzeedijken van Friesland en Groningen maximaal ongeveer 1,0-1,3 m/s, dit gebaseerd op de gemiddelde hoogte van de 10 % hoogste golven in het golfveld tijdens de piek van de storm. Dit houdt in dat naar verwachting slechts een deel van de zeekweek, en dus een nog groter deel van de minder flexibele overige genoemde plantensoorten, stand zal houden tijdens ontwerpcondities.

Samenvattend laten de gepresenteerde rekenresultaten, alsmede de resultaten van in Hannover uitgevoerde gootproeven, zien dat staande vegetatie in sterke mate zal breken tijdens maatgevende condities voor de dijk. Het is dus niet verantwoord om de aanwezige ruwheid (behorende bij nog staande vegetatie) voor dergelijke toepassingen te gebruiken.

2.2 Bruikbare beschrijving lokale stormkarakteristieken

Ter voorbereiding op de SWAN-analyses voor het voorland is als eerste een gekoppeld Delft3D-SWAN-model opgezet waarmee waterstanden en golven op de kwelder ter plaatse van de buitenrand van het Uithuizerwad onder verschillende condities kunnen worden berekend. De basis voor dit model is ontleend aan een eerdere studie van Arcadis waarin meerdere stormen in de Waddenzee en het Eems-Dollard estuarium zijn beschouwd. De randvoorwaarden voor dit gekoppelde model zijn bepaald op basis van astronomische componenten uit het grootschalige DC5Mv6-getijmodel, HIRLAM-model uitvoer van het KNMI en beschikbare golfmetingen van Rijkswaterstaat. Deze modellentrein is aangepast en vervolgens ingezet om de stormperiode van zowel januari 2015 als januari 2017 door te rekenen.

De vergelijking tussen modelresultaten en de beschikbare metingen op de BE SAFE-meetlocatie nabij de voorlandrand (~NAP+1 m) bij het Uithuizerwad alsmede ter plaatse van stations uit het LMW stemt tot tevredenheid, iets wat voor zowel de waterstanden als de golven geldt. Een en ander onderschrijft dus de bruikbaarheid van de op de voorlandrand aanwezige condities.

2.3 Gevoeligheidsanalyses gedetailleerd SWAN-model

Deze voorlandrandvoorwaarde vormt daarmee een goede basis voor het uitvoeren van de meer gedetailleerde SWAN-berekeningen voor het kwantificeren van het verloop van de golfcondities over het voorland. Hierbij is de gevoeligheid op de golfcondities voor diverse SWAN-instellingen in beeld gebracht. Uitgangspunt vormt daarbij het WBI2017 model dat de basis vormt voor de fysieke database die wordt gebruikt in de huidige beoordelings- en ontwerptrajecten. Het SWAN-model (versie 40.72ABCDE) dat daar is gebruikt, is gekalibreerd op basis van een breed scala aan condities en locaties. Dat houdt ook in dat deze instellingen voor een meer gedetailleerde toepassing op kwelders de instellingen mogelijk niet optimaal zijn.

2.4 SWAN levert overschatting gemeten golfhoogte en incorrecte weergave periode

Uit vergelijking met het beperkte aantal beschikbare metingen volgt dat SWAN met WBI2017-instellingen tot forse overschattingen van golfhoogte op het voorland leidt. Ook de gemiddelde golfperiodematen worden niet altijd goed benaderd. Na vergelijking tussen de gemeten en berekende spectra blijkt dat de gemeten sterke reductie van de binnen de Waddenzee gegenereerde windgolven (periode van ongeveer 4 s) over het voorland niet door SWAN wordt gerealiseerd. De reductie in het model kan worden vergroot door de lokale bodemwrijving te verhogen of door lokaal de vegetatiemodule te activeren. Dit leidt tot lagere belastingen op de achterliggende dijk, hetgeen per definitie interessant is voor het beoordelings- en ontwerptraject. Daarbij dient wel de kanttekening worden geplaatst dat SWAN niet in staat is de gemeten reductie over de kwelder van lokaal gegenereerde windgolven te reproduceren.

2.5 Effect op gemiddelde periode nader beschouwd

Bij een storm waarbij een min of meer vlak spectrum ontstaat bij de dijk, is het van belang om niet alleen rekening te houden met een algemeen aanvaarde afname van de golfhoogte over het voorland, maar ook met een toename van de gemiddelde golfperiode (en met name de $T_{m-1,0}$). Op ondiepe voorlanden kan relatief veel energie aanwezig zijn in lage frequenties, zoals de via golfinteracties op het voorland zelf ontstane infragravity waves (0,004-0,04 Hz) en via inkomende deining vanaf de Noordzee (0,03-0,10 Hz). Het is met de beschouwde metingen op de kwelders niet mogelijk om de voornaamste oorsprong van deze waargenomen laagfrequente golven goed te onderscheiden. Dit vraagt dus om nader, buiten het kader van de POV-studies uit te voeren onderzoek.

Meer fundamenteel onduidelijk is bovendien wat de invloed van lange golven is op de mate van golfoverslag. Nader onderzoek is hier nodig, ook gericht op de vraag hoe dit verdisconteerd kan worden binnen het vigerende WBI en het BOI-ontwikkelingstraject. Verwerken van energie in deze frequenties in $T_{m-1,0}$ kan leiden tot zeer hoge waarden van $T_{m-1,0}$ met een waarschijnlijk onevenredig sterk effect op de berekende golfoverslag.

2.6 Effect op belasting dijk qua kruinhoogte en bekleding

De verkennende 1D-berekeningen met SWAN laten zien dat de procentuele afname van de significante golfhoogte door een verhoogde bodemruwheid 15-20 % bedraagt, bij waterstanden van ongeveer NAP+3,0 m langs de noordkust van Friesland en Groningen. Voor hogere waterstanden neemt deze reductie af tot 5-10 % bij NAP+5,0 m. Het in rekening brengen van de verhoogde bodemruwheid resulteert ook structureel in een reductie van de gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$, oplopend tot 30 % bij NAP+3 m. Omdat er in metingen bij deze waterstand juist een duidelijke toename van $T_{m-1,0}$ wordt waargenomen, past hier echter grote voorzichtigheid.

In het onderzoeksrapport voor Fase B (Arcadis, Deltares, HKV, 2017a) volgt reeds dat het effect van de bodemhoogte van de kwelders leidt tot een reductie van het HBN (benodigde kruinhoogte) van gemiddeld 0,3 m. Het aanvullend in rekening brengen van de verhoogde bodemruwheid leidt tot een totale reductie van het HBN tussen 30 en 60 cm waarmee het effect van de verhoogde ruwheid

alleen dus leidt tot een 10 tot 30 cm lager kruinniveau. Deze berekening laat zien dat de golfperiode afneemt over het voorland, wat in tegenspraak is met het resultaat van de metingen. Omdat het niet verantwoord lijkt om de berekende reductie van gemiddelde golfperiode in rekening te brengen is bij wijze van scenario voor de berekeningen de golfperiode $T_{m-1,0}$ ter plaatse van de buitenrand van het voorland gecombineerd met de door het ruwe voorland gereduceerde golfhoogte. Omdat gemiddelde golfperiode op de voorlandrand groter is en daardoor leidt tot meer golfoverslag, resteert dan netto slechts een effect van 10-30 cm. Op drie locaties is het effect van de hogere golfperiode echter dominant, en neemt het HBN bij een voorland zelfs toe met 10-20 cm.

Voor de beoordeling van een asfaltbekleding is de gemiddelde golfperiode niet van belang en leidt een kwelder dus tot een reductie van ongeveer 0,5 m in de golfhoogte. Daarbovenop komt nog een effect van de ruwheid van de kwelders van ongeveer 0,2 m. Een kwelder heeft dus een zeer gunstig effect op de belasting van de bekleding van de achterliggende dijk.

2.7 Implicaties voor het versterkingsproject Koehool- Lauwersmeer

Op basis van de eerdergenoemde bevindingen wordt aanbevolen om bij een (begroeid) voorland voor de eerste ronde van de toetsing/beoordeling binnen het HWBP-project gebruik te maken van het SWAN-golfmodel zonder dat specifiek rekening gehouden is met de effecten van deze vegetatie.

De op de HR-locaties beschikbare golfhoogten zijn door het niet in rekening brengen van de extra ruwheid, conservatief en vormen daardoor een veilig uitgangspunt voor een beoordeling. Feitelijk betekent dit dus dat voor een praktische toepassing gewoon gebruik kan worden gemaakt van de golfhoogte op de HR-locatie, op typisch 50 m uit de teen van de dijk.

Voor het ontwerp wordt natuurlijk aanbevolen om een Toets-op-Maat aanpak te volgen en daarbij wel rekening te houden met een aangepaste ruwheid.

De in rekening te brengen golfperiode hangt nauw samen met de toepassing.

Voor het mechanisme golfoverslag en dus de bepaling van de benodigde kruinhoogte is de gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$ van belang. Deze waarde wordt op de HR-locatie nabij de dijk echter niet goed voorspeld en leidt tot een onderschatting van de resulterende golfoverslag.

Kruinhoogte en golfoverslag

Voor een gedetailleerde toets waar golfoverslag relevant is wordt aanbevolen om uit te gaan van een combinatie van de (vermoedelijk te grote) golfhoogte en de (vermoedelijk te kleine) gemiddelde golfperiode ter plaatse van de 50 m locatie.

Ten behoeve van een Toets op Maat of ontwerp-toepassing kan het gebruik van een verhoogde ruwheid op het voorland in de SWAN-berekeningen worden overwogen. Deze dient dan echter te worden gecombineerd met het gebruik van de $T_{m-1,0}$ -waarde op de buitenrand van het voorland.

Bekledingen

Voor het beoordelen van bekledingen is de piekperiode T_p van belang. Deze wordt wel redelijk door het SWAN-model berekend. Voor een gedetailleerde toets wordt geadviseerd om uit te gaan van de golfcondities (golfhoogte en golfperiode) zoals deze berekend worden ter plaatse van de 50 m locatie vlak voor de dijk. In dit geval kan voor een Toets op Maat en ontwerp-toepassing ook worden overwogen om ook hier het effect van de extra ruwheid op de golfhoogte in rekening te brengen.

3 Handreiking voor de toepassing van voorlanden

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk komen de volgende vier onderdelen aan de orde:

- Een verkenning van de stabiliteit van de toplaag;
- Een richtlijn voor de bepaling van de ruwheid van een voorland voor het gebruik als modelinvoer;
- Het effect van op het voorland gelegen zomerkades;
- Inzet van voorlanden bij beoordeling en ontwerp.

3.2 Stabiliteit van de toplaag

3.2.1 Algemeen

Aangezien kwelders een aanzienlijk effect hebben op de golfbelasting op de achterliggende dijken, is het van belang dat geverifieerd wordt of de kwelders ook tijdens extreme stormen morfologisch stabiel zullen zijn. In het geval dat de bodem van de kwelders over grote oppervlakten lager komt te liggen door erosie, zou de golfhoogtereductie immers kunnen afnemen. In deze paragraaf wordt beschikbare informatie over de stabiliteit van kwelders verzameld, en uitgelegd waarom verwacht wordt dat de toplaag van kwelders langs de Waddenzeedijken stabiel zal blijven, ook tijdens extreme stormen. Eerst zal een samenvatting worden gegeven van internationale literatuur over de stabiliteit of juist instabiliteit van kwelders en schorren tijdens stormen. Vervolgens zal specifiek worden ingegaan op de situatie langs de Waddenzeedijken, aan de hand van het waargenomen gedrag van de bodem tijdens stormen, en een vergelijking van bodemschuifspanningen tijdens gemeten versus maatgevende condities voor de veiligheid van de waterkeringen.

3.2.2 Literatuur

Volgens de internationale literatuur zijn kwelders en schorren over het algemeen zeer stabiel onder golfwerking. Leonardi et al. (2016) hebben voor acht verschillende schorren in de VS, Italië en Australië onderzocht wat de samenhang is tussen laterale erosie aan de buitenrand en golfenergie. Zij concluderen dat zware stormen en orkanen voor minder dan 1 % bijdragen aan lange-termijn erosiesnelheden. Schorren reageren sterker op variaties in gemiddelde golfenergie dan op extremen. Er blijkt een lineaire relatie te zijn tussen golfkracht en erosie. Er zijn geen indicaties dat er een grenswaarde bestaat, waarboven de erosie snel toeneemt. Gittman et al. (2014) beschrijven dat er geen oppervlakte-erosie van schorren plaatsvond tijdens een categorie 1 orkaan met een maximale windsnelheid van 34 m/s, terwijl deze orkaan wel zorgde voor het instorten van veel keermuren in hetzelfde gebied (zogenaamde bulkheads). Spencer et al. (2016) doen verslag van het effect van de beproeving van kwelderbodem uit de Waddenzee in een grote golfgoet in Hannover, met golven tot 1,0 m bij een waterdiepte van 2,0 m. Een reeks van proeven leidde slechts tot gemiddeld 6 mm verticale erosie van het kwelderoppervlak. Stormen veroorzaken veelal zelfs netto sedimentatie op kwelders (Turner et al., 2006).

Andere studies beschrijven echter wél grootschalige erosie van schorren tijdens orkanen (Morton and Barras, 2011), zoals grote gebieden waarbij de toplaag met wortels werd losgescheurd van de ondergrond, en omgezet in lager gelegen onbegroeide slikken (Cahoon, 2006). Schorren waar dergelijke grootschalige erosie plaatsvond, worden gekenmerkt door een hoog gehalte organische stof. Feitelijk is er dan sprake van veenmoerassen (Cahoon, 2006). Ook Howes et al. (2010) schrijven verschillen in reactie van de bodem op orkanen toe aan de bodemsamenstelling, en de daarmee samenhangende schuifsterkte. Grootschalige erosie treedt alleen op in wetlands in zoet of brak water, met geringe dagelijkse golfwerking en getijamplitude. Zulke wetlands hebben gewoonlijk een hoog gehalte aan organische stof, en staan soms onder invloed van nutriënten vanuit rivieren

(zogenaamde river diversions in de VS), wat leidt tot de ontwikkeling van zwakke wortels en wortelstokken (Kearney et al., 2011). Ook een gebrek aan sedimentaanvoer kan leiden tot een relatief hoog gehalte aan organische stof, en daardoor tot zwakte en stormschade (Peteet et al., 2018).

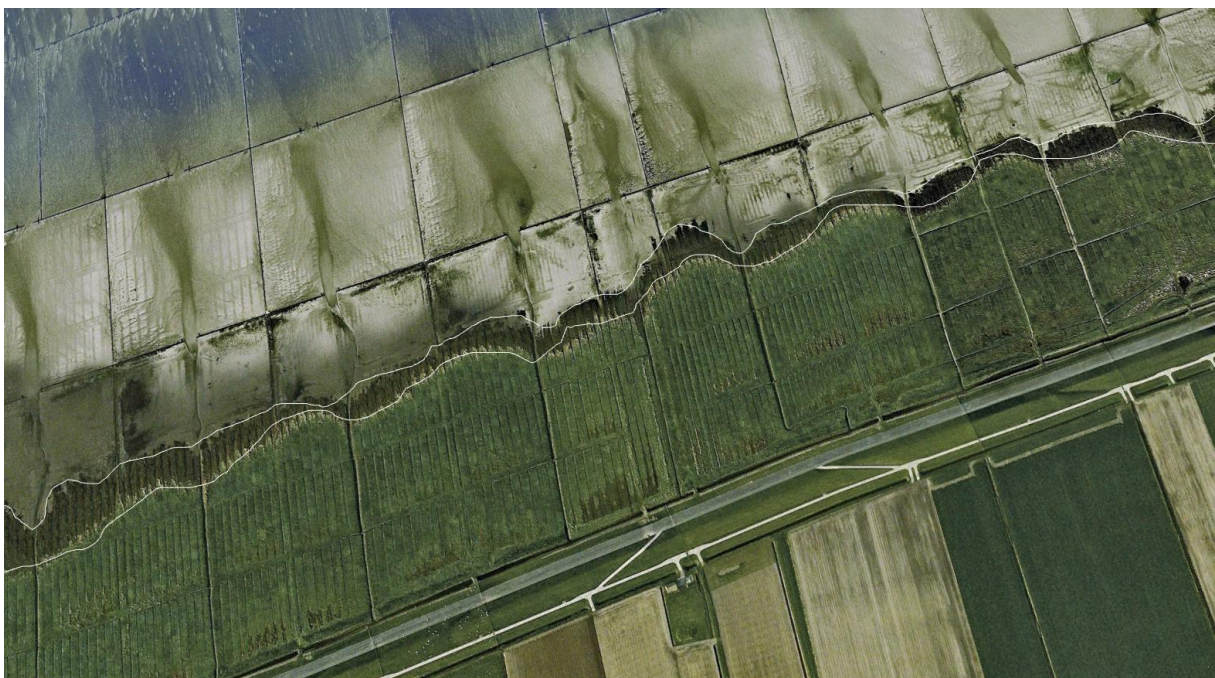
Schorren en kwelders, geworteld in minerale ondergrond (zand, silt en klei) hebben een veel grotere schuifsterkte, en vormen het meest stabiele type wetland tijdens stormen (Morton and Barras, 2011). Leonardi & Fagherazzi (2015) stellen dat lokale variabiliteit in de beschutting van schorren kan leiden tot verschillen in sterkte, en daarmee tot lokale en grootschalige erosie. Schorren die zijn blootgesteld aan relatief hoge golven vertonen constante en voorspelbare erosiesnelheden, en slechts beperkte gevoeligheid voor incidentele zware stormen.

Concluderend: de meest stabiele schorren en kwelders ontstaan op plaatsen met (1) voldoende aanbod aan sediment (zand, silt en slib), en (2) relatief sterke dagelijkse golfwerking. De kwelders in de Waddenzee voldoen aan deze twee kenmerken. Op basis van de internationale literatuur zijn deze kwelders daarom aan te duiden als van het meest stabiele type.

3.2.3 Waarnemingen in de Waddenzee

Waarnemingen in het veld bevestigen de resultaten van deze analyse. Tijdens relatief sterke stormen (november 2006, december 2013, januari 2017) zijn de kwelders volledig stabiel gebleken. Vergelijk de situatie uit 2005 (Figuur 3-1) en 2014 (Figuur 3-2). De Allerheiligenvloed uit 2006 en Sinterklaasstorm uit 2013 hebben de breedte van de kwelders niet significant veranderd.

In januari 2017 is op diverse locaties op het slik en op de kwelders de bodemhoogte voor en na de storm gemeten. Op het onbegroeide slik daalde de bodem tot -3 cm, terwijl op de begroeide kwelders sprake was van sedimentatie tot +1 cm. Deze waarnemingen duiden erop dat de kwelders in de Waddenzee inderdaad tot het stabiele type behoren, vanwege de opbouw van zand en slib, en de regelmatige blootstelling aan golfwerking.



Figuur 3-1 Ligging van de pionierzone van de kwelders in december 2005 (witte lijnen).



Figuur 3-2 Luchtfoto van de kwelders in april 2014, met de contouren van de ligging van de pionierzone in 2005 (witte lijnen).

3.2.4 Berekening bodemschuifspanningen

Om een beeld te krijgen van krachten op de kwelderbodem tijdens opgetreden en maatgevende condities, berekenen we voor beide situaties bodemschuifspanningen. Bodemschuifspanningen zijn afhankelijk van de zogenaamde orbitaalsnelheid, de snelheid waarmee het water onder de golven heen en weer beweegt. In Tabel 3-1 zijn getallen opgenomen met orbitaalsnelheden bij de bodem tijdens gemeten stormen (November 2007, Januari 2019) en extreme condities (terugkeertijd van 1.000 of 10.000 jaar). Bodemschuifspanningen zijn evenredig met het kwadraat van deze orbitaalsnelheid (u_b^2). De verhouding in u_b^2 tussen metingen en extreme condities geeft daarom een indicatie van het verschil in krachten die op de bodem werken.

Bron	WTI-2011 SWAN-berekeningen				RWS meting	Schatting	BE SAFE meting
	kwelders		Uithuizerwad				
Locatie	kwelders		Uithuizerwad			kwelders	
Storm	T=1.000	T=10.000	T=1.000	T=10.000	Nov 2007	Nov 2007	Jan 2019
Waterstand (m t.o.v. NAP)	4,91	5,20	4,97	5,57	3,90	3,80	3,15
Golfhoogte H_{mo} (m)	1,77	2,04	2,00	2,29	1,28	1,23	0,85
Golfperiode $T_{m-1,0}$ (s)	5,00	5,50	5,90	6,30	6,30	6,06	5,00
Diepte kwelders (m)	3,21	3,50	3,27	3,87	2,20	2,10	1,45
Golfengte λ (m)	28,1	32,2	33,4	38,8	29,3	27,5	18,9
Golfgetal k (rad/m)	0,22	0,19	0,19	0,16	0,21	0,23	0,33
u_b (m/s)	1,42	1,58	1,63	1,71	1,30	1,28	1,06
u_b^2 (m ² /s ²)	2,02	2,50	2,65	2,92	1,70	1,64	1,13

Tabel 3-1 Vergelijking van orbitaalsnelheden bij de bodem van de kwelders tijdens extreme (T=1.000, T=10.000 jaar) en gemeten (Nov 2007, Jan 2019) stormen.

Tijdens de storm van januari 2019 zijn binnen het BE SAFE project metingen uitgevoerd op de rand van de kwelders tussen Eemshaven en Noordpolderzijl. Tijdens de zwaardere storm van november 2007 werd er op die locatie nog niet gemeten, maar wel op het wad bij Uithuizerwad, verder richting

Eemshaven. Daarom zijn de golfcondities bij de kwelders tijdens de storm van november 2007 ingeschat, door dezelfde golfhoogte-waterdiepteverhouding toe te passen als in januari 2019. De verhouding tussen golfhoogte en golfperiode is op beide locaties gelijk gekozen. Deze schatting levert bodemschuifspanningen bij de kwelders (bodemhoogte NAP+1,7 m) in november 2007 van 1,28 m/s, tegenover 1,42 m/s bij een terugkeertijd van 1.000 jaar, en 1,58 m/s bij 10.000 jaar. Op basis van die getallen is te berekenen dat de bodemschuifspanningen tijdens extreme condities 23 % (T=1.000 jaar) tot 53 % (T=10.000 jaar) groter zijn dan in November 2007.

De bodemschuifspanningen tijdens extreme stormen zijn dus groter dan tijdens de storm van november 2007. Het verschil is echter gradueel, en niet fundamenteel. Dit komt doordat de schuifspanningen wel toenemen met de golfhoogte, maar ook lager zijn als de waterdiepte groter is. Aangezien de kwelderbodem in november 2007 volledig stabiel is gebleven, zijn er geen redenen om te veronderstellen dat er grootschalige erosie op zal treden tijdens maatgevende condities met circa 50 % grotere bodemschuifspanningen.

3.2.5 Conclusie

De meest stabiele schorren en kwelders ontstaan op plaatsen met (1) voldoende aanbod aan sediment (zand, silt en slib), en (2) relatief sterke dagelijkse golfwerking. De kwelders in de Waddenzee voldoen aan deze twee kenmerken. Op basis van de internationale literatuur zijn deze kwelders daarom aan te duiden als van het meest stabiele type. Tijdens de zwaarste stormen van de afgelopen decennia is geen noemenswaardige erosie van de kwelders in de Waddenzee opgetreden. Vaak vond zelfs netto sedimentatie plaats. Krachten op de bodem tijdens maatgevende condities zijn ongeveer 50 % zwaarder dan in November 2007. Dit verschil is niet zo groot, dat er reden is om aan te nemen dat het gedrag van de kwelders om kan slaan van volledig stabiel naar op grote schaal eroderend.

3.3 Richtlijn instelling ruwheid

3.3.1 Algemeen

Uit het onderzoek van Fase C van dit POV-onderzoek (Arcadis, Deltares, HKV, 2018) volgde dat de kweldervegetatie naar verwachting grotendeels af zal breken tijdens maatgevende condities, door toepassing van de voorspellende formules uit Vuik et al (2018). Het effect van de vegetatie reduceert dan van golfdemping door staande vegetatie tot bodemwrijving over een stoppelig bodemoppervlak. Daarbij is het de vraag welke bodemruwheid toegekend moet worden in de golfberekeningen voor het bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden voor de dijk. In deze paragraaf wordt een aanzet gedaan tot een keuze voor een geschikte waarde.

3.3.2 Richtlijnen voor bodemruwheid

Algemene richtlijnen voor ruwheden zijn te vinden in tabellenboeken die toegepast worden in de Verenigde Staten voor modellering van stroming en golven tijdens cyclonen. Tabel 3-2 geeft de Manning ruwheid volgens Wamsley et al. (2010). In SWAN wordt geen Manning ruwheid, maar een Nikuradse ruwheidshoogte toegepast. Omrekening van Manning naar Nikuradse ruwheid is afhankelijk van de waterdiepte.

Bodemtype	Manning n	Nikuradse ruwheidshoogte k_N (m)				
Waterdiepte →		1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
Slibbodem	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Bodem estuaria	0,025	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Onbegroeid slik	0,030	0,005	0,006	0,007	0,007	0,007
Pionierkwelder	0,035	0,010	0,012	0,014	0,015	0,016
Grasland	0,042	0,018	0,024	0,029	0,032	0,035
Lage kwelder	0,045	0,022	0,030	0,037	0,041	0,045
Middenkwelder	0,050	0,029	0,042	0,051	0,059	0,065
Hoge kwelder	0,055	0,036	0,054	0,068	0,079	0,088

Tabel 3-2 Manning ruwheden ($s/m^{2/3}$) voor verschillende bodemtypen, en bijbehorende Nikuradse ruwheidshoogten (m) voor verschillende waterdiepten (m).

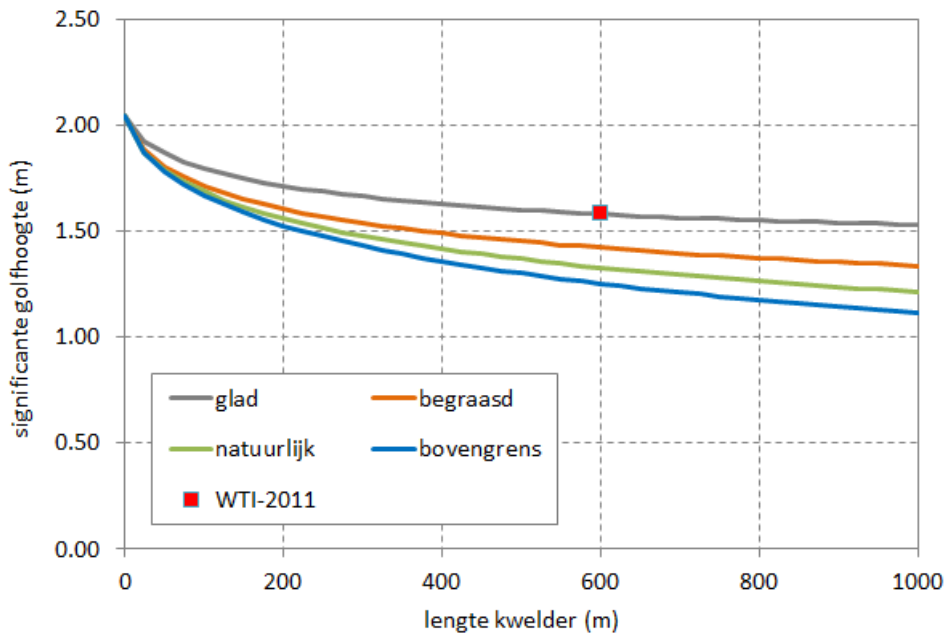
Waterstanden tijdens maatgevende condities voor de Waddenzeedijken zijn in de orde van NAP+5 m. De waterdiepte boven de kwelders is dan ongeveer 3 m. Het grootste deel van de kwelders bestaat uit middenkwelder en hoge kwelder. Voor deze situaties is een Nikuradse ruwheidshoogte van 0,05 tot 0,07 m van toepassing. Dit is het geval bij de kwelders van Groningen, en in Friesland bij de Peazemerlannen. Bij intensieve begrazing kan het bodemoppervlak het karakter van grasland krijgen. Dan is het verstandig om een lagere ruwheidswaarde toe te passen, van 0,03 m. Dit geldt voor grote delen van de kwelders van Noord-Friesland buitendijks.

In de vorige fasen van het onderzoek is een waarde van 0,09 m gehanteerd. Deze waarde was gebaseerd op een studie van Deltares naar het effect van zeegras op de waterbeweging en golven in een ondiepe baai voor de kust van Adelaide (Australië). In die studie werd een ruwheidswaarde van 0,053 (Manning) voor continue zeegrasvelden met grote dichtheid gehanteerd, 0,039 voor continue velden met medium dichtheid en 0,024 voor velden met lage dichtheid of patchy zeegras. Aanhouden van de waarde voor medium dichtheid leidde tot een ruwheidshoogte van 0,09 m. Enerzijds bleek deze ruwheid onvoldoende te zijn om de gemeten golfdemping tijdens stormen van januari 2015 en januari 2017 te kunnen verklaren (Arcadis, Deltares en HKV, 2018), ondanks de intensieve begrazing door schapen in met name 2017. Anderzijds lijkt een waarde van 0,09 op basis van Tabel 3-2 een bovengrens te zijn.

3.3.3 Gevoeligheidsanalyse bodemruwheid

Het effect van een keuze voor een ruwheidswaarde wordt geïllustreerd in Figuur 3-3. De situatie is gebaseerd op de Peazemerlannen, de natuurlijke kwelders direct ten westen van het Lauwersmeer. Als randvoorwaarde zijn de condities uit de WBI-voorlandendatabase gehaald ($T = 10.000$ jaar, HBN-berekening, locatie WZ_3_vl40-00006). De windsnelheid en brekerparameter¹ in het 1D SWAN-model zijn zodanig gekozen dat de golfhoogte op 600 m (dat is bij de dijkteen) zonder toepassing van bodemruwheid gelijk is aan de condities uit de WBI database met uitvoer bij de dijkteen (Waddenzee_locatie0593). Dit is weergegeven met de rode marker in de figuur. Op deze manier zijn effecten van bodemruwheidsverschillen goed te duiden. Vervolgens is de berekening herhaald met Nikuradse ruwheidshoogtes van 0,03 m (begraste kwelders), 0,06 m (natuurlijke kwelders) en 0,09 m (bovengrens). Op 600 m breedte leiden deze drie ruwheden tot een afname van de significante golfhoogte van 0,16, 0,25 en 0,33 m, wat gelijk staat aan -10 %, -16 % en -21 %.

¹ Hierbij was een brekerparameter van 0,95 nodig, wat zeer hoog is. Dit is deels het gevolg van het verschil in bodemligging tussen de 1D SWAN-berekening (NAP+1,7 m, gebaseerd op AHN3) en het 2D WBI SWAN-model (NAP+1,4 tot 1,6 m). Bij een bodemhoogte van NAP+1,5 m in de 1D SWAN-berekening was een brekerparameter van 0,90 nodig, wat nog steeds hoger is dan gebruikelijke waarden.



Figuur 3-3 Effect van bodemruwheid op de golfhoogte voor T=10.000 jaar HBN condities bij de Peazemerlannen, Friesland, Waddenzee_location593.

Deze reductiepercentages zijn sterk locatie-specifiek, omdat ze behalve van de bodemruwheid afhangen van de breedte en bodemprofiel van het voorland, en van de waterstand die van toepassing is. De getallen illustreren daarom welk effect het verhogen van de bodemruwheid kan hebben. Van der Reijden (2019) kwam via een vergelijkbare analyse tot 8 %, als schatting van het relatieve effect van bodemruwheid op de golfhoogte bij de dijken van Noord-Friesland Buitendijks.

3.3.4 Conclusies en aanbevelingen

Het effect van bodemruwheid van natuurlijke midden- en hoge kwelders op golven is in SWAN in rekening te brengen met een Nikuradse ruwheidshoogte van 0,06 m (kwelders van Groningen, en in Friesland bij de Peazemerlannen). Als door intensieve begrazing het bodemoppervlak van de kwelders het karakter heeft gekregen van grasland, is het verstandig om een lagere ruwheidswaarde van 0,03 m toe te passen (grote delen van de kwelders van Noord-Friesland Buitendijks en in de Dollard).

Voor HWBP-projecten, waarin het effect van bodemruwheid op de golfcondities van belang is, is het raadzaam een 2D-berekening uit te voeren met het officiële WBI SWAN-model met daarin ten eerste een verhoogde bodemruwheid ter plaatse van de kwelders, en ten tweede een bodem die gebaseerd is op recente peilingen. De bodempeilingen onder het huidige WBI SWAN-model dateren namelijk naar schatting uit de periode 2003-2008 (Groeneweg en Van Os, 2009). Aangezien kwelders met 2 cm/jaar kunnen opslibben, kan een bodem van circa 15 jaar oud afwijkingen in kwelderhoogte van 0,3 m bevatten.

Voor toekomstige WBI productieberekeningen voor waterstanden en golven raden wij aan om een variabele bodemruwheid toe te passen, zodat het effect van bodemruwheid en bodemhoogte van kwelders op de meest accurate wijze in de hydraulische randvoorwaarden wordt meegenomen.

3.4 Effect zomerkades

3.4.1 Introductie

Op diverse kwelders langs de kust van Friesland zijn zomerkades aanwezig, zie Figuur 3-1. De beschutte kwelders tussen de zomerkade en de dijk worden vaak gebruikt om vee te laten grazen.

Alleen tijdens zware stormen staan deze zomerkades onder water, omdat ze een kruinhoogte hebben, variërend van 2,8 tot 3,4 m boven NAP (zie Tabel 3-3). Tijdens zulke stormen fungeren de zomerkades als golfbrekers, waardoor de golfhoogte op ca. 300-1500 m afstand uit de dijk lokaal verlaagd wordt. Ook bij de dijk kan dit effect nog merkbaar zijn. Er is onderzoek uitgevoerd om dit effect te kwantificeren, allereerst binnen de POV Waddenzeedijken (HKV, 2018), en vervolgens binnen een stageopdracht bij Wetterskip Fryslân (Van der Reijden, 2019). In de volgende paragrafen worden de voornaamste resultaten van deze twee studies samengevat en vergeleken.



Figuur 3-4 Zomerkades (geel) op de kwelders van Noord-Friesland Buitendijks voor de primaire kering (rood).
Bron: Van der Reijden (2019) / Geoweb.

Km	Kruinhoogte (m)	Kruinbreedte (m)	Helling buitentalud
31	3,40	4,00	1:6
32	3,05	2,40	1:11
33	2,82	3,00	1:10
34	2,80	2,00	1:9
35	2,84	1,50	1:10
36	3,03	2,20	1:6
37	2,87	2,50	1:8

Tabel 3-3 Kruinhoogte, kruinbreedte en taludhelling buitentalud van de zomerkades bij dijkkilometers 31 t/m 37.

3.4.2 Effect van zomerkades volgens HKV (2018)

Er bestaan twee databases met golfrandvoorwaarden. De officiële WBI-database, met uitvoer op punten bij de dijkteen, en een aanvullende voorlandendatabase, met uitvoer op punten op de buitenrand van het voorland (de NAP+1 m dieptecontour), zie Figuur 3-4. In de uitvoer bij de dijkteen is de invloed van de zomerkades niet meegenomen. Daarom moet een stap terug gedaan worden naar de buitenrand van het voorland, en moet het gezamenlijke effect van voorland en zomerkades opnieuw worden berekend.

In HKV (2018) is voor die berekening gebruik gemaakt van de voorlandmodule van Hydra-NL. Daarin is het mogelijk om het effect van de zomerkades mee te nemen, door deze te schematiseren als een dam. Er moest alleen worden teruggegrepen op een verouderde editie van de voorlandmodule

(ENDEC), omdat daarmee windgroei tussen de zomerkade en de dijk kan worden meegenomen, terwijl dit proces ontbreekt in de nieuwe voorlandmodule (DaF). Daardoor kan er alleen met de oude voorlandmodule rekening mee worden gehouden dat de afname van de golfhoogte bij de zomerkade weer deels teniet wordt gedaan door hernieuwde windgroei in de zone tussen zomerkade en dijk.



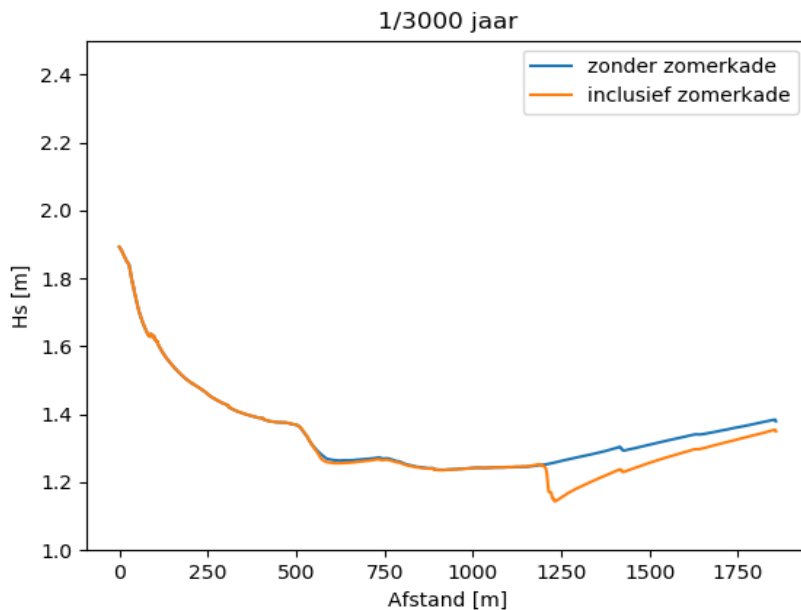
Figuur 3-5 Voorlandendatabase (links) en WBI database (rechts)

In HKV (2018) wordt geconcludeerd:

- De huidige zomerkades op de kwelder (met kruinhoogtes tussen NAP+2,8 en +3,4 m) zorgen voor een reductie van de benodigde kruinhoogte van de primaire waterkering tussen 0,14 en 0,20 m bij een terugkeertijd van 10.000 jaar. Bij deze situatie hoort een waterstand van ongeveer NAP+4,8 m. De reductie geldt ten opzichte van de situatie van een dijk met alleen een kwelder op NAP+1,6 m. Verhoging van zomerkades tot NAP+3,9 m leidt tot een reductie van 0,28 m. Reducties bij een terugkeertijd van 1000 jaar zijn in dezelfde orde van grootte.
- De golfhoogte voor het toetsen van de grasbekleding neemt bij een terugkeertijd van 10.000 jaar af met 0,20 tot 0,31 m (15-30%), afhankelijk van de kruinhoogte van de zomerkade en het beschouwde niveau op de dijkbekleding. Verhoging van de zomerkades tot NAP+3,9 m laat de effecten met nog 0,11 m toenemen.
- Is er een dam, dan doet de hoogte van de kwelder er minder toe, doordat de golven door de dam al lager zijn en minder tot niet meer breken op het voorland achter de dam.
- De zomerkades op de kwelders hebben een relatief flauw talud (gemiddeld 1:8). In Hydra-NL kan alleen gerekend worden met formules voor een steile (1:1,5) havendam van stortsteen. Dammen met een flauw talud hebben meer invloed op de golven dan steile stortstenen dammen, blijkt uit berekeningen. Hierdoor hebben de aanwezige zomerkades naar verwachting meer effect op de golfcondities dan de getallen die in HKV (2018) zijn gepresenteerd. De getallen vormen een ondergrens.

3.4.3 Effect van zomerkades volgens Van der Reijden (2019)

Van der Reijden (2019) heeft een vergelijkbare analyse uitgevoerd, maar dan nog specifiekier toegespitst op de situatie bij Koehool-Lauwersmeer. Het bodemprofiel is exact meegenomen, en er is gerekend met extremere condities, zoals van toepassing voor het ontwerpen van nieuwe bekledingen. Daarnaast is er gebruik gemaakt van een 1D SWAN-model voor het berekenen van het effect van voorland en zomerkade. De zomerkade is daarbij opgegeven via het bodemprofiel. Ook in deze studie is zichtbaar dat hernieuwde windgroei tussen de zomerkade en de dijk het effect van de zomerkade weer deels tenietdoet. Zie Figuur 3-6 voor een voorbeeld.



Figuur 3-6 Voorbeeld van een rekenresultaat, met het effect van zomerkade (rond 1210 m) en kwelder op de golfhoogte, bij km 32,2 en een waterstand van NAP+4,8 m. Ter plaatse van de zomerkade van NAP+3 m hoog neemt de golfhoogte met ongeveer 0,10 m af, maar bij de primaire waterkering (einde profiel) is hier nog maar 0,03 m van over door windgroei tussen de zomerkade en de dijk.

Conclusies uit het werk van der Reijden (2019) zijn:

- Het meenemen van een zomerkade op het voorland verlaagt de golfhoogte. De mate van demping is sterk afhankelijk van de verhouding tussen kruinhoogte van de zomerkade en de waterstand. Ook de breedte van de zomerkade speelt een belangrijke rol in de golfdemping. Hoe breder de zomerkade en kleiner de waterstand boven de kruinhoogte, des te groter is het verlagende effect;
- De huidige afstand tussen zomerkade en primaire kering is dusdanig groot dat het golf dempende effect onder maatgevende omstandigheden weer grotendeels teniet wordt gedaan door golfontwikkeling als gevolg van windkracht bij de toegenomen waterdiepte in de zomerpolder;
- Een wat hogere en/of bredere zomerkade op korte afstand van de primaire kering of tegen de primaire kering aan, zou een effectieve maatregel zijn om de golfbelasting op de primaire kering significant te reduceren. Zie ook Paragraaf 3.5.4.

3.4.4 Reflectie op beide studies

Verschillen tussen beide studies worden veroorzaakt door:

- Het gebruikte golfmodel: een 1D energiebalansmodel ENDEC in HKV (2018), en een 1D spectraal golfmodel SWAN in Van der Reijden (2019), met verschillen in formuleringen voor golfgroei door wind en golfbreking.
- Schematisatie van de zomerkades: als havendam in ENDEC, en als bodenvorm in SWAN.
- Verschillen in exact bodemprofiel, lengte van het profiel en doorgerekende waterstanden.

Beide studies waren verkennend van aard, en hebben daardoor een aantal beperkingen. De studie van HKV (2018) is uitgevoerd met de verouderde voorlandmodule ENDEC, en biedt vrij algemene getallen bij enkele terugkeertijden. De getallen zijn een ondergrens, omdat zomerkades met hun flauwe taluds meer effect zullen hebben dan havendammen, zoals die in de voorlandmodules zijn geïmplementeerd.

De studie van der Reijden (2019) heeft gebruik gemaakt van 1D SWAN, een instrument wat niet direct geschikt is voor de analyses die ermee zijn uitgevoerd. De brekerparameter in het SWAN-

model is vrij hoog, omdat deze is afgeregeld op de vrij beperkte golfbreking op vlakke bodems in de Waddenzee. Daarmee is dit 1D SWAN-model niet zonder meer in staat om ook het effect te modelleren van kleinschalige objecten zoals zomerkades, als deze via het bodemprofiel worden geschematiseerd.

De lokale reductie bij de zomerkade in Van der Reijden (2019) is ca. 0,1 m (Figuur 3-6), en is daarmee nog kleiner dan de reductie die door ENDEC wordt voorspeld bij de waterkering (ca. 0,2-0,3 m). Dit terwijl de door ENDEC berekende effecten al als ondergrens werden gezien. Door het schematiseren van de zomerkade als bodemvorm zijn de resultaten van der Reijden (2019) in kwantitatieve zin moeilijk op waarde te schatten.

Als daadwerkelijk wordt overwogen om het effect van de zomerkades te betrekken bij het dijkversterkingsproject Koehool – Lauwersmeer, adviseren wij om een 2D SWAN-model toe te passen, inclusief zomerkades die zijn geschematiseerd als zogenaamde 'obstacles' via de d'Angremond / Van der Meer formulering. In Paragraaf 3.5.2 worden specifieke aanbevelingen gedaan voor de wijze waarop het voorland en de zomerkades kunnen worden meegenomen in deze berekeningen.

3.5 Inzet voorlanden

3.5.1 Introductie

Deze paragraaf geeft een handelingsperspectief voor de wijze waarop het effect van het voorland op de Hydraulische Randvoorwaarden dient te worden meegenomen. Effecten van voorlanden op waterstanden zijn verondersteld verwaarloosbaar klein te zijn. Daarmee resteert een effect op de golftrandvoorwaarden: de golfhoogte, golfperiode en golfrichting. Daarbij zijn drie typen situaties te onderscheiden.

Situatie 1: Bepalen veiligheidsopgave in een WBI-beoordeling

In een WBI-beoordeling wordt de faalkans van de waterkering bepaald, en beoordeeld of deze nog voldoet aan de normen in de Waterwet. De voorliggende richtlijn geeft een advies over de wijze waarop reeds aanwezige voorlanden kunnen worden meegenomen in de veiligheidsbeoordeling.

Situatie 2: Bepalen versterkingsopgave voor een HWBP-project

Als een dijktraject reeds is opgenomen in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) om versterkt te worden, wordt eerst opnieuw bepaald wat de veiligheidsopgave is, maar dan voor een zichttermijn gelijk aan de vereiste levensduur van de dijkversterking. Het voornaamste verschil met een WBI-beoordeling is de toe te passen zeespiegelstijging.

Situatie 3: Aanleg van voorlanden als oplossingsrichting

Tenslotte gaat de richtlijn in op situaties waarbij een daadwerkelijke veiligheidsopgave aangepakt moet worden binnen een HWBP-project. Voor de dijkvakken met een opgave wordt bepaald wat de dimensies en sterkte van de dijk moeten zijn, om de kering nu en in de toekomst aan de eisen te laten voldoen. Een mogelijke oplossingsrichting daarbij is het plegen van ingrepen in het voorland.

Deze drie situaties komen in de volgende paragrafen aan bod.

3.5.2 Situatie 1: Bepalen veiligheidsopgave in een WBI-beoordeling

In beoordelingen volgens WBI kan worden gekozen voor een eenvoudige toets, gedetailleerde toets, of voor een toets op maat. Voorlanden hebben in potentie effect op de directe faalmechanismen uit Tabel 3-4. Het falen van het voorland is daarom in het WBI opgenomen als indirect faalmechanisme. In dit POV-onderzoek ligt de focus op het effect van voorlanden op Hydraulische Randvoorwaarden.

Faalmechanisme	Afkorting	Effect voorland
Asfaltbekleding (golflappen)	AGK	Reductie golflappen door afname golfhoogte
Grasbekleding (erosie buitentalud)	GEBU	Reductie stroomsnelheden door afname golfhoogte
Grasbekleding (kruin en binnentalud)	GEKB	Reductie golfoploop en golfoverslagdebiet door wijziging golfhoogte en -periode.
Zetsteen (golfaanval)	ZST	Reductie golfbelasting door wijziging van golfhoogte en -periode
Afschuiving bekleding binnentalud	GABI	Indirecte reductie van de kans op optreden door afname golfoverslagdebiet
Afschuiving bekleding buitentalud	GABU	Indirecte reductie van de kans op optreden door afname drukfluctuaties door golven
Macrostabieliteit buitenwaarts	STBU	Minder kans op het ontstaan van glijcirkel door de massa van het voorland, en demping van de stijghoogte / freatische lijn.
Macrostabieliteit binnenwaarts	STBI	Geen faalkansbijdrage voor waterstanden onder het voorlandniveau, en demping van de stijghoogte / freatische lijn.
Opbarsten, piping en heave	STPH	Vergroting kwelweglengte bij kleilaag op voorland en kleinere kans op opbarsten en heave.

Tabel 3-4 Overzicht van effecten van voorlanden op directe faalmechanismen van een dijk.

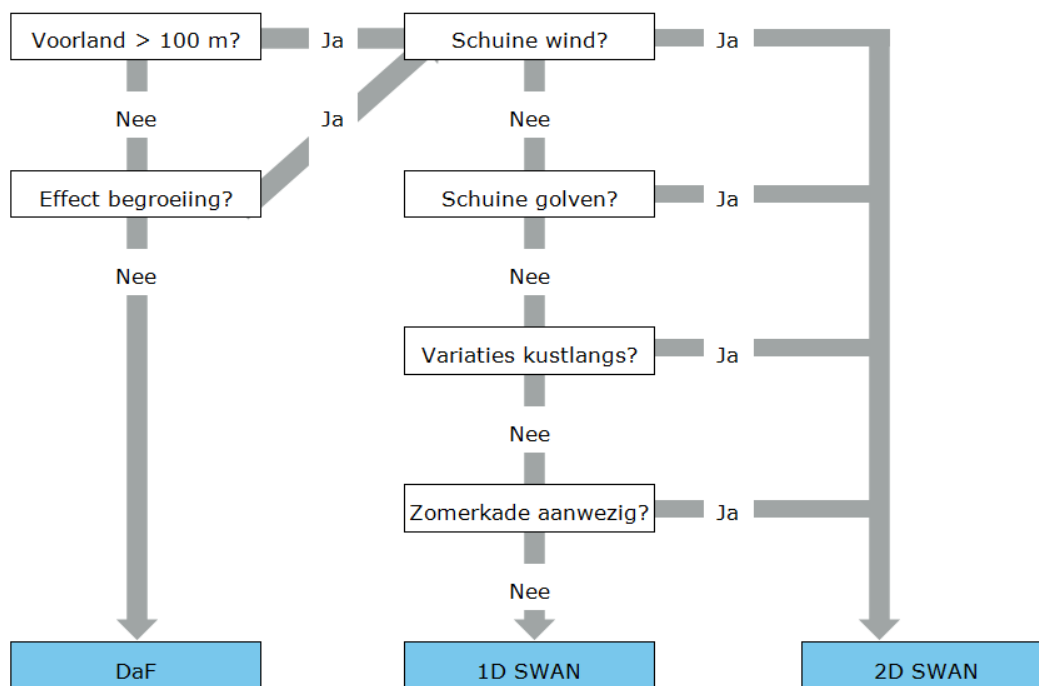
In de gedetailleerde toets wordt gebruik gemaakt van het standaard WBI instrumentarium. Voor de Waddenzee bestaat dit uit statistiek van wind en waterstanden, een database met golfparameters bij de dijkteen, en de programma's Riskeer en Hydra-NL voor het berekenen van de Hydraulische Randvoorwaarden bij een bepaalde herhalingstijd. De WBI-database is gebaseerd op SWAN-berekeningen, wat inhoudt dat ter plaatse van de kwelders het effect van de bodem van het voorland aanwezig is in de golfparameters. De modelbodem is gebaseerd op het AHN2 en vak lodingen uit de periode 2005-2009.

De verhoogde ruwheid van begroeide kwelders en eventueel aanwezige zomerkades ontbreken in SWAN. Het onderzoek in Fase B en C (Arcadis, Deltares, & HKV, 2018) heeft laten zien dat, voor locaties met brede kwelders, de berekende significante golfhoogte H_{m0} bij de dijk relatief hoog is, en de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ waarschijnlijk te laag is. In een toets op maat kan er daarom voor gekozen worden om het effect van het voorland op de golftrandvoorwaarden op een andere manier te bepalen, specifiek toegespitst op de situatie met kwelders.

In een toets op maat kan gebruik gemaakt worden van de WBI voorlandendatabase, met uitvoerlocaties op de buitenrand van het begroeide deel van het voorland (de kwelders), op de NAP+1 m dieptecontour. Deze voorlandendatabase kan worden gebruikt voor het opleggen van randvoorwaarden aan een model wat de golftrandvoorwaarden van de rand van de kwelder vertaalt naar de golftrandvoorwaarden aan de teen van de dijk. Er zijn meerdere keuzes mogelijk voor zo'n model: voorlandmodules (DaF, ENDEC), SWAN (1D, 2D), SWASH en XBeach. Tabel 3-5 geeft aan wat de voordelen en nadelen zijn van de verschillende instrumenten, en Figuur 3-7 geeft een advies voor de te maken keuze.

Instrument	Voordelen	Nadelen
DaF (1D)	<ul style="list-style-type: none"> • Integraal onderdeel van Hydra-NL en Riskeer als voorlandmodule • Zeer snel • Bevat formules voor bijdraaien van golven (refractie) 	<ul style="list-style-type: none"> • Niet geschikt voor brede voorlanden door ontbreken windgroei • Vaste golfperiode • Bevat alleen havendammen, geen zomerkades
ENDEC (1D)	<ul style="list-style-type: none"> • Zeer snel • Bevat windgroei • Bevat formules voor bijdraaien van golven (refractie) 	<ul style="list-style-type: none"> • Is vervangen door DaF als voorlandmodule in Hydra-NL en Riskeer, en daardoor moeilijk toepasbaar • Vaste golfperiode • Bevat alleen havendammen, geen zomerkades • Soms instabiel
SWAN (1D)	<ul style="list-style-type: none"> • Snel • Bevat windgroei, bodemruwheid en vegetatie • Eenvoudig in gebruik 	<ul style="list-style-type: none"> • Bevat geen havendammen of zomerkades • Geen schuin invallende wind of golven mogelijk • Geen bijdraaien van golven (refractie)
SWAN (2D)	<ul style="list-style-type: none"> • Bevat windgroei, bodemruwheid en vegetatie • Bevat 2D-effecten: schuin invallende wind of golven, langs variaties in bodemligging • Bevat havendammen en zomerkades via obstacles 	<ul style="list-style-type: none"> • Onderschat de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ bij de dijk t.p.v. kwelders • Langere rekentijd • Vraagt om voldoende kennis en ervaring van de modelleur
SWASH (2D) of eventueel XBeach niet-hydrostatisch (2D)	<ul style="list-style-type: none"> • Gedetailleerd doorrekenen van golven en stroming, en de interacties daartussen • Beter in staat om golf-golfinteracties te berekenen, en daarmee verandering van golfperiode te voorspellen • Zomerkades verwerken in de modelbodem 	<ul style="list-style-type: none"> • Lange rekentijden • Vooral geschikt voor academische studies • Nog weinig validatie voor voorlanden / kwelders • Vraagt om veel specialistische kennis en ervaring van de modelleur

Tabel 3-5 Enkele prominente voor- en nadelen van verschillende instrumenten voor het berekenen van het effect van voorlanden op golftrandvoorwaarden bij de dijk.



Figuur 3-7 Advies voor de keuze van een instrument voor het berekenen van het effect van voorlanden op golfrandvoorwaarden bij de dijk.

Aanbevelingen aan modelleers voor de instellingen van een 2D SWAN-model zijn als volgt:

- de instellingen uit WTI-2011 voor de algemene fysica, specifiek afgeregeld op het reproduceren van golven in de vlakke en ondiepe Waddenzee (HKV en Svasek, 2011);
- het verhogen van de bodemruwheid tot 0,07 m (Nikuradse waarde, Manning formulering, zie Paragraaf 3.3.2 over advies bodemruwheid) voor de begroeide delen van de kwelders;
- schematisatie van zomerkades als obstacles, in combinatie met de d'Angremond / Van der Meer formulering, inclusief de juiste taludhellingen van de kades;
- update van de modelbodem in SWAN met recente peilingen, omdat deze nu gebaseerd is op gegevens uit 2005-2009;
- als de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ bij de dijk volgens SWAN lager is dan op de voorlandrand, is dit mogelijk niet correct, waardoor het raadzaam is om de waarde op de voorlandrand ook bij de dijk toe te passen, ofwel nader detailonderzoek uit te voeren met bijvoorbeeld SWASH.

3.5.3 Situatie 2: Bepalen versterkingsopgave voor een HWBP-project

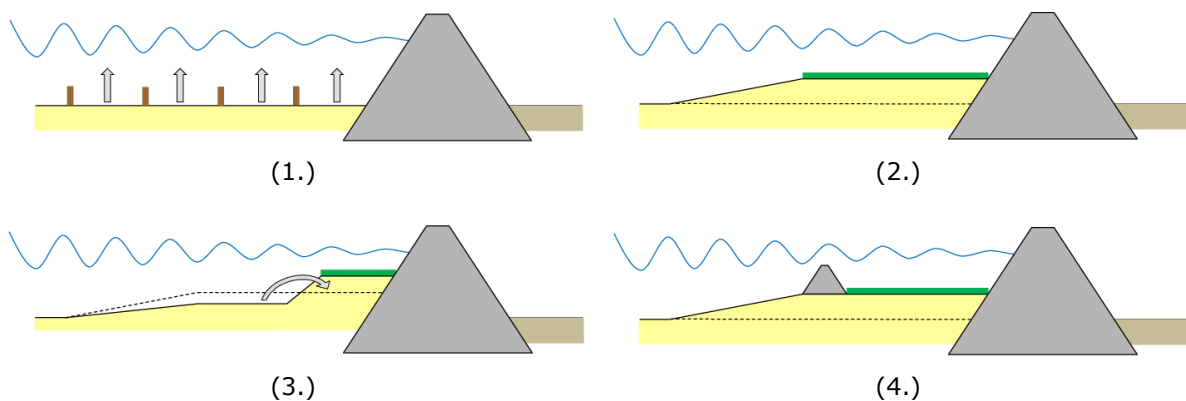
Het voornaamste verschil tussen een WBI-beoordeling en het bepalen van de opgave voor een HWBP versterkingsproject is de zichttermijn. Een WBI-beoordeling kijkt vooruit tot aan de volgende beoordelingsronde. Bij een versterkingsproject wordt 30-100 jaar vooruit gekeken, waardoor zeespiegelstijging veel belangrijker wordt.

In een standaard procedure worden de golven daarbij uit de database gehaald bij een hogere waterstand. Ondertussen ligt daar nog steeds dezelfde set met SWAN-berekeningen aan ten grondslag, met dezelfde modelbodem. Impliciet houdt dat in dat wordt aangenomen dat de bodemhoogte in de komende 30-100 jaar ongewijzigd zal blijven. In werkelijkheid groeit de Waddenzee mee met zeespiegelstijging, en zijn er nog geen signalen dat de Waddenzee het tempo van de zeespiegelstijging niet bij zou kunnen houden. Sedimentatiesnelheden in de kwelderwerken overschrijden de zeespiegelstijging zelfs ruimschoots.

Bij een lange zichttermijn is het daarom van belang dat niet alleen de zeespiegelstijging vergroot wordt, maar dat ook een realistische bodemontwikkeling wordt meegenomen. Anders wordt gerekend met een verkeerde waterdiepte boven de kwelders, en daardoor een verkeerde inkomende golfhoogte. Een pragmatische werkwijze is het rekenen met een aangepaste effectieve zeespiegelstijging (zeespiegelstijging minus verwachte bodemhoogtestijging).

3.5.4 Situatie 3: Aanleg van voorlanden als oplossingsrichting

Voorlanden kunnen ook worden ingezet als oplossingsrichting binnen een dijkversterkingsproject. Er zijn verschillende mogelijkheden voor het realiseren van een begroeid voorland op een plek waar deze nu nog niet aanwezig is, zie Figuur 3-8 voor enkele voorbeelden. De kosteneffectiviteit van deze varianten is onderzocht in Vuik et al. (2019) aan de hand van life-cycle costs en invloed op faalkansen.



Figuur 3-8 Verschillende oplossingsrichtingen voor dijkversterking met realisatie van een begroeid voorland voor de dijk.

Kwelderwerken (rijshouten dammen en greppels voor drainage) kunnen op lange termijn resulteren in grootschalige kwelderontwikkeling met een stevige bodem van geconsolideerde klei. Het is een pure vorm van Building with Nature, omdat natuurlijke sedimentatie wordt gebruikt voor het vergroten van de veiligheid. De verstoring van het bestaande ecosysteem is minimaal. Deze methode is echter vanuit het perspectief van dijkversterking alleen interessant als een veiligheidsopgave zich pas in de verre toekomst (minimaal 10-20 jaar) manifesteert. Voortdurende onderhoudskosten maken life-cycle costs relatief hoog ten opzichte van reguliere dijkversterking of andere wijzen van aanleggen van een voorland.

Een voorland kan ook gerealiseerd worden door middel van baggeren en storten, zoals bij de versterking van de Houtribdijk (zandig voorland) of de aanleg van Marconi Kwelderlandschap Delfzijl. Hierbij is het van belang om te onderzoeken of een voorland op deze locatie morfologisch stabiel zal zijn, of dat alsnog beschermende maatregelen, zoals rijshouten of stortstenen dammen nodig zijn.

Op veel plaatsen met kwelders is sprake van oude kwelders, waarbij de vegetatie bestaat uit een monocultuur van climaxvegetatie (veelal kweek). Het kan ecologisch aantrekkelijk zijn om een deel van de kwelders af te plaggen, en terug te zetten naar het pioniersstadium. Het vrijkomende materiaal kan gebruikt worden om een verbrede dijkvoet aan te leggen van enkele tientallen meters breed, ver boven het niveau waarbij natuurlijke sedimentatie kan plaatsvinden. Een dergelijke hoge zone neemt de golfaanval op de dijk vrijwel volledig weg, en scoort beter op kosteneffectiviteit dan traditionele dijkverhoging of aanleg van kwelders.

De effectiviteit van een voorland kan worden vergroot door plaatsing van zomerkades op de kwelders, waarbij de afstand tot de dijk niet te groot moet zijn. Een aandachtspunt is dat het getij bij verhoogde waterstanden nog steeds binnen moet kunnen dringen, zodat het voorland tussen de zomerkade en de dijk mee kan groeien met zeespiegelstijging.

4 Aanbevelingen en relaties met andere studies

4.1 Inleiding

De aanbevelingen en relaties met toekomstige studies richten zich op de volgende onderdelen:

- Benoemen van openstaande onderzoeksvragen;
- Definiëren van modelonzekerheid golfperiode;
- Adviseren over het binnen BOI verder uitzoeken van de golfperiode-problematiek;
- Relatie met andere studies (proces-voorlanden, HWBP-projecten).

4.2 Openstaande onderzoeksvragen

4.2.1 Introductie

In de onderzoeksfase (Fase C) zijn een aantal onderzoeksvragen onbeantwoord gebleven. Deze worden in deze paragraaf nader belicht. Daarbij wordt ook aangegeven aan welk project of programma de aanbevelingen gericht zijn. Een aantal hiervan betreft BOI.

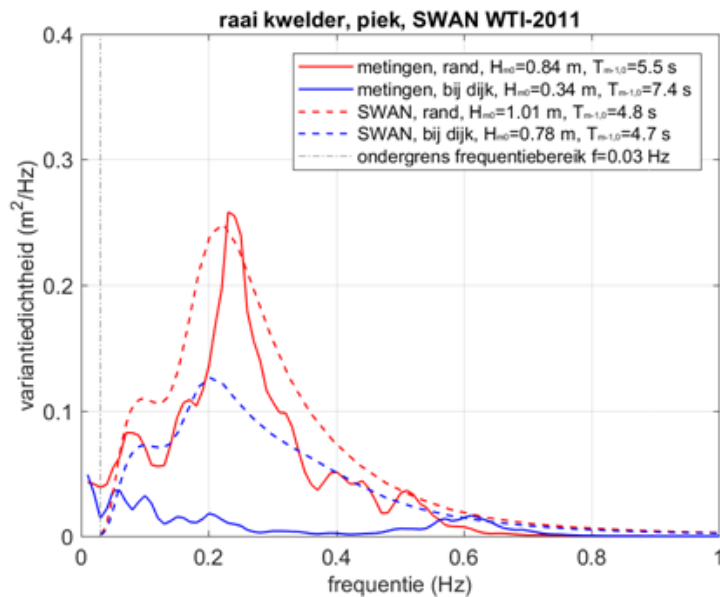
4.2.2 Ontbrekende fysica in SWAN

Met SWAN zijn gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd door diverse varianten op de standaardinstellingen (WTI2011 en standaard SWAN) toe te passen en de resultaten te vergelijken met metingen boven de kwelders tijdens een tweetal stormen. Met alle instellingen werd een forse afwijkende vorm tussen de gemeten en berekende spectra, en dus ook gemiddelde golfperiode, aan de teen van de dijk verkregen. Daaruit is geconcludeerd dat SWAN bepaalde fysica niet kan modelleren. Wij bevelen daarom aan om gericht te onderzoeken welke fysica dit zou kunnen zijn. Voordehand liggend zijn:

- De generatie van laag-frevente infra-gravity waves. Deze infra-gravity waves worden niet in SWAN gemodelleerd.
- Doordringing van deining vanaf de Noordzee. Lopend onderzoek van Smale (2018) laat zien dat numerieke discrepanties ten aanzien van discretisatie en resolutie verhinderen dat refractie van deze deiningcomponenten in de Waddenzee goed worden berekend.
- Modelleren van dissipatie door vegetatie. Het effect van vegetatie wordt wel gemodelleerd, maar Jacobsen et al. (2019) laten zien dat de formulering in SWAN fundamenteel onjuist is. Genoemde paper biedt aanknopingspunten om de dissipatie van de lokaal gegenereerde golven sterk te verbeteren.

Het ligt voor de hand deze onderzoeksvraag voor te leggen aan het programma Kennis voor Keringen (KvK), het onderzoeksprogramma dat tot BOI-rijpe kennis² zou moeten leiden.

² De feitelijke implementatie van deze kennis vindt plaats in BOI zelf.



Figuur 4.1 Gemeten en berekende golfspectra op de voorlandrand en nabij de dijk op de piek van de storm in januari 2017. Opvallend is dat SWAN de sterke gemeten reductie van windgolven (rondom de piek) niet kan reproduceren.

4.2.3 Voorstel voor meetcampagne

Bij bovenstaande conclusie moet de kanttekening worden gemaakt dat het aantal beschouwde stormen beperkt is en de stormcondities verre van extreem. Dat maakt dat de bevindingen uit deze studie niet zondermeer zijn te veralgemeniseren. De geldigheid voor hogere waterstanden en zwaardere golfcondities kan op andere locaties dan de beschouwde meetlocaties anders zijn.

Daarom wordt geadviseerd om:

- Voor een grote verzameling aan (kwelder)locaties en hydraulische condities (waterstand en golven) de golfhoogtereductie over een kwelder te meten;
- Na te gaan in hoeverre lokaal variërende bodemwrijving, uiteraard wel binnen realistische grenzen, leidt tot de gewenste (gemeten) golfhoogtereductie;
- Na te gaan in hoeverre de vegetatie op de kwelders onder extreme omstandigheden een golf-reducerende werking kan hebben. Vegetatie zal waarschijnlijk grotendeels afbreken onder extreme condities.
- Aanvullend bevelen we aan metingen op de kwelders uit te voeren die zich vooral richten op het nauwkeurig meten van energie in de laagfrequente band in het spectrum tijdens stormen. Ook bestaande metingen in de Noordzee en Waddenzee (met name van Rijkswaterstaat) zouden in meer detail geanalyseerd kunnen worden op de aanwezigheid van lange golven. Deze laatste worden in de standaard processing van de data mogelijk sterk beïnvloed door het uitfilteren van laagfrequente signalen.

Het is niet onlogisch om een dergelijke aanbeveling te vertalen in een BESAFE achtig onderzoek. Een andere optie is om aansluiting te zoeken bij de Quick Reaction Force voor de Waddenzee.

4.2.4 Golfverslag

De benodigde kruinhoogte van een waterkering wordt voornamelijk bepaald door de golfverslagcondities. Deze condities (zoals het golfverslagdebiet) worden vastgesteld door middel van empirische formuleringen waarin de hydraulische eigenschappen (significante golfhoogte, spectrale golfperiode, waterstand en golfvalshoek) en geometrische eigenschappen van de waterkering (taludhelling, bermen, kruinelementen, ruwheid) worden meegenomen.

In deze formulering wordt geen rekening gehouden met de invloed van de waterdiepte bij de teen en daarmee dus de aanwezigheid van een voorland. Indicatieve laboratoriumtesten, welke in 2018 in het kader van KPP-VOW in een golfgoot zijn uitgevoerd (en in 2019 nog numeriek zullen worden uitgevoerd), tonen aan dat de waterdiepte vlak voor de dijk wel degelijk van invloed kan zijn op het golfoverslagdebiet. Dit komt waarschijnlijk doordat de golfhoogteverdeling wordt beïnvloed door de ondiepte (de spectrale golfhoogte H_{m0} neemt dan nauwelijks af maar een andere golfhoogtemaat zoals de $H_{2\%}$ kan significant afnemen). Ook kan het zijn dat door niet-lineaire aspecten de golfoverslagcondities wijzigen.

Hieraan gerelateerd is de invloed van lange golven op golfoverslag. Deze infragravity waves hebben invloed (1) via hun eigen impuls, en (2) als verhoging van de gemiddelde waterstand. Op ondiepe voorlanden kunnen infragravity waves een fors aandeel hebben in de totale golfenergie. Wanneer deze in onvoldoende mate wordt verdisconteerd, zoals bijvoorbeeld het geval is in SWAN, zal dit tot een onderschatting van de golfoverslag leiden.

Indien de invloed van het voorland op golfoverslag in rekening wordt gebracht kan dit dus leiden tot een lagere (bij aangepaste golfhoogte verdeling) respectievelijk hogere benodigde kruinhoogte (bij in rekening brengen infra-gravity waves), en daarmee een aangepast ruimteslag en andere investeringskosten bij dijkversterkingsprojecten. Er wordt daarom aanbevolen om de bovengenoemde hypothesen ten aanzien van de waterstandsafhankelijkheid en de infra-gravity waves verder uit te werken en te projecteren op verschillende casussen met betrekking tot de Waddenzeedijken. Uitwerking van deze hypothese zou deels bij het KvK programma, deels bij waterschappen waar dit speelt onder te brengen. Wat betreft het laatste zou dit een logisch onderwerp zijn voor op de agenda van het nieuwe Kennis en Innovatie Programma van HWBP.

4.2.5 Bodemruwheid vegetatie

De met SWAN uitgevoerde berekeningen in Fase C zijn gebaseerd op een verhoogde oppervlakteruwheid, die gebaseerd is op standaardwaarden, gehanteerd in de Verenigde Staten voor kweldervegetatie. Deze ruwheid is niet per definitie de juiste bodemruwheid voor kwelders. Vergelijking met de metingen suggereert dat een nog hogere bodemruwheid nodig is. Er is echter meer onderzoek nodig om met voldoende zekerheid te zeggen welke bodemruwheid nodig zou zijn in SWAN bij nog zwaardere stormen. We bevelen daarom aan om een protocol op te stellen, waarbij gemeten kan worden als een storm wordt voorspeld die nuttige inzichten op kan leveren. Hierbij kan aansluiting gezocht worden bij de 'Quick Reaction Force' voor de Waddenzee, geïnitieerd door Rijkswaterstaat. Richting BOI doen we de aanbeveling om hierbij aan te sluiten, en toe te werken naar een variabele bodemruwheid, afhankelijk van het type ondergrond.

We bevelen aan om in de aanbevolen meetcampagne zowel te focussen op het effect van bodemruwheid op de golfhoogte als op de golfperiode. Verder mag duidelijk zijn dat het kunnen beschouwen van meerdere stormen, meer locaties en meer typen voorland ook zal bijdragen aan robuustere kennis.

4.2.6 Standzekerheid kwelders

In het onderzoek is alleen gekeken naar de invloed van de kwelders op de Hydraulische Belastingen onder de huidige omstandigheden, dat wil zeggen dat geen rekening is gehouden met zeespiegelstijging en het mee groeien van kwelders met de zeespiegelstijging. Aanbevolen wordt dit wel te beschouwen onder ontwerpomstandigheden bij aankomende versterkingsprojecten. Uitwerking van deze methode is dan onder te brengen bij het nieuwe Kennis en Innovatie Programma van HWBP.

4.2.7 Faseverschillen wind-opzet-getij-golven.

Ondanks dat de informatie over de faseverschillen tussen wind, getij, opzet en golven beschikbaar is in de gebruikte metingen en de uitgevoerde modelsimulaties is daar verder niks mee gedaan. Omdat uiteindelijke belastingen op de keringen behoorlijk gevoelig zijn voor aannames omtrent deze faseverschillen, wordt aanbevolen de beschikbare informatie omtrent de faseverschillen nader te analyseren. Temeer omdat het effect van de faseverschillen een van de onderwerpen is die aanvankelijk zouden worden onderzocht in een andere POV-studie, namelijk het onderzoek 'Risicoanalyse HR', maar daar in tweede instantie geen prioriteit heeft gekregen, verdient het aanbeveling dit relatief laaghangende fruit te plukken in het kader van KvK, met implementatie in BOI.

4.2.8 Windmodellering

In de aandrijving van het Delft3D model is gebruik gemaakt van HIRLAM. Ondanks dat de berekende HIRLAM wind ter plaatse van Huibertgat goed overeenkomt met de gemeten wind, vertoont het gehanteerde HIRLAM windveld een onrealistisch grote windgradiënt over de Waddenzee. Mogelijk is bij de interpolatie vanuit HIRLAM-roosterpunten onvoldoende rekening gehouden met de relatief scherpe land-water-gradiënten als het om wind gaat (geen land-sea-mask toegepast bij de interpolatie). Aanbevolen wordt bij een komende, in het kader van de Meerjarige Veldmetingen Eems-Dollard (MVED), uit te voeren validatie-studie dit nog eens tegen het licht te houden. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat tegen die tijd het fijnere resolutie model HARMONIE beschikbaar is en de land-zee overgangen scherper gemodelleerd worden. Neemt niet weg dat de interpolatie ten behoeve van de forcering van de hydrodynamische modellen kritisch beschouwd moet worden.

4.2.9 Getijslag

Opvallend is dat de getijslag periodiek met enkele decimeters wordt overschat. Mogelijk zit de springtij-doodtij-cyclus niet goed in het model. Aanbevolen wordt hier bij een volgende analyse goed naar te kijken. Mogelijk dat dat al bij POV Risicoanalyse HR gebeurt of anders tijdens de hindcasts die worden uitgevoerd in het kader van het MVED-project.

4.2.10 Modelkoppeling aanpak

Om de waterstanden te bepalen is gebruik gemaakt van een tweezijdig gekoppeld waterbewegingsmodel en golfmodel in de Delft3D suite. Dit model is echter niet gevalideerd. Wanneer het model met tweezijdige koppeling in de toekomst toegepast gaat worden in het kader van operationele voorspellingen of zelfs BOI, dan verdient het aanbeveling het model goed te valideren.

4.3 Modelonzekerheid periode

We hebben reeds geconstateerd dat er een fundamentele kennisleemte is ten aanzien van energie dissipatie door vegetatie, doordringing van deininggolven vanaf de Noordzee en generatie van infra-gravity waves. Tijdens de gemeten stormen heeft dit tot forse afwijkingen tussen gemeten en berekende spectra en dus integrale golfparameters als H_{m0} en $T_{m-1,0}$. Hoe groot de verschillen zouden zijn onder meer maatgevende condities is niet duidelijk. Desalniettemin lijken de drie genoemde processen een minder grote rol te spelen bij hogere waterstanden, die optreden onder meer maatgevende condities.

Voor beoordeling en ontwerp zouden de kennishiaten vertaald kunnen worden in een hogere modelonzekerheid dan thans wordt gehanteerd. Daarbij kunnen we gebruik maken van de thans uitgevoerde gevoeligheidsberekeningen, in vergelijking met de metingen. Omdat naar verwachting de kennishiaten een minder grote rol lijken te spelen bij meer extreme omstandigheden, zou de

schatting op basis van de gevoeligheidsberekeningen onder stormcondities wel eens een bovengrens kunnen zijn.

In onderstaande maken we een inschatting van de verandering van de modelonzekerheid van $T_{m-1,0}$, gebruik makend van de statistische analyse uit de Eindrapportage van Fase C, waarin de relatieve bias en scatter-index berekend zijn voor een aantal tijdstippen in de stormen van 2015 en 2017 op een locatie op de zeewaartse rand van het kwelder en nabij de teen van de dijk. Uit de Figuren D-11 t/m D-14 in de Fase C Eindrapportage hebben we de in Tabel 4-1 vermelde waarden voor relatieve bias en scatter-index geschat.

Jaar	Relatieve bias		Scatter index	
	voorlandrand	dijk	voorlandrand	dijk
2015	-20 %	20 %	5 %	45 %
2017	-40 %	20 %	15 %	50 %

Tabel 4-1 Relatieve index en scatter-index op een locatie aan de rand van het voorland en aan de dijk tijdens de stormen van 2015 en 2017.

De relatieve bias is fors aan de voorlandrand en draait om van teken tot aan de dijk, zonder daarbij kleiner te worden. Dit is geheel te wijten aan de enorme verschillen tussen gemeten en berekende spectrale vorm. Daarnaast neemt de scatter-index toe van ongeveer 10 % naar 50 %. Gezien de eerdere verschillen in spectrale vorm is het niet vreemd dat we moeten concluderen dat de modelonzekerheid fors toeneemt. Dit is geheel in lijn met het belang van ontbrekende fysische processen.

De afgeleide modelonzekerheden die in WBI worden gehanteerd worden gekenmerkt door een relatieve bias van -4 % en een standaardafwijking van 11 %. Dit houdt in dat gemiddeld over de Waddenzee SWAN de metingen licht onderschat en de variatie beperkt is. Dat geldt dus niet voor de toepassing over een kwelder. Op basis van Tabel 4-1 zouden we kunnen concluderen dat de standaardafwijking moet worden verhoogd van 11 % naar ongeveer 50 %, maar de enorme verandering in relatieve bias staat dit eigenlijk niet toe. Wij achten het onverantwoord op basis van de verkregen resultaten, i.e. verschillen in spectrale vorm en grote relatieve bias, een schatting voor de modelonzekerheid af te geven waarmee het effect van het voorland in de Hydraulische Belastingen wordt verwerkt.

We bevelen aan om voor de bepaling van Hydraulische Belastingen de aanbevelingen in Tabel 2-1 over te nemen.

4.4 Advies richting BOI-ontwikkelingstraject

In paragraaf 4.2 zijn openstaande onderzoeksvragen uit Fase C nogmaals toegelicht. Dit heeft tot aanbevelingen geleid richting diverse programma's en projecten. Een daarvan is BOI. De aanbevelingen die aan BOI, of het onderliggende onderzoeksprogramma KvK, zijn toebedeeld zijn hieronder weergegeven. Tussen haakjes staan de paragrafen vermeld waarin deze aanbeveling is gedaan:

- Onderzoek naar de ontbrekende fysica in SWAN om gemeten spectra op de kwelders te kunnen reproduceren (Paragraaf 4.2.2).
- Toetsen van hypothesen ten aanzien van het effect van waterstandsafhankelijkheid en infragravity waves op golfoverslag (Paragraaf 4.2.4).
- De mogelijkheden aftasten om locatie-afhankelijke bodemruwheid in de golfmodellering van BOI te implementeren (Paragraaf 4.2.5).
- Onderzoeken van de faseverschillen tussen wind, opzet en golven in de gebruikte metingen en uitgevoerde modelberekeningen en bruikbaar maken voor BOI (Paragraaf 4.2.7).
- Validatie van tweezijdig gekoppeld golf- en waterbewegingsmodel (Paragraaf 4.2.10).

4.5 Relatie met andere studies

4.5.1 Inleiding

Ten aanzien van de gerelateerde studies kan onderscheid worden gemaakt tussen studies die modeltechnisch-wetenschappelijk aansluiten op het hier uitgevoerde onderzoek en studies die zich juist richten op de meer beleidsmatige kant van de inzet van voorlanden. Deze laatste component is bewust buiten de scope van de hier beschreven studie gehouden.

4.5.2 Model technisch gerelateerde studies

De voorliggende studie richt zich met name op het effect van het voorland op de hydraulische randvoorwaarde bij de teen van de dijk. De inkomende belasting ter plaatse van de rand van het voorland is in deze studie dan ook een soort van harde randvoorwaarde.

In een aantal andere studies gaat de aandacht meer expliciet uit naar qua modellering van de hydraulische condities op buiten het voorland liggende gebied. In deze studies zijn de hydraulische condities op het voorland dan ook een uitkomst van de uitwerkingen.

Een van dergelijke studie is de in het kader van de POVW uitgevoerde studie Risicoanalyse HR (Arcadis, Deltares, HKV, KNMI, RHDHV, VVC, Witteveen en Bos, 2019), (Arcadis, Deltares, HKV, KNMI, VVC, Witteveen en Bos, 2019). In deze studie wordt onderzocht wat het effect is van de toepassing van een ander modelinstrumentarium op de randvoorwaarden bij de Waddenzeedijken. Daar waar er sprake is van een voorland gaat de aandacht uit naar de op de buitenrand van het voorland gelegen uitvoerpunten. Deze studie bevindt zich thans in Fase C en zal in het najaar tot afronding komen.

De aandacht voor de meer grootschalige randvoorwaarden geldt in principe ook voor de studies die worden uitgevoerd in het kader van de Meerjarige Veldmetingen Eems-Dollard (Waterschap Noorderzijlvest, 2018a), (Arcadis/AquaVision/Infram/VdMC/VVC, 2018). Dit nog 11 jaar durende meetprogramma moet informatie opleveren waarmee de waterbewegings- en golfmodellen kunnen worden verbeterd en nieuwe onderdelen hiervan kunnen worden gevalideerd.

4.5.3 Beleidstechnisch gerelateerde studies

In het verlengde van het voorliggende onderzoek is door het Wetterskip Fryslân een studie opgestart naar de wijze waarop bij de langs de Waddenzeedijken aanwezige kwelders betrokken partijen zo efficiënt mogelijk kunnen samenwerken (POV Waddenzeedijken, 2019). Momenteel worden kwelders niet volledig meegenomen bij het toetsen van de dijk of is niet overal een kwelder aanwezig. Gezien de waterkerende capaciteit van kwelders en de potentiële waterkerende maatregelen die genomen kunnen worden op de kwelder is het erg interessant te evalueren waar en op welke wijze kwelders ingezet kunnen worden om de waterveiligheid te vergroten, maar ook welk beheer en onderhoud hierbij hoort. Doel van deze studie is dan ook het in beeld brengen van de meerwaarde van een dergelijke samenwerking om uiteindelijk zelfs een gezamenlijke visie door de betrokken partijen te laten ondertekenen.

Reeds afgerond is verder een in het kader van de POV Voorlanden uitgevoerde studie naar het beleidsmatige gebruik van voorlanden (POV Voorlanden, 2019).

Bronnen

- Arcadis, Deltares, HKV. (2017a). *POV Waddenzeedijken - Effectiviteit voorlanden HR; Resultaten inventariserend onderzoek (Fase B), definitieve versie d.d. 31 maart 2017.*
- Arcadis, Deltares, HKV. (2017b). *POV Waddenzeedijken - Effectiviteit voorlanden HR; Plan van Aanpak voor nader onderzoek (Fase C), definitieve versie d.d. 16 augustus 2017.*
- Arcadis, Deltares, HKV. (2018). *POV Waddenzeedijken - Effectiviteit voorlanden HR; Resultaten nader onderzoek (Fase C). Eindrapportage d.d. 26 maart 2018.*
- Arcadis, Deltares, HKV. (2019). *POV Waddenzeedijken - Effectiviteit voorlanden HR; Plan van Aanpak voor afsluitende rapportage (Fase E), definitieve versie d.d. 9 april 2019.*
- Arcadis, Deltares, HKV, KNMI, RHDHV, VVC, Witteveen en Bos. (2019). *POV Waddenzeedijken, Risicoanalyse HR, Fase B - Eindrapportage Fase B d.d. 8 februari 2019.*
- Arcadis, Deltares, HKV, KNMI, VVC, Witteveen en Bos. (2019). *POV Waddenzeedijken; Onderzoek Risicoanalyse HR; Werkplan Fase C; Definitieve versie d.d. 12 februari 2019.*
- Arcadis/AquaVision/Infram/VdMC/VVC. (2018). *Plan van Aanpak uitvoering Meerjarige Veldmetingen Eems-Dollard; Vigerende versie - 80's versie t.b.v. overleg #8 (25 mei) d.d. 22 mei 2018.*
- Cahoon, D.R. (2006). *A Review of Major Storm Impacts on Coastal Wetland Elevations. Estuaries and Coasts, 29, 889–898.*
- EurOtop. (2007). *Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual.*
- Gittman, R.K., Popowich, A.M., Bruno, J.F., Peterson, C.H. (2014). *Marshes with and without sills protect estuarine shorelines from erosion better than bulkheads during a Category 1 hurricane. Ocean and Coastal Management, 102, 94–102.*
- Groeneweg, J. & Van Os, J. . (2009). *Bodem voor productiesommen HR Waddenzee. Deltares memo 26 november 2009. .*
- HKV. (2018). *Effect van buitendijkse zomerkkaders op Hydraulische Randvoorwaarden. Memorandum PR3365.31 d.d. 20 juni 2018.*
- HKV, Svasek. (2011). *Productieberekeningen Waddenzee voor WTI-2011: rapportage fase 1, mei 2011.*
- Howes, N.C., FitzGerald, D.M., Hughes, Z.J., Georgiou, I.Y., Kulp, M.A., Miner, M.D., Smith, J.M., Barras, J.A. (2010). *Hurricane-induced failure of low salinity wetlands. In Proceedings of the National Academy of Sciences (Vol. 107, pp. 14014–14019).*
- Kearney, M.S., Riter, J.C.A., Turner, R.E. (2011). *Freshwater river diversions for marsh restoration in Louisiana: Twenty-six years of changing vegetative cover and marsh area. Geophysical Research Letters, 38, 1–6.*
- Leonardi, N., Fagherazzi, S. (2015). *Effect of local variability in erosional resistance on large-scale morphodynamic response of salt marshes to wind waves and extreme events. Geophysical Research Letters, 42, 5872–5879.*
- Leonardi, N., Ganju, N.K., Fagherazzi, S. (2016). *A linear relationship between wave power and erosion determines salt-marsh resilience to violent storms and hurricanes. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113, 64–68.*
- Madsen, O., Poon, Y.-K., & Graber, H. (1988). *Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. 21th Conference on Coastal Engineering, (pp. 492-54).*
- Morton, R.A., Barras, J.A. (2011). *Hurricane Impacts on Coastal Wetlands: A Half-Century Record of Storm-Generated Features from Southern Louisiana. Journal of Coastal Research, 275, 27–43.*
- Peteet, D.M., Nichols, J., Kenna, T., Chang, C., Browne, J., Reza, M., Kovari, S., Liberman, L., Stern-Protz, S. (2018). *Sediment starvation destroys New York City marshes' resistance to sea level rise. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115.*
- POV Voorlanden. (2019). *Voorland. Eindrapportage POV Voorlanden, april 2019.*
- POV Waddenzeedijken. (2015). *Plan van aanpak fase 2 / Onderzoeksplannen oktober 2015.*
- POV Waddenzeedijken. (2019). *POV Waddenzeedijken - Dijk met Voorland. Interimrapportage Fase B.*

- Spencer, T., Möller, I., Rupprecht, F., Bouma, T.J., van Wesenbeeck, B.K., Kudella, M., Paul, M., Jensen, K., Wolters, G., Miranda-Lange, M., Schimmels, S. (2016). *Salt marsh surface survives true-to-scale simulated storm surges. Earth Surface Processes a.*
- Turner, R.E., Baustian, J.J., Swenson, E.M., Spicer, J.S. (2006). *Wetland sedimentation from hurricanes Katrina and Rita, Science, 314, 449-452.*
- Van der Reijden, I.M.H. (2019). *Effectiviteit van vegetatie op voorlanden. Een studie naar de golfdempende werking van het voorland 'Noorderleech'. Stagerapport TU Delft en Wetterskip Fryslan, april 2019.*
- Vuik, V. (2019). *Building Safety with Nature. Salt Marshes for Flood Risk Reduction. Proefschrift Technische Universteit Delft.*
- Vuik, V., Borsje, B.W., Willemsen, P.W.J.M., Jonkman, S.N. (2019). *Salt marshes for flood risk reduction: Quantifying long-term effectiveness and life-cycle costs. Ocean and Coastal Management, 171, 96-110.*
- Vuik, V., Heo, H. Y. S., Zhu, Z., Borsje, B. W., & Jonkman, S. N. . (2018). *Stem breakage of salt marsh vegetation under wave forcing: A field and model study. Estuarine, coastal and shelf science, 200, 41-58.*
- Wamsley, T. V., Cialone, M. A., Smith, J. M., Atkinson, J. H., & Rosati, J. D. (2010). *The potential of wetlands in reducing storm surge. Ocean Engineering, 37(1), 59-68.*
- Waterschap Noorderzijlvest. (2018a). *Beschrijvend document Europese aanbesteding Meerjarige veldmetingen Eems-Dollard. Versie: 3.0 d.d. 11 januari 2018.*
- Wetterskip Fryslan. (2017). *Effectiviteit voorlanden HR - Plan van Aanpak nader onderzoek (Fase C), inclusief rapportage Fase B. Versie 1.2 ten behoeve van stuurgroep 9 oktober 2017.*