

# Bijdrage van kweldervegetatie aan het waterkeringssysteem

Huidige kennis en bijdrage van geplande Deltagootproeven



# **Bijdrage van kweldervegetatie aan het waterkeringsysteem**

## Huidige kennis en bijdrage van geplande Deltagootproeven

### **Auteur(s)**

Pim Willemsen (Universiteit Twente & Deltares)

Mark Klein Breteler (Deltares)

Madelief Doeleman (Deltares)

Bas Borsje (Universiteit Twente)

Bas van Maren (Deltares)

### **Partners**

Universiteit Twente

Technische Universiteit Delft

NIOZ Yerseke

## Bijdrage van kweldervegetatie aan het waterkeringssysteem

Huidige kennis en bijdrage van geplande Deltagootproeven

<b>Opdrachtgever</b>	Wetterskip Fryslân
<b>Contactpersoon</b>	Nelleke Zuideveld
<b>Referenties</b>	HWBP-KIA project
<b>Trefwoorden</b>	Golfbelasting, golfdemping, erosie, vegetatieschade

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	2.0
<b>Datum</b>	26-05-2023
<b>Projectnummer</b>	11205132-002
<b>Document ID</b>	11205132-002-HYE-0010
<b>Pagina's</b>	94
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Pim Willemsen	
	Mark Klein Breteler	
	Madelief Doeleman	
	Bas Borsje	
	Bas van Maren	

# Samenvatting

Deze rapportage betreft de eerste fase van een onderzoek naar de invloed van kweldervegetatie op de golfbelasting op dijken en de erosie van het voorland. Het is gericht op het kwantificeren van de invloed van de op kwelders aanwezige vegetatie (schorren genaamd in Zeeland) op de golfbelasting en de invloed op de erosie bij de teen van de dijk, de aan de zeezijde gelegen klif en het voorlandoppervlak. Dit onderzoek wordt uitgevoerd in opdracht van het Wetterskip Fryslân, met financiering van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), om specifieke kennisleemtes in te vullen die thans het verdisconteren van de invloed van de kweldervegetatie op het waterkeringssysteem in de weg staan.

Dit onderzoek omvat de volgende onderwerpen:

- golfhoogtereductie en verandering van het spectrum (golfperiode) bij beschadigde vegetatie
- schade aan verschillende soorten vegetatie als functie van de golfcondities
- golfbelasting op de dijk, nadat de golfhoogte gereduceerd is door de kwelder en de vegetatie: golfdrukken op de dijk en golfoploop/golfoverslag
- erosie van de kwelder bij de aansluiting op de dijk (erosie bij de teen)
- erosie van het kwelderoppervlak en klif aan de zeezijde door brekende golven

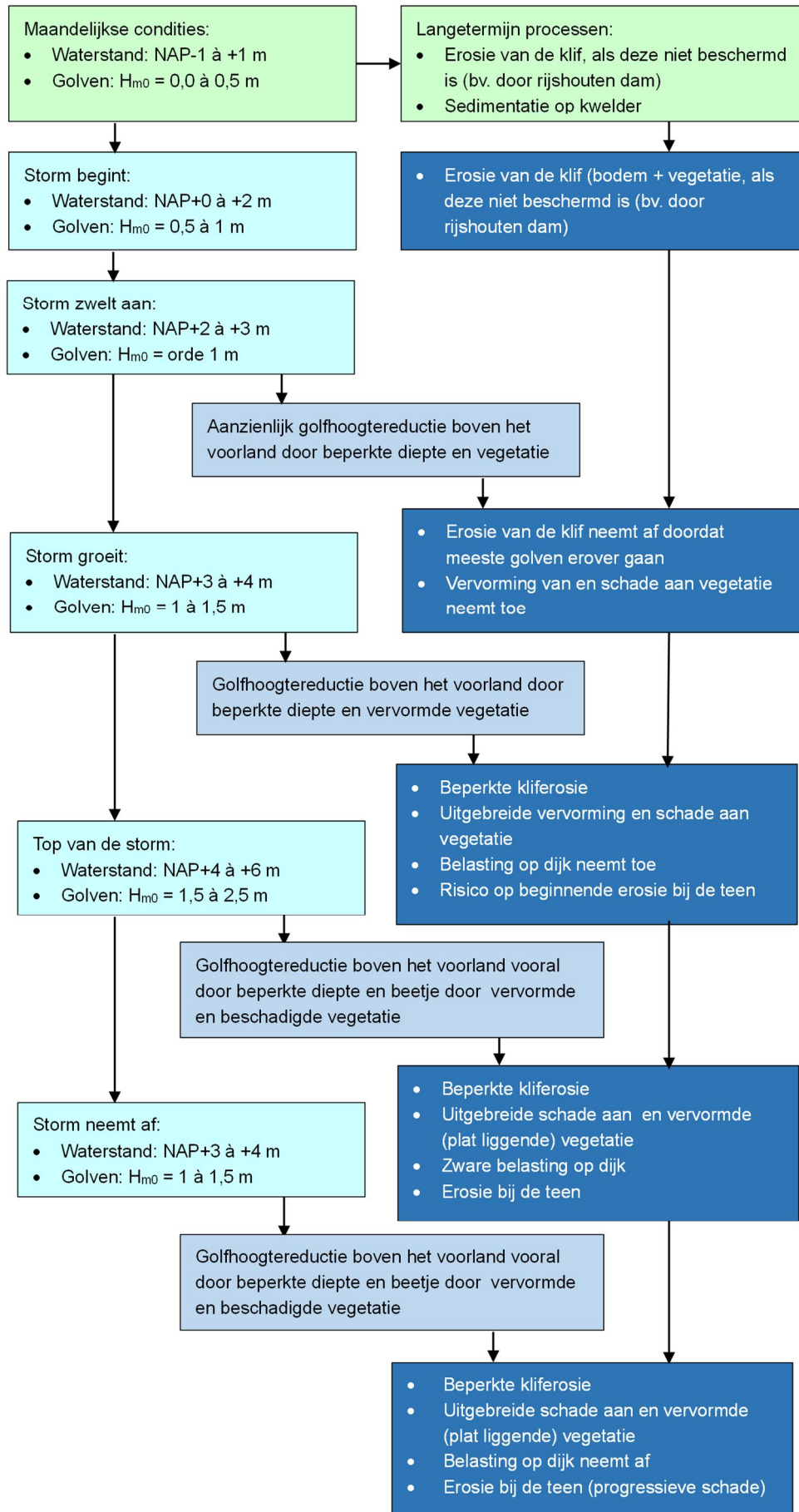
Hoe de golfbelasting zich ontwikkelt tijdens een storm (groei, top en afname van de storm), hoe vervolgens het voorland voor golfhoogtereductie zorgt en hoe deze interactie resulteert in (tijdelijke) systeemveranderingen en (progressieve) schade wordt gepresenteerd in de grafische samenvatting hieronder (Figuur 0.1).

Er is al veel kennis beschikbaar over deze onderwerpen, inclusief rekenmodellen. De belangrijkste tekortkoming is een verificatie bij grote golfaanval met golven in de range van 1 tot 2 m en een aanzienlijke waterdiepte boven het voorland, zodat deze kennis met vertrouwen kan worden toegepast bij dijkversterkingsprojecten. Veel van deze kennis is verzameld in het kader van het NWO-project 'Living Dikes', waarmee intensief wordt samengewerkt. Living Dikes heeft een bredere scope, zoals ook de langetermijneffecten van de vegetatie op de kwelderontwikkeling. In het huidige onderzoek wordt alleen gekeken naar kortdurende zware golfbelasting tijdens extreme stormen met duur van enkele dagen.

Het onderzoek bestaat uit drie fases:

- Fase 1: beschrijven van de huidige stand van zaken ten aanzien van bovenstaande aspecten en detaillering van de bijdrage van grootschalige proeven in de Deltagoot met kweldervegetatie aan dit onderzoek
- Fase 2: Deltagootproeven met kweldervegetatie
- Fase 3: rapportage, handreiking voor het verdisconteren van kweldervegetatie bij het ontwerp van een dijkrenovatie en aanbevelingen voor het rekenen met de vegetatiemodule van Swan

Zodra de bijdrage van de kweldervegetatie aan de waterveiligheid van de waterkering overtuigend is gekwantificeerd en waterschappen deze bijdrage verdisconteren in het ontwerp van de dijken, zal er meer inspanning gestoken gaan worden in het beheer en onderhoud van de begroeide kwelders en het uitbreiden ervan. Zo draagt dit onderzoek ook bij aan de ecologie van de Waddenzee en Zuidwestelijke Delta.



*Figuur 0.1. grafische samenvatting voor golfbelasting, golfreductie, en systeemveranderingen tijdens een extreme storm. Een voorbeeld voor de Waddenzee. De groene blokken vallen buiten het kader van dit onderzoek en de blauwe blokken zitten in dit onderzoek. Lichtblauw geeft de forcering aan, midden-blauw laat de verwachte verandering in golfhoogtereductie zien en donkerblauw geeft veranderingen van het systeem weer.*

In deze rapportage is een samenvatting gegeven van de beschikbare kennis over bovenstaande onderwerpen, waaruit blijkt dat het ontbreekt aan een goede verificatie bij een golfbelasting in de range van 1 à 2,5 m golfhoogte die tijdens stormen op kan treden. Daarom is een grootschalig verificatie-onderzoek beschreven in hoofdstuk 8 met hoge golven. Het betreft proeven in de Deltagoot van Deltares met kweldervegetatie die inclusief ondergrond gestoken wordt van kwelders. Door ook de ondergrond uit de kwelders te halen komt ook het gehele wortelstelsel van de planten mee en kan zo ook de erosie met natuurgetrouw materiaal onderzocht worden. Bij voorkeur wordt het van de kwelders van Friesland gehaald, omdat het Wetterskip Fryslân trekker is van dit onderzoek.

Geconcludeerd wordt dat met de verificatieproeven in de Deltagoot er voldoende informatie komt om een voldoende betrouwbare rekenmethode te verkrijgen voor de schade aan de vegetatie en de invloed van de vegetatie op de golfcondities. Dit laatste wordt in de vorm van een handreiking voor de keuze van de invoerparameters voor Swan met vegetatiemodule gegeven en in de vorm van eenvoudige formules die in combinatie met Hydra-NL kunnen worden gebruikt voor een eerste afschatting. Verder wordt er relevante data verkregen over de erosie bij de teen van de dijk, de klif en het kwelderoppervlak tijdens een kortdurende belasting met grote golven.

Hiermee kan de invloed van vegetatie met vertrouwen verdisconteerd worden bij het ontwerpen en beoordelen van dijken.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>9</b>
1.1	Begroeide kwelders als onderdeel van het waterkeringssysteem	9
1.2	Huidige onderzoek	9
1.3	Relatie met NWO-project 'Living Dikes'	11
1.4	Expertmeetings	13
1.5	Leeswijzer	15
<b>2</b>	<b>Kwelders (en schorren) in Nederland</b>	<b>16</b>
2.1	Potentiële bijdrage van kwelders aan ecosysteemdiensten	16
2.2	Kwelder dynamiek	16
2.3	Geometrie	17
2.4	Grondsoort	19
2.5	Vegetatie	19
2.6	Kunstmatige kwelder	21
<b>3</b>	<b>Beschrijving van de vegetatie op kwelders</b>	<b>24</b>
3.1	Algemeen	24
3.1.1	Soortensamenstelling	24
3.1.2	Seizoenale verandering van vegetatie	25
3.2	Situatie voor de dijk Koehool-Lauwersmeer	27
<b>4</b>	<b>Schade aan vegetatie door hoge golven</b>	<b>30</b>
4.1	Huidige stand van de kennis	30
4.1.1	Variabele vegetatiesterkte	31
4.1.2	Schade aan vegetatie door hoge golven	34
4.1.3	Veranderlijk gedrag van vegetatie onder hoge golven	38
4.2	Voorbeeldberekening schade aan vegetatie door afbreken	39
4.3	Toepassing	40
<b>5</b>	<b>Invloed van vegetatie op golfcondities</b>	<b>42</b>
5.1	Huidige stand van de kennis	42
5.2	Voorbeeldberekening met SWAN	45
5.3	Gecombineerde golfbreking en vegetatie modellering	48
5.4	Kalibratie van de vegetatiemodule van Swan	48
<b>6</b>	<b>Belasting op de dijk</b>	<b>50</b>
6.1	Golfoploop en golfoverslag (kruinhoogte)	50

6.1.1	De golf(oploop)hoogteverdeling bij een ondiep voorland	50
6.1.2	Golfperiode en infra-gravity waves	52
6.1.3	Invloedsfactor ondiep water golfoverslag	52
6.1.4	Invloed van vegetatie	53
6.2	Golfdruk (stabiliteit steenzetting)	54
6.3	Erosie van de Groene Dijk	56
<b>7</b>	<b>Erosie bij de teen van de dijk en de klif</b>	<b>58</b>
7.1	Erosie bij de teen	58
7.2	Erosie bij de klif	61
<b>8</b>	<b>Deltagootproeven</b>	<b>64</b>
8.1	Dijk Koehool-Lauwersmeer	64
8.2	Bijdrage van Deltagootproeven aan het invullen van de kennisleemtes	66
8.3	Modelopstelling en proevenprogramma	68
8.3.1	Kweldervegetatie in de Deltagoot	68
8.3.2	Modelopstelling	70
8.3.3	Proevenprogramma	74
8.4	Locatiekeuze voor het steken van kweldervegetatie met ondergrond	76
8.5	Rapportage	78
<b>9</b>	<b>Conclusies</b>	<b>80</b>
	<b>Referenties</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>Adviesteam dijkontwerp</b>	<b>88</b>
A.1	Vraag 1	89
A.2	Vraag 2	89
A.3	Vraag 3	89
A.4	Vraag 4	89
A.5	Vraag 5	89
A.6	Vraag 6	90
A.7	Vraag 7	90
A.8	Vraag 8	90
A.9	Vraag 9	91
A.10	Vraag 10	91
<b>B</b>	<b>Golfdruk in de bodem</b>	<b>92</b>



# 1 Inleiding

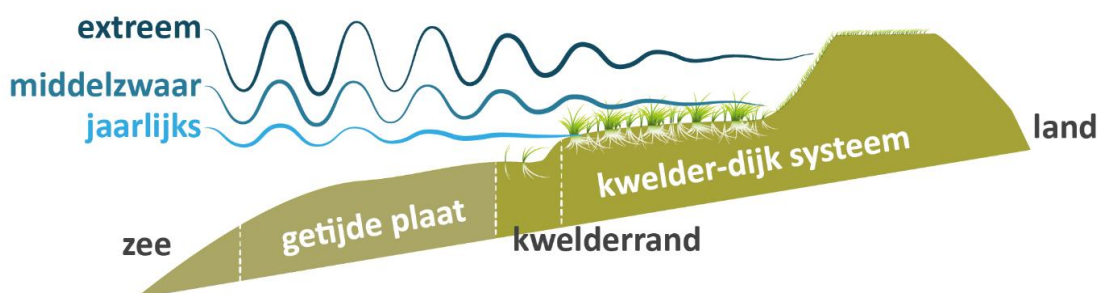
## 1.1 Begroeide kwelders als onderdeel van het waterkeringsstelsysteem

Begroeide kwelders komen op veel plaatsen voor langs de dijken van de Waddenzee en in Zeeland, waar begroeide voorlanden schorren worden genoemd (zie Figuur 1.1). Deze natuurlijke systemen hebben een hoge ecologische waarde.

Gezien specifieke ecologische knelpunten in het waddengebied heeft de MER-commissie ten aanzien van de dijkversterking Koehool-Lauwersmeer aanbevolen om te werken aan begroeide kwelders. Een begroeid voorland draagt niet alleen bij aan de ecologische en recreatieve waarde van het gebied, maar kan ook bijdragen aan het waterkeringsstelsysteem en is zeer effectief in het opslaan van CO<sub>2</sub>. Doordat kwelders sediment invangen tijdens hoogwater zullen ze meegroeien met de zeespiegelstijging en daardoor in lengte van jaren een bepaalde golfdemping geven, waardoor de erachter gelegen zeedijk minder zwaar wordt aangevallen door (extreme) golven. Daardoor kan er mogelijk bespaard worden op de geplande dijkversterkingen.

Daarnaast maakt dit het mogelijk om ook de zeedijk een natuurvriendelijk uiterlijk te geven met minder harde bekleding en een groter deel met een kleibekleding met gras. Zo wordt het hele waterveiligheidssysteem, bestaande uit de zeedijk en de voorliggende kwelder, landschapelijke mooier, rijker qua natuur en toekomstbestendiger.

Helaas is de kennis omtrent de invloed van de vegetatie op de belasting op de dijk en de erosie van het voorland nog onvoldoende ontwikkeld om de invloed ervan mee te nemen in het ontwerpen en beoordelen van dijken.



Figuur 1.1 Schematische weergave van een kwelder voor een dijk

Er is in het verleden al veel onderzoek gedaan naar de invloed van begroeide kwelders op de golfbelasting op dijken en dat onderzoek gaat nog steeds voort in bijvoorbeeld het NWO-onderzoeksprogramma 'Living Dikes'. In dat onderzoek is ook aandacht voor andere aspecten dan die onderzocht kunnen worden in de Deltagoot, zoals de ontwikkeling van de kwelder als stabiel ecosysteem (zie vraag 3 van Robert/Myron in par. 1.4).

## 1.2 Huidige onderzoek

Flankerend aan het NWO-onderzoek 'Living Dikes' is er een onderzoek gestart in opdracht van het Wetterskip Fryslân, met financiering van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), om specifieke kennisleemtes in te vullen die thans het verdisconteren van de invloed van de kweldervegetatie op het waterkeringsstelsysteem in de weg staan. Dit 'HWBP-KIA'-onderzoek omvat de volgende onderwerpen:

- golfhoogtereductie en verandering van het spectrum (golfperiode) bij beschadigde vegetatie
- schade aan verschillende soorten vegetatie als functie van de golfcondities
- golfbelasting op de dijk, nadat de golfhoogte gereduceerd is door de kwelder en de vegetatie: golfdrukken op de dijk en golfoploop/golfoverslag
- erosie van de kwelder bij de aansluiting op de dijk (erosie bij de teen)
- erosie van het kwelderoppervlak en klif aan de zeezijde door brekende golven

Het onderzoek focust dus op de invloed van de vegetatie op de golfcondities (belasting op de dijk) en de erosie tijdens extreme omstandigheden. Dit betreft een vrij kortdurende zware golfbelasting (enkele dagen). De lange-termijn ontwikkelingen van een kwelder (jaren) wordt in het NWO-project 'Living Dikes' beschouwd en komt in het onderhavige onderzoek niet aan bod. De relatie met 'Living dikes' staat beschreven in par. 1.3.

Er is al veel kennis beschikbaar over deze onderwerpen, inclusief rekenmodellen. De belangrijkste tekortkoming is een verificatie bij grote golfaanval met golven in de range van 1 tot 2 m, zodat deze kennis met vertrouwen kan worden toegepast bij dijkversterkingsprojecten.

Dit 'HWBP-KIA'-onderzoek bestaat uit drie fases:

- Fase 1: beschrijven van de huidige stand van zaken ten aanzien van bovenstaande aspecten en detaillering van de bijdrage van grootschalige proeven in de Deltagoot met kweldervegetatie aan dit onderzoek (huidige rapport)
- Fase 2: Deltagootproeven met kweldervegetatie (zie hoofdstuk 8)
- Fase 3: rapportage, handreiking voor het verdisconteren van kweldervegetatie bij het ontwerp van een dijkrenovatie en aanbevelingen voor het rekenen met de vegetatiemodule van Swan

Dit 'HWBP KIA'-onderzoek sluit mooi aan op de constatering van de MER-commissie over de ecologische knelpunten van de Waddenzee. Door meer kweldervegetatie te realiseren op de vooroevers, kan hieraan een positieve bijdrage worden geleverd. Als de bijdrage van de kweldervegetatie aan de waterveiligheid van de waterkering overtuigend is gekwantificeerd en waterschappen deze bijdrage kunnen verdisconteren in het ontwerp van de dijken, zal er meer inspanning gestoken gaan worden in het beheer en onderhoud van de begroeide kwelders en het uitbreiden ervan. Dit sluit aan op opmerking 1 van Jos van Zuylen uit de expertmeeting (zie par. 1.4).

De huidige rapportage betreft fase 1 van het 'HWBP KIA'-project. Het is opgesteld door Pim Willemsen (Post-doc onderzoeker aan de Universiteit Twente), Mark Klein Breteler (Deltares), Madelief Doeleman (Deltares), Bas Borsje (Universiteit Twente) en Bas van Maren (Deltares). De schrijvers zijn bijgestaan door het volgende expertteam:

- Vincent Vuik (HKV)
- Robert Vos (Rijkswaterstaat WVL)
- Roy Mom (Infram-Hydren)
- Jos van Zuylen (Sweco)
- Diederik Bijvoet (HWBP)

Daarnaast heeft er kennisdeling (zowel praktisch als inhoudelijk) plaatsgevonden met Maïke Paul, betrokkene bij een gootproef met kwelders in het Großen Wellenkanal aan de Leibniz Universität Hannover.

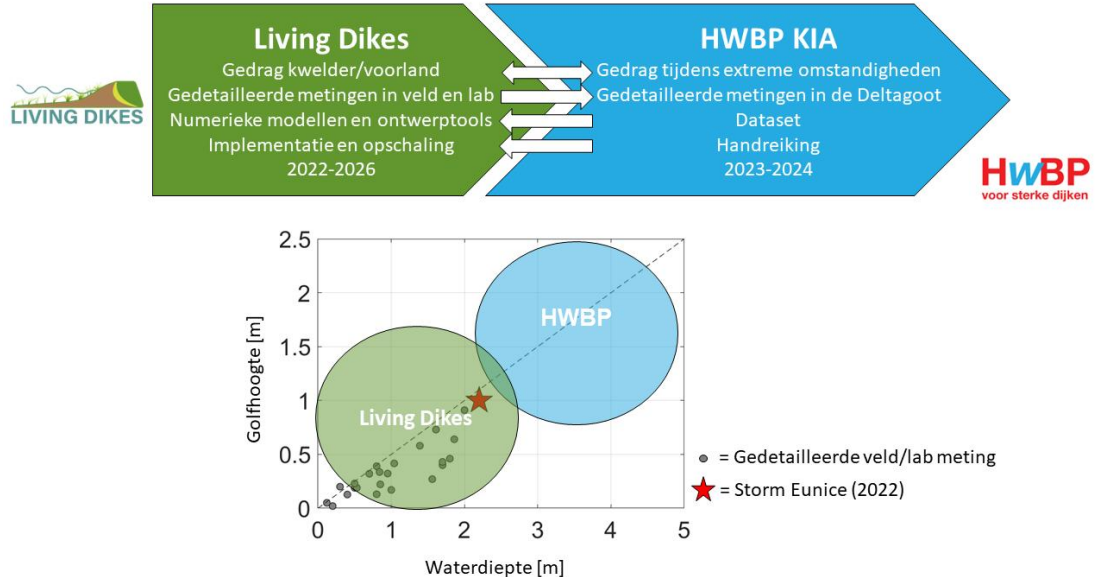
Vanuit het Wetterskip Fryslân zijn de werkzaamheden begeleid door Nelleke Zuideveld, Ineke van der Reijden en Paul Buring.

De breedte van dit project, met diverse disciplines, maakt dat er aan dit rapport diverse schrijvers hebben meegewerkt. Daardoor is de stijl van het ene hoofdstuk wat anders dan het

andere. Hiermee is praktisch omgegaan, gericht op het vastleggen van de informatie, zonder al te veel werk te besteden aan een uniforme schrijfstijl.

### 1.3 Relatie met NWO-project ‘Living Dikes’

Dit huidige onderzoek en het ‘NWO Living Dikes’-onderzoek zijn individueel onderscheidend en daarnaast complementair aan elkaar, waardoor gezamenlijk meerwaarde wordt gecreëerd, zie Figuur 1.2.



Figuur 1.2. Onderscheidende en complementaire (groen) elementen in het ‘NWO Living Dikes’-onderzoek en het ‘HWBP KIA’-onderzoek (blauw). Witte pijlen in het bovenste deel geven input van het ene onderzoek naar het andere. De onderste figuur laat zien welke fysische parameter ruimte wordt bekeken in beide onderzoeken.

In het ‘HWBP KIA’-onderzoek wordt met name gefocust op grote schaal (ware grootte met grote golven) onder extreme omstandigheden/ontwerpcondities. Het ‘NWO Living Dikes’-onderzoek focust met name op mechanistisch begrip van het gedrag en de ontwikkeling van kwelder/voorland op de lange termijn (50 jaar) van zowel een natuurlijke kwelder als ook van een ‘man-made’ kwelder. Hierbij wordt gelet op de ontwikkeling van de ondergrond en de vegetatie en wordt er aandacht geschonken aan vegetatie en kwelderzonering in relatie tot zeespiegelstijging, CO<sub>2</sub> opslag en droogte.

Daarnaast is in het Living Dikes onderzoek een schaalmodel opstelling van de Deltagoot nagebouwd in de golfgoot van de TU-Delft (schaal 1:10). Met dit schaalmodel kunnen we eerste inzichten krijgen naar de werking van een begroeid voorland op golfreductie, golfoverloop en verandering van het golfspectrum. Daarnaast kan dit schaalmodel gebruikt worden om aanbevelingen te doen naar interessante locaties om de meetinstrumenten te plaatsen in de Deltagoot. Tot slot kan het schaalmodel gebruikt worden om de resultaten van het Deltagoot experiment te generaliseren.

Tevens wordt er in het Living Dikes programma aandacht besteed hoe de kennis uit het Deltagoot experiment (1 storm, 2 type ondergronden en voornamelijk 1 type vegetatie) ook toegepast kan worden voor andere waterschappen in de Waddenzee en in de Zuidwestelijke Delta. Er is een lijst met detail vragen opgehaald bij de experts, waarvan de samenvatting in onderstaande tabel is opgenomen (Tabel 1.1). Deze samenvatting dient als startpunt voor de gezamenlijke halfjaarlijkse gebruikersgroep vergaderingen. De organisatie van deze gebruikersgroep vergaderingen zal verzorgd worden door een vertegenwoordiger van Wetterskip Fryslân, een vertegenwoordiger van het Living Dikes consortium en een

vertegenwoordiger van het HWBP. Op deze manier wordt er maximale synergie bereikt. De genodigden voor deze gebruikersgroep vergaderingen zijn de experts betrokken in fase 1, vertegenwoordigers van de 4 noordelijke waterschappen en Scheldestromen en mogelijke andere experts. Tijdens deze gebruikersgroep vergaderingen zal zowel de voortgang van de onderzoekers besproken worden, de open vragen van de experts worden gepresenteerd en de nieuwe inzichten die vanuit andere Kennis en Innovatieprojecten relevant voor dit onderzoek gedeeld worden.

Tabel 1.1 Detailvragen van experts die binnen de werkpakketten in Living Dikes behandeld worden.

Werkpakket Living Dikes	Onderzoeksvraag vanuit Deltagoot experiment
WP2 Laboratorium experimenten	<p>Hoe stabiel is de bodem van een bepaalde kwelder, zowel ver weg van de dijk als aan de dijkteen, waar de dijkbekleding onder het kwelderoppervlak duikt?</p> <p>Hoe verandert het golfspectrum van offshore naar de dijkteen voor verschillende golfcondities?</p> <p>Welke veranderingen in golfoploop, golfoverslag en golfklappen treden op, en hoe zijn die te relateren aan het gewijzigde golfspectrum?</p> <p>Kunnen de resultaten van de TUDelft golfgoot experimenten (schaalmodel, schaal 1:10) naast het deltagoot experiment (schaal 1:1) gebruikt worden om de BOI-modellen onder veel meer condities te jken?</p>
WP3 Veld experimenten	<p>Onder welke randvoorwaarden (kritische factoren) kan een kwelder de eerste fase van ontwikkeling van enige jaren overleven en vervolgens uitgroeien tot een stabiele kwelder?</p> <p>Waar ligt de stabiliteitsgrens (gemiddelde, standaardafwijking) voor diverse typen kweldervegetatie?</p>
WP4 Model en tool ontwikkeling	<p>Hoe kunnen we de lange termijn ontwikkeling (50 jaar) van een kwelder modelleren waar zowel de vestiging van vegetatie ('windows of opportunity') als de gestage erosie van de kwelder onderzocht wordt?</p> <p>Hoe om te gaan met de onzekerheden in alle verschillende modellen en tools die gebruikt worden voor dijkbeoordeling en dijkversterking?</p>
Postdoc 2024-2026 (nog te werven) doorvertaling richting BOI	<p>Hoe goed werkt een combinatie van voorlandmodule en EurOtop formules voor het kwantificeren van de effecten van kwelders?</p> <p>Is een combinatie van SWAN en EurOtop formules geschikt?</p> <p>Welke formuleringen in SWAN kunnen het best gebruikt worden voor het beschrijven van de golfvoortplanting over kwelders? Triads: DCTA/LTA, Vegetatie: Suzuki/Jacobsen/Madsen, Breking: Battjes-Janssen/BKG/vd Westhuijsen, etc.</p> <p>Welke modelonzekerheden zijn van toepassing (golfhoogte, golfperiode) voor dijktrajecten met kwelders ervoor?</p> <p>Kunnen we een multi-parameter vegetatiemodel en erosiemodel ontwikkelen voor kwelders tbv beoordelen en dijkontwerpen voor BOI?</p> <p>Kunnen we enkele vuistregels afleiden om in te kunnen schatten of aanvullende berekeningen wenselijk zijn. Dit kunnen eenvoudige vragen zijn als</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Heb je een voorland van x m?</li> <li>- Ligt dit onder/rond/boven dagelijks waterstand?</li> <li>- Is vegetatie van type x (bij voorkeur in groepen met een plaatje als voorbeeld) te verwachten?</li> </ul> <p>Als 2e stap zou het fijn zijn om dan ook met hydra een 'eerste' schatting te kunnen maken.</p>

## 1.4 Expertmeetings

Tijdens de eerste fase van het project zijn er drie expertmeetings georganiseerd met de projectgroep en het expertteam. Deze meetings zijn georganiseerd volgens de BOB-systematiek: beeldvorming, oordeelsvorming, besluitvorming. De voorzitter van deze vergaderingen was Nelleke Zuideveld van het Wetterskip Fryslân.

Tijdens de eerste meeting is de nadruk gelegd op het ophalen van de suggesties en commentaarpunten van het expertteam. Dit heeft de volgende opmerkingen opgeleverd (met verwijzing waar het antwoord op deze vraag in het rapport is te vinden). Vervolgens zijn hieraan ook de vervolgvragen uit de tweede expertmeeting toegevoegd:

### Jos van Zuylen:

1. Het is nogal technisch ingestoken. Wat zijn de kansen op ecologie/ natuur/ laag hangend fruit? (zie par. 1.2)
2. Aan de businesscase kan nog toegevoegd worden dat de bijdrage van de vegetatie ook zorgt voor het verminderen van het onderhoud aan de Groene Dijk, omdat er tijdens storm minder erosie zal optreden. (zie par. 6.3 en 8.1)
3. Hoe houden we de vegetatie heel bij het steken van de blokken? (zie par. 8.3.1)
4. Het is voor mij niet concreet wat het ideale eindresultaat is. Hoe gaan we dit weer terug laten vloeien in de versterkingsprojecten en zorgen dat het breder in het land toepasbaar is? (zie par. 8.5)
5. Bedenk dat de waterkering minder robuust is als de invloed van de vegetatie wordt meegenomen. In de huidige situatie wordt het ontwerp gebaseerd op iets zwaardere golfcondities dan die waarschijnlijk in de praktijk zullen optreden. Dat levert iets meer robuustheid, dat ook invloed heeft op het onderhoud van de waterkering. (zie par. 8.1)
6. De afhankelijkheid van vegetatie is een risico dat slecht te beheersen is, zeker als het in N2000 ligt omdat je geen beheer kan uitvoeren. (zie par. 8.1)
7. Er zou een invloed kunnen zijn van de belastingduur op de schade. (zie par. 8.3.3)

### Roy Mom:

1. Zorg dat je de juiste dingen meet om Swan-vegetatiemodule te verbeteren. (zie par. 4.3 en 5.4)
2. Wat is de aanvangssituatie per proef en wat is de proefduur? (zie par. 8.3.3)
3. De kwelderrand wordt beschermd, zodat erosie van de kwelderrand de proef niet beïnvloed. Een onbeschermd kwelderrand kan een realistische situatie zijn, en is van belang voor kennis van kweldererosie op lange-termijn (tientallen jaren). Er moet duidelijk worden voor welke proeven de kwelderrand wel/niet beschermd wordt. (zie par. 8.3.3)
4. Ik mis de link naar de SWAN vegetatie-module. Voor welke invoerparameters van de SWAN vegetatiemodule is verificatie nodig en hoe ga je die verificatie uitvoeren? Een overzicht van wat je t.b.v. deze verificatie bij de proeven in de Deltagoot gaat meten en hoe lijkt me daarom wenselijk (zie par. 4.3, 5.3 en 5.4).

### Robert Vos / Myron van Damme:

Proef is van groot maatschappelijk belang.

1. De golven worden flink gereduceerd door een voorland, maar primair door het niveau van de bodem en slechts secundair door de vegetatie. (zie par. 5.1 en 5.2)
2. Proef op stevige klei, maar building with nature op aanvankelijk slappe klei / los materiaal. Hoe vergelijk je dat? (zie par. 2.6 en 8.3.1)
3. Hoe ontwikkeld de kwelder zich als stabiel ecosysteem? (zie par. 1.1 en 8.3.1)

4. De bodem in de proef is anders dan in werkelijkheid, gaat dit goed met de drukverdeling in de ondergrond en zou dit de erosie kunnen beïnvloeden. In werkelijkheid zou er liquifaction kunnen optreden. Is de Deltagoot representatief voor de werkelijkheid? (zie par. 8.3.2)
5. Het is in het plan nog niet duidelijk hoe je de invloed van de vegetatie meet. (zie par. 8.3.3 en 5.4)
6. Het is nog niet duidelijk hoe de resultaten in BOI moeten gaan landen. (zie par. 8.5)
7. Wat is een representatieve 0-situatie? Is dat de situatie zonder vegetatie en ongeconsolideerd slib? Of geconsolideerde bodem (zoals gebruikelijk onder vegetatie) maar dan zonder vegetatie (ook geen stoppels)? Of resultaat van berekeningen met voorlandmodule?(zie par. 8.3.3)

Diederik Bijvoet:

1. De interactie van de golven met de bodem in de goot zou anders kunnen zijn dan in werkelijkheid (opmerking Myron); hoe representatief is het onderzoek dan? (zie par. 4.1 en 8.3.2)
2. Mate van consolidatie van de klei (toename dichtheid)? (zie par. 8.3.1)
3. Tijdens storm is er veel drijvende vegetatie (en wellicht ook slib in het water), die golfhoogte sterk beperkt. Wordt dat meegenomen? (zie par. 8.3.3)
4. Grastrekproef toevoegen ter vergelijking andere vegetatie (gras)? (zie par. 8.3.2)
5. Effect transport op gestoken kwelderbakken? (zie par. 8.3.1)
6. Wat is de invloed van de type vegetatie? Kennisprogramma Zeespiegelstijging in relatie tot Swan vegetatie-module: effect Spartina in Westerschelde 10% en Zeekweek langs Wadden gering. Windgroei op kwelder doet effect vegetatie teniet. (zie par. 5.1 en 5.2)
7. Effect windgroei (fysische conditie) ontbreekt in Deltagoot. Valt dit toe te voegen? (zie par. 5.2)
8. Meten we wat nodig is/past in de bestaande modellen (als Hydra.NL)? (zie par. 4.3)
9. Waar landt de uitkomst van de proeven voor Wetterskip Fryslân? In welke instrumenten? (zie par. 8.5)

Vincent Vuik:

1. Er is een grote onzekerheid over de invloed van de vegetatie op de golfhoogte. Dit onderzoek is daardoor heel relevant. (zie par. 5.2)
2. Het zou mooi zijn als de beweging van de vegetatie tijdens de golfbelasting in de Deltagoot zichtbaar/meetbaar is. Dat kan positief bijdragen aan de ontwikkeling van de rekenmodellen. (zie par. 8.3.2)
3. Er zal een flinke hoeveelheid vegetatie afbreken en gaan drijven. Wat doen we hiermee? De invloed van de drijvende planten zal in dit experiment verwaarloosbaar zijn, maar het is wel verstandig om het veek op het talud te verwijderen, want dat heeft waarschijnlijk wel een flinke invloed op de golfoploop. (zie par. 8.3.3)
4. Vanaf een bepaalde orbitaalsnelheid bij de bodem kan het nodig zijn om de modellering in de vegetatiemodule van Swan anders aan te pakken. Gedacht kan worden aan een poreuze laag, ruwheid en/of stroming door woud van cilindertjes. (zie par. 5.2 en 8.5)
5. De eigenschappen van de vegetatie in de Deltagoot en op hetzelfde moment op de kwelder in Friesland moeten worden gemeten. Het gaat om het product van de elasticiteitsmodulus (E) en traagheidsmoment (I). Zo kunnen we zien of de eigenschappen van de vegetatie in de Deltagoot door transport et cetera zijn veranderd. (zie par. 8.3.2)

Deze opmerkingen en suggesties zijn zo goed mogelijk verwerkt in onderstaande hoofdstukken. Door bijvoorbeeld te zoeken op 'Roy' worden de antwoorden op de vragen van Roy

Mom gevonden. Verder zijn er vragen van het Adviesteam Dijkontwerp beantwoord in Appendix A.

## 1.5 Leeswijzer

In dit rapport is in hoofdstuk 2 en 3 een beschrijving te zien van de Nederlandse kwelders (schorren genaamd in Zeeland) en de vegetatie die daarop te vinden is. In hoofdstuk 4 is de huidige kennis omtrent schade aan de vegetatie door grote golven gegeven. Voor het ontwerp en het beoordelen van dijken is het belangrijk om rekening te houden met deze schade.

Hoofdstuk 5 gaat over de invloed van de vegetatie op de golfcondities. In dat hoofdstuk zijn ook voorbeeldberekeningen met Swan met de vegetatiemodule opgenomen.

De relevante huidige kennis omtrent de golfbelasting op de dijk is samengevat in hoofdstuk 6, maar zonder de invloed van de vegetatie, omdat hierover nog niets bekend is (anders dan dat de golfcondities aan de teen van de dijk erdoor beïnvloed worden).

Hoofdstuk 7 betreft de erosie van de kwelder bij de teen van de dijk en bij de klif aan de zeezijde van de kwelder.

De voorgestelde Deltagootproeven zijn beschreven in hoofdstuk 8, waarna wordt afgesloten met conclusies in hoofdstuk 9.

## 2 Kwelders (en schorren) in Nederland

### 2.1 Potentiële bijdrage van kwelders aan ecosysteemdiensten

Een kwelder-ecosysteem herbergt een rijkdom aan biodiversiteit. Naast de biodiversiteit kan een kwelder bijdragen aan een breed scala aan andere ecosysteemdiensten. Door gebruik te maken van de functies van het ecosysteem en de feedback tussen het ecosysteem en de omgeving kan de kwelder dienen als veerkrachtige en adaptieve hybride oplossing voor kustbescherming. De relevante ecosysteemdiensten werken als volgt:

- **Golfdemping:** kwelders dragen bij aan golfdemping door de bodemligging en bodemruwheid. Zowel de breedte als de hoogte van de kwelder is van belang voor het golfdempende effect. Want de golfdemping is sterk afhankelijk van de waterdiepte en vegetatie-hoogte op de kwelder. Bij grotere waterdieptes is de golfreductie minder, maar blijft de kwelder bijdragen aan het reduceren van de golfhoogte (Vuik et al., 2016; Willemsen et al., 2020).
- **Meegroeien met zeespiegelstijging:** kwelders kunnen meegroeien met een stijgende zeespiegel, doordat sediment wordt ingevangen tijdens hoogtij. Dit resulteert in een stijgende bodemhoogte. De snelheid waarmee de kwelder verticaal kan groeien is afhankelijk van de lokale sedimentconcentraties en getijd amplitude (Best et al., 2018; Kirwan et al., 2010; 2016; Schuerch et al., 2013). Het meegroeien van de kwelder kan bijdragen aan toekomstige waterveiligheidsopgaven.
- **Stabiliseren van de bodem:** de kwelderbodem is sterker en heeft een lagere erodeerbaarheid dan een onbegroeid voorland, door de bodemeigenschappen en wortelstructuren die de bodem stabiliseren (Ford et al., 2016; Kirwan et al., 2010; Silliman et al., 2012).
- **Koolstofopslag (CO<sub>2</sub>):** kwelders leggen koolstof vast in plantmateriaal, alsook door het invangen en begraven van algenmateriaal. Deze opslag is onderdeel van Blue Carbon: alle koolstof die zich in mariene ecosystemen bevindt. Mariene ecosystemen, zoals mangroves, zeegrasvelden en kwelders behoren tot de meest effectieve ecosystemen in koolstofopslag (Teunis en Didden, 2018).
- **Kwaliteit leefomgeving:** Levende dijken met kweldervegetatie hebben een positieve invloed op de kwaliteit van de leefomgeving. Ze vergroten de ruimtelijke kwaliteit, recreatie- en toerisme-mogelijkheden en bieden kansen voor het combineren van natuur en landschappelijke kwaliteit met sociaal-economische opgaven. Dit is echter sterk lokaal afhankelijk van de keuzes die gemaakt worden (Van Loon-Steensma et al., 2014).

### 2.2 Kwelder dynamiek

Een intergetijdegebied kan zich tot kwelder ontwikkelen, zodra er voldoende slib is ingevangen en de bodemhoogte zich ontwikkelt tot bijvoorbeeld de gemiddeld hoogwaterlijn. Indien de bodem voldoende hoogte heeft bereikt, heeft pioniervegetatie de kans zich te vestigen als de golven en getijstrooming (hydrodynamische energie) niet te sterk zijn.

De bovengrondse vegetatie zorgt voor een versnelde invang van slib, waardoor de bodemhoogte verder groeit. Dit resulteert in de vestiging van opeenvolgend nieuwe lage, midden en hoge kweldersoorten. Welke soorten daadwerkelijk groeien, zal afhankelijk zijn van omgevingsparameters als saliniteit, hydrodynamische energie, nutriënten en bodemkarakteristieken. De mate van opslibbing zal afhankelijk zijn van de lokaal voorkomende sedimentconcentraties, alsook de hoogte van de kwelder. Een hogere kwelder resulteert in een lagere overstromingsfrequentie, waardoor opslibbing af zal nemen. De genoemde processen spelen zich af op een tijdschaal van decennia. De slibinvang tijdens inundatie van



de kwelder, zorgt ook voor de meegroeicapaciteit met zeespiegelstijging. Immers, zodra de overstromingsfrequentie en -duur toeneemt is er meer kans op slibinvang.

Een voorbeeld is de Peazumerlannen in Noord-Friesland. Daar was in de periode 1995-2007 de aanslibbing volgens SEB-metingen zo'n 20 mm/jaar in kaal/pionier/laag gebied en 14mm à 15 mm/jaar van 2007 tot en met 2017 op kaal wad, in pré-pionier zone en op lage kwelder (van Duin, 2018).

De breedte van de kwelder (loodrecht op de kust) wordt bepaald door de locatie van de zeewaarts gelegen kwelderrand. Op veel locaties beweegt de kwelderrand zich met enkele meters per jaar, zowel zeewaarts als landwaarts. Ook is er cycliciteit geobserveerd waar zeewaartse groei afwisselt met landwaartse erosie/terugtrekking. Het omslagpunt tussen deze beide fases, kan vastgelegd worden in twee sleutelprocessen:

- initiatie van kweldererosie en
- begin van zeewaartse kweldergroei door vegetatie vestiging en/of groei van klonale plantscheuten.

Initiatie van kweldererosie ontstaat door een discontinuïteit tussen de dynamische onbegroeide plaat waarvan de bodemhoogte sterk varieert over tijd en stabiele begroeide kwelder. Dit kan in een klif resulteren die zich terug zal trekken met een snelheid afhankelijk van overstromingsfrequentie en frequentie van stormen met golven. Vegetatievestiging is afhankelijk van fysische parameters, zoals: overstromingsfrequentie en -duur en bodemhoogtedynamiek wat kan leiden tot ontworteling en het begraven van jonge planten. Expansie door klonale scheuten wordt met name beïnvloed door hydrodynamische condities als overstromingsduur en hydrodynamische energie. De wisselwerking tussen al deze processen resulteert in laterale groei en erosie/afslag.

Beheersmaatregelen kunnen bijdragen aan de ontwikkeling van de kwelder. Zodra de kwelder start met terugtrekken, door toename van hydrodynamische processen ten gevolge van natuurlijke of menselijke oorzaak, kunnen beheersmaatregelen mogelijk bijdragen aan stabilisatie. Indien het doel is om kwelders te ontwikkelen op locaties waar ze niet voorkomen, vanwege ongeschikte omgevingsparameters kunnen beheersmaatregelen ervoor zorgen dat kwelders zich alsnog kunnen ontwikkelen. Men kan denken aan het plaatsen van structuren, rijshouten dammen (zie Figuur 2.10) en ophogen van de bodem (zoals Marconi, zie Figuur 2.5).

## 2.3 Geometrie

Begroeide kwelders die kunnen bijdragen aan het waterkeringssysteem hebben een richting zee flauw aflopend oppervlak met een helling van orde 1:200 (Zeeland) tot 1:1000 (Waddenzee). Aan de landzijde (tegen de dijk) is het terrein net iets boven gemiddeld hoogwater (paar decimeter) bij relatief jonge kwelders en aan de zeezijde is het net onder gemiddeld hoogwater (paar decimeter). Bij oudere kwelders ligt het begroeide deel vaak geheel boven gemiddeld hoogwater, tot wel orde 1 m. Aan de zeezijde is er sprake van een kwelderrand, die kan aflopen met een helling van bijvoorbeeld 1:25 à 1:100 (getijdeplaat) en/of er kan sprake zijn van een klif van 0,3 à 1,0 m hoogte (zie Figuur 2.1). Rond NAP is er doorgaans geen vegetatie.

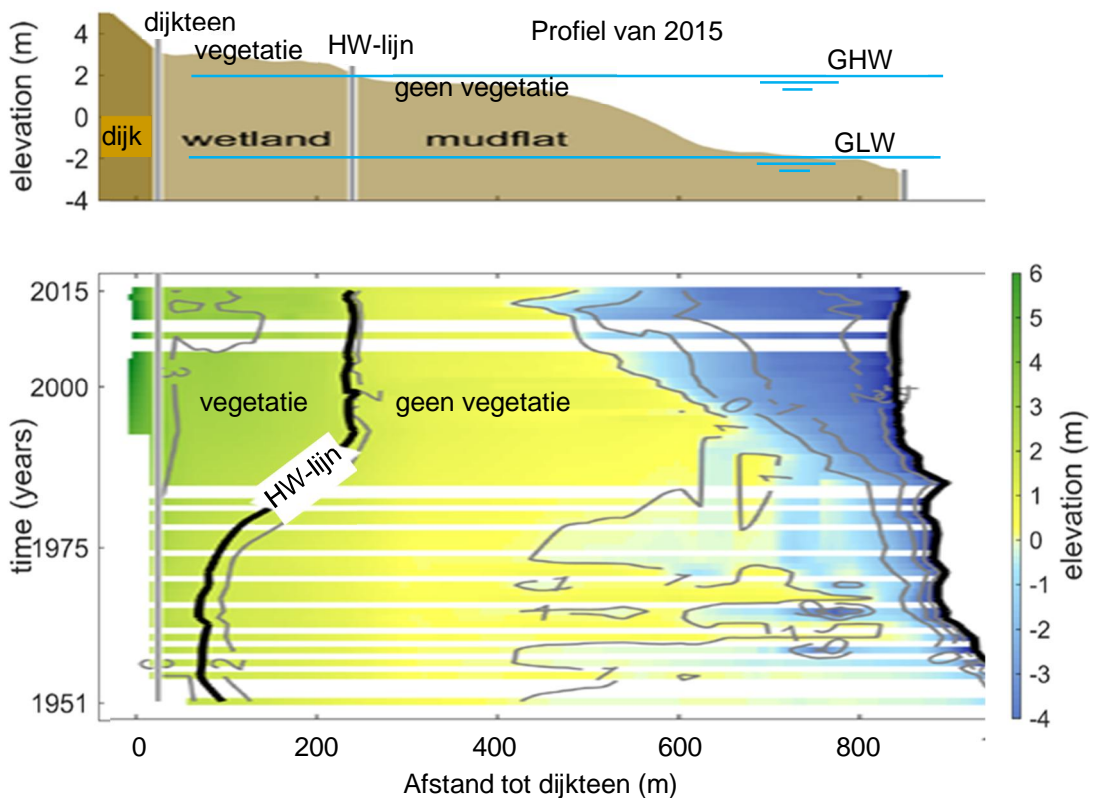
De breedte van de begroeide kwelder boven gemiddeld hoogwater is minstens 50 m, maar meestal 80 tot 200 m. In sommige gevallen is dit een paar kilometer. Deze breedte is heel bepalend voor de mate waarin de golfcondities beïnvloed worden door de vegetatie. Voor voorbeelden, zie Figuur 2.3, Figuur 2.2 en Figuur 3.3 t/m Figuur 3.7.



Figuur 2.1, Klif aan zeezijde (Westerschelde)

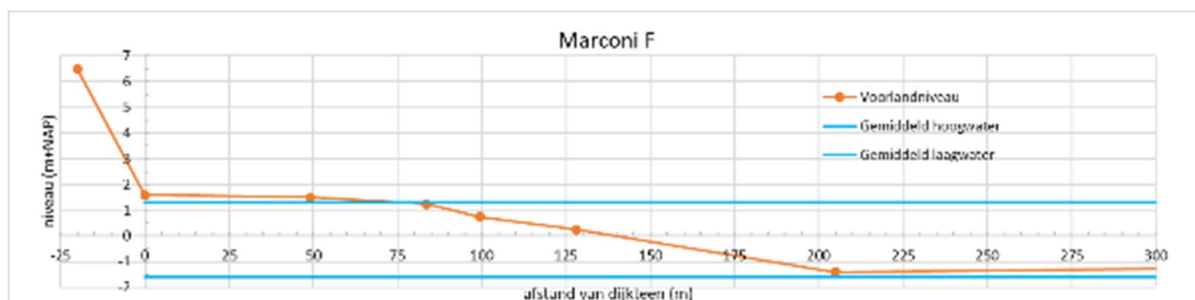
Aan de zeezijde is er voor de kwelder meestal een ondiepe strook van 300 tot 3000 m breedte en ligt de eventuele stroomgeul dus meestal op behoorlijke afstand van de kwelderrand. Als de stroomgeul direct aan de kwelderrand ligt, is er een bijzondere situatie die in dit project niet wordt beschouwd.

Een voorbeeld van een dwarsprofiel van een begroeid voorland is gegeven in Figuur 2.2 (bij Zimmermanpolder, Westerschelde). In de bovenste figuur staat het dwarsprofiel van 2015. In de onderste figuur is het verloop van het niveau van dezelfde locatie te zien van 1951 tot 2015. We zien dat het begroeide gebied boven de hoogwaterlijn van 1975 tot 1995 een stuk breder is geworden (groen in de figuur), maar daarna vrijwel onveranderd is gebleven. Het diepere voorland onder NAP (blauw in de figuur) schuift in de laatste 25 jaar langzaam richting de dijk, waardoor het onbegroeide deel in de tijzone (geel en lichtblauw in de figuur) wat smaller en steiler is geworden.



Figuur 2.2, Dwarsprofiel (boven) en verloop van het niveau van de kwelder in loop van de periode van 1951 tot 2015 bij Zimmermanpolder langs de Westerschelde (Vuik et al 2019).

Een ander voorbeeld van een begroeide kwelder is de kunstmatig gemaakte kwelder van Marconi. Een dwarsprofiel hiervan is gegeven in Figuur 2.3 (zie ook Figuur 2.5).



Figuur 2.3, Profiel van begroeide kwelder van Marconi (vak F)

Deze kwelder wijkt wat af van natuurlijke kwelders op het punt dat de zone met hoogte tussen NAP+0,0 en NAP+1,0 m vrij smal is. In Figuur 2.2 is deze zone orde 200 m, terwijl dit bij Marconi maar ca 50 m is.

## 2.4 Grondsoort

De bodem van begroeide kwelders bestaat doorgaans uit klei, zandige klei of kleilig zand met een aanzienlijk percentage organisch materiaal. De gemiddelde  $D_{50}$  van natuurlijke kwelders laat grote variaties zien, van enkele tientallen micrometer tot ruim honderd micrometer voor kwelders langs de Waddenzee en Westerschelde (Hu et al., 2021). Tevens is de ruimtelijke spreiding in  $D_{50}$  opvallend in deze gebieden. Historisch is veelal het materiaal van de kwelders gebruikt als dijkklei, waarbij het zoutgehalte en gehalte organische stof in de loop van een decennium op de dijk afneemt tot wat er nu zoal op dijken wordt aangetroffen.

Op enkele locaties langs de Friese kust is het lutum- en zandgehalte gemeten in de bodem op een diepte tussen 0,2 en 0,5 meter, zie Tabel 2.1.

	Lutumgehalte (% kleiner dan 2 mu)	Zandgehalte (%)
Peazemerlannen locatie 1	45,3	1,3
Peazemerlannen locatie 2	19,7	37,0
Holwerd	36,0	7,2
Ferwerd	32,2	8,2

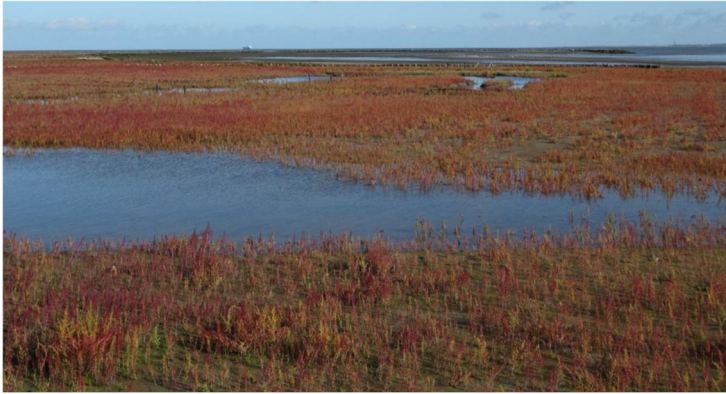
Tabel 2.1, Lutum- en zandgehalte van de ondergrond op enkele kwelders langs Friesland (zie ook Figuur 8.15)

## 2.5 Vegetatie

Er is lage pioniervegetatie met veel open plekken ertussen in de strook bij de kwelderrand aan de zeezijde, bijvoorbeeld zeekraal (*Salicornia spp.*) (zie Figuur 2.4). Hoe verder van de kwelderrand hoe dichter de vegetatie wordt en naarmate het niveau hoger wordt ten opzichte van de hoogwaterlijn wordt de vegetatie ook hoger, zie Figuur 2.5 en Figuur 2.6.



*Figuur 2.4, Lage, uit elkaar staande, pioniervegetatie (zeekraal) bij de kwelderrand*



*Figuur 2.5, Zich ontwikkelende pioniervegetatie (zeekraal) op Marconi (september 2020)*



*Figuur 2.6, Hoge vegetatie bij de dijk (Zwarte Haan)*



*Figuur 2.7 Hoge vegetatie in de winter (en vaak op de dijk) na een storm met maximale waterstand van ca NAP+3 m en maximale golven van  $H_{m0}$  = ca 1 m (gemeten bij Wierummerwad of Uithuizerwad)*



Figuur 2.8, Kwelder met lage vegetatie in de winter na een storm met maximale waterstand van NAP+3 m en maximale golven van  $H_{m0} = \text{ca } 1 \text{ m}$  (gemeten bij Wierummerwad of Uithuizerwad)

Gezien het feit dat de zwaarste stormen in de winter voorkomen, is het voor de bijdrage aan de waterveiligheid het belangrijkste hoe de vegetatie eruitziet in de winter, zie Figuur 2.7 en Figuur 2.8. Veldmetingen laten zien dat de vegetatie behoorlijk goed in staat is om golfaanval te weerstaan tot een bepaalde golfhoogte (tot ruim 80 cm, zie de metingen van Reents et al 2022). Bij hoge golven is het de verwachting dat veel vegetatie zal breken (berekend door Vuik et al 2018 op basis van diverse aannames), maar er blijven dan nog wel restanten over die bijdrage aan de golfhoogtereductie. De volgende vegetatiesoorten worden vaak genoemd om golven te dempen, vanwege de biomassa van de vegetatie en/of de (hoge) kwelderzone waar ze zich bevinden Engels slijkgras (*Spartina anglica*), Heen (*Scirpus maritimus* / *Bolboschoenus maritimus*), Zeeaster/Zult (*Aster tripolium*), Schorrenkruid (*Suaeda*), Zeekweek / strandkweek (*Elymus athericus* / *Elytrigia maritima* / *Elytrigia atherica*).

Er geldt dat de lage, flexibele, soorten beter bestand zijn tegen golfbelasting dan de hoge soorten, zeker als deze aan het eind van het seizoen wat stugger worden.

Volgens MER (2022) blijkt uit de systeemanalyse dat het ontwikkelen van het habitatype 'kwelder' een bijdrage kan leveren aan het oplossen van ecologische knelpunten in Natura 2000-gebied Waddenzee.

De kweldervegetatie is in meer detail beschreven in hoofdstuk 3, terwijl de schade aan vegetatie door golven aan bod komt in hoofdstuk 4.

## 2.6 Kunstmatige kwelder

In het algemeen kunnen begroeide kwelders ontstaan op plaatsen waar slib kan sedimenteren doordat er enige beschutting aanwezig is tegen de dagelijkse golfaanval. Dat was bijvoorbeeld het geval achter de rijshouten dam bij Wierum. Inmiddels is de dam in verval geraakt en erodeert de kwelder, die momenteel grotendeels verdwenen is (zie Figuur 2.9). Dit laat zien dat lokaal op geschikte locaties relatief simpele ingrepen kwelderontwikkeling kan stimuleren. Vervolgens kan dit bijdragen aan golfdemping en erosiebestendigheid.

Op geschikt gekozen locaties langs de Nederlandse waterkeringen is het mogelijk om de kwelder te herstellen of aan te leggen aan de zeezijde van de dijk. In zo'n geval zijn er twee opties:

- Enige beschutting tegen golfaanval en stroming creëren, bijvoorbeeld door rijshouten dammen te plaatsen (zie Figuur 2.10), en het voorland op natuurlijke wijze te laten

aanslibben. Een proces dat al eeuwen plaatsvindt op de vastelandskwelders bij Groningen en Friesland.

- Het voorland ophogen zodat een geometrie ontstaat zoals in Figuur 2.3, en vervolgens enige beschutting tegen golfaanval creëren, bijvoorbeeld door rijshouten dammen te plaatsen.



*Figuur 2.9, Eroderende kwelder bij Wierum*



*Figuur 2.10, Rijshouten dam*

Op een dergelijke kunstmatige kwelder ontstaat doorgaans spontaan de kweldervegetatie, zodra de bodemhoogte voldoende hoog gelegen is. Middels aanplant en inzaaien kan vegetatiegroei initieel gestimuleerd worden (zie bijvoorbeeld Baptist et al., 2019; Willemsen et al., 2022). De bescherming tegen golfaanval en de toegenomen bodemhoogte in het getij geeft de pioniervegetatie de kans om zich te vestigen, van waaruit de begroeiing zich steeds verder gaat ontwikkelen.

Vegetatie op kunstmatige kwelders aan de zeezijde van een dijk of dam ontwikkelt zich al snel op vergelijkbare wijze als natuurlijke kwelders (zie bijvoorbeeld Baptist et al., 2019). Pioniervegetatie vestigt zich, wanneer afhankelijk van de bodemhoogte andere hogere soorten volgen. De erodeerbaarheid van de bodem van een kunstmatige kwelder op de hoge kwelder tegen de dijk, de meest relevante zone voor kustbescherming, is deels vergelijkbaar met meer natuurlijke kwelders. De hoge kwelderzone van natuurlijke kwelders in de Westerschelde heeft over het algemeen een grotere “shear stress” dan de onbegroeide plaat en pionierzone. Rond de Belgisch-Nederlandse grens bevinden zich een aantal meer brakke kwelders, waaronder ook één meer kunstmatige kwelder (Paardenschor). De hoge zone van de meer kunstmatige kwelder heeft een lagere “shear strength” dan de nabije meer natuurlijke kwelders. Wanneer

men echter de kunstmatige Marconi kwelder beschouwd, laat deze een vrij vergelijkbare of iets lagere “shear strength” zien in het vak met 5% klei, terwijl in de vakken met 20% en 50% klei een grotere “shear strength” dan in de meer natuurlijke hoge kwelderzone is geobserveerd (Stoorvogel, unpublished data). (zie vraag 2 van Robert/Myron in par. 1.4).

De bijdrage aan de waterveiligheid wordt enerzijds door het hoge kwelderterrein verzorgd, en anderzijds aangevuld door de vegetatie. Beiden geven een reductie van de golfcondities op de dijk, zie hoofdstuk 5.

Het creëren van begroeide kwelders voor de dijk Koehool-Lauwersmeer kan een belangrijke aanwinst opleveren voor de natuurwaarden en bovendien bijdragen aan de waterkering, zoals ook geadviseerd is door de MER-commissie over deze dijk (MER 2022).

# 3 Beschrijving van de vegetatie op kwelders

## 3.1 Algemeen

Kweldervegetatie kenmerkt zich door kruidachtige en lage soms houtige planten. Vegetatie op de kwelders is zout tolerant (halofytisch). Deze planten vestigen zich in het intergetijde-gebied in estuaria en beschutte kustzones, zodra de bodem voldoende hoog is. Afhankelijk van de locatie zal vegetatie zich vestigen grofweg boven gemiddeld hoogwater of gemiddeld hoogwater doortij.

Op welke plek vegetatie zich vestigt is sterk afhankelijk van omgevingsparameters zoals hydrodynamische forcering (golfcondities en stroming) (grotere hydrodynamische energie zorgt voor een slechter vestigingsklimaat), bodemsamenstelling, bodemdynamiek (meer erosie en ook sedimentatie zorgt voor een slechter vestigingsklimaat), saliniteit (een brakke omgeving zorgt voor andere vegetatie). Daarnaast zijn beheersmaatregelen van invloed, men kan denken aan: kwelderwerken/rijshouten dammen (voor sediment invang en demping van hydrodynamische energie), greppelen (voor drainage), beweiding (kan zorgen voor toename van biodiversiteit door afname van climaxvegetatie), aanleg van kribben/dammen, aanleg van zomerdijken.

### 3.1.1 Soortensamenstelling

De soortensamenstelling van kwelders in Nederland wordt in het veld bepaald met behulp van vegetatietypologie SALT (De Jong et al., 1998). De soortensamenstelling van Nederlandse kwelders wordt eens per 5 tot 6 jaar in kaart gebracht in het meetnet kwelderartering (VEGWAD) in opdracht van Rijkswaterstaat. De verschillende kwelderzones die volgen uit typische soortensamenstellingen zijn: Pre-pionier, pionier, lage kwelder, middelhoge kwelder, hoge kwelder, brakke kwelder en nitrofiële kwelder. Van pre-pionier naar hoge kwelderzone gaat de bodemhoogte omhoog, en daarmee de overstromingsduur en -frequentie omlaag (met andere woorden, hoger in de getijzone). Typische vegetatiesoorten die voorkomen in de verschillende zones zijn als volgt:

- Pre-pionier
  - o Kortarig zeekraal (*Salicornia europaea*)
  - o Langarig zeekraal (*salicornia procumbens*)
  - o Engels slijkgras (*Spartina anglica*)
- Pionier
  - o Kortarig zeekraal (*Salicornia europaea*)
  - o Langarig zeekraal (*salicornia procumbens*)
  - o Engels slijkgras (*Spartina anglica*)
  - o Klein schorrenkruid (*Suaeda maritima*)
- Lage kwelder
  - o Gewoon kweldergras (*Puccinellia Maritima*)
  - o Klein schorrenkruid (*Suaeda maritima*)
  - o Lamsoor (*Limonium vulgare*)
  - o Zeeaster / Zulte (*Aster tripolium* / *Tripolium pannonicum*)
- Middelhoge kwelder
  - o Zilte rus (*Juncus gerardii* / *Juncetum gerardi*)
  - o Zeealsem (*Artemisia maritima* / *Seriphidium maritimum*)
  - o Lamsoor (*Limonium vulgare*)
- Hoge kwelder
  - o Zeekweek (*Elymus athericus* / *Elytrigia maritima* / *Elytrigia atherica*)
  - o Aardbeiklaver (*Trifolium fragiferum*)

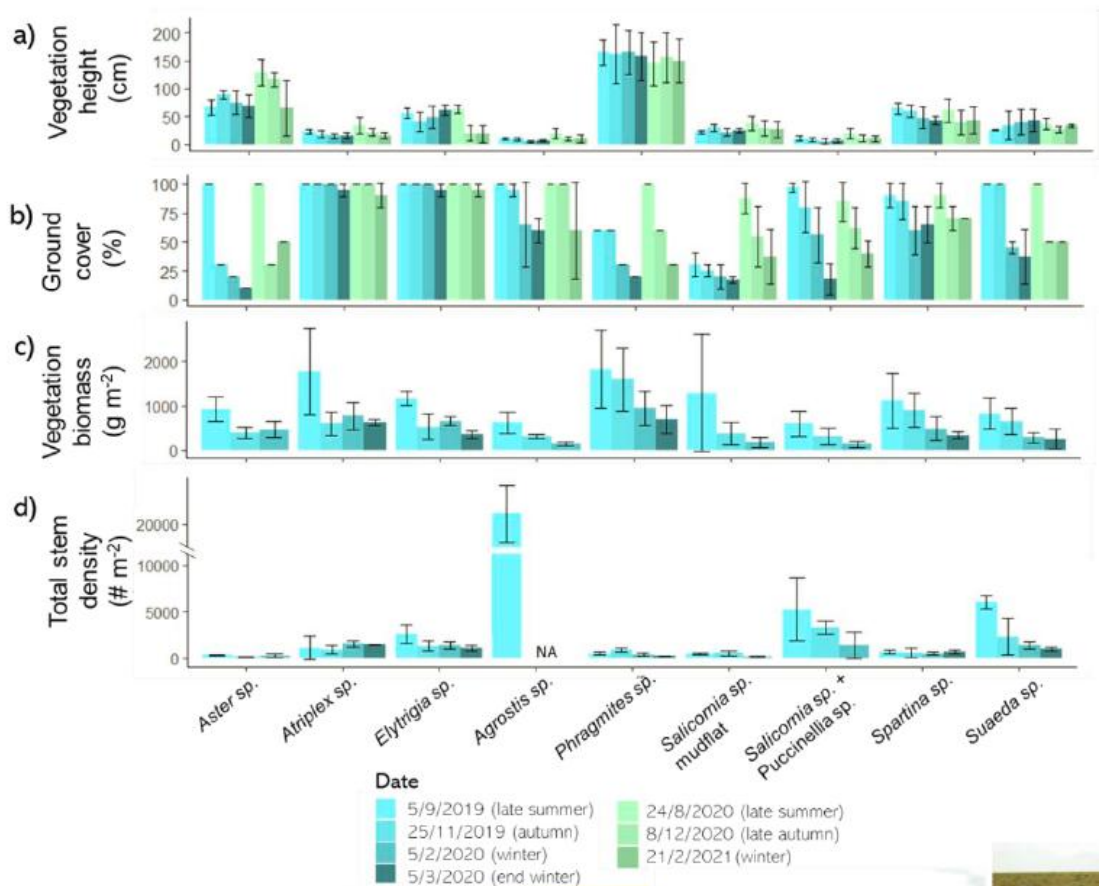


- Brakke kwelder
  - o Riet (*Phragmites australis*)
  - o Zilverschoon (*Potentilla anserina*)
  - o Fioringras / wit struisgras (*Agrostis stolonifera*)
  - o Heen / zeebies (*Scirpus maritimus* / *Bolboschoenus maritimus*)
- Nitrofiële kwelder
  - o Strandmelde (*Atriplex littoralis* / *Atriplicetum littoralis*)
  - o Spiesselde (*Atriplex prostrata*)

Dijkema et al. (2011) beschrijft de vegetatiesoorten die voorkomen op de vastelandskwelders bij Friesland en Groningen. Deze laten een sterke overeenkomst zien met de soorten die over het algemeen voorkomen op de Nederlandse kwelders. Overigens komt de climax vegetatiesoort zeekweek op de vastelandskwelders aan de Friese kust ook regelmatig voor in de typische middelhoge kwelderzone (bijvoorbeeld ten oosten van de pier van Holwerd en op Noord-Friesland Buitendijks). De dominantie van deze vegetatiesoort wordt gedempt door beweiding, wat zorgt voor een grotere soortenrijkheid.

### 3.1.2 Seizoensverandering van vegetatie

De eigenschappen van de vegetatie ontwikkelen zich gedurende het jaar. In april start het groeiseizoen en zal de vegetatie ontwikkelen, waarna de plant volgroeid is aan het einde van het groeiseizoen in september. Vanaf september stopt de groei en zal de biomassa van de vegetatie gedurende het winterseizoen langzaam verminderen. De mate van afbraak is afhankelijk van onder andere temperatuur, wind, hydrodynamiek (golven en stroming), verwerking, en ook begrazing.



Figuur 3.1. Seizoensverandering van een aantal veelvoorkomende vegetatiesoorten op de vastelandskwelders aan de Waddenzee-kust van Friesland en Groningen: vegetatiehoogte (a), bedekking (b), biomassa (c) en totale vegetatiedichtheid (d). Uit Marin-Diaz et al., (2023)

De afmetingen van kweldervegetatie zijn over het algemeen het grootst aan het einde van het groeiseizoen, waarna ze in de herfst en winter afnemen. Dit is duidelijk terug te zien in de bedekking, biomassa en dichtheid van metingen in de vastelandskwelders aan de kust van Groningen en Friesland (Figuur 3.1; Marin-Diaz et al., 2023). De vegetatiehoogte van de staande vegetatie blijft vrijwel gelijk nadat de maximale hoogte bereikt is. Desondanks neemt de vegetatiedichtheid af (en dus de fractie afgebroken vegetatie toe), waardoor de totale biomassa en dichtheid zal afnemen. Vuik et al. (2018) laat zien dat stengelhoogte en -dikte van *Spartina anglica* (Engels slijkgras) en *Scirpus maritimus* (heen/zeebies) maximaal is aan het einde van het groeiseizoen in September (behalve hoogte van *Spartina anglica* (Engels slijkgras), deze is maximaal in November; Tabel 3.1; Tabel 3.2). In de semi-natuurlijke Marconi kwelder bij Delfzijl is zowel een toename als afname van vegetatie-afmetingen geobserveerd (Siegersma et al., submitted; Eekman, 2021). Vergelijkbare observaties zijn waargenomen in kwelders elders, bijvoorbeeld Verenigd Koninkrijk (Möller, 2006) en Duitsland (Schulze et al., 2019).

Tabel 3.1. Karakteristieken van *Spartina anglica* (Engels slijkgras) met standaardafwijking (gemiddeld +/- standaardafwijking) uit de Westerschelde per meetperiode (bv = planthoogte; bv = stengeldiameter; sigma\_max = buigsterkte; E = buigstijfheidsmodulus; I = traagheidsmoment van de stengel)

Period		Dec 2014	Apr 2015	Sep 2015	Nov 2015	All
<b>Samples</b>		<b>25</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>85</b>
$h_v$	mm	327 ± 125	285 ± 63	544 ± 111	608 ± 50	441 ± 87
$b_v$	mm	3.1 ± 0.5	3.3 ± 0.5	4.1 ± 0.9	3.7 ± 0.5	3.5 ± 0.6
$\sigma_{max}$	MPa	13.9 ± 7.0	10.4 ± 5.1	8.8 ± 4.6	17.0 ± 5.8	12.5 ± 5.6
E	MPa	708 ± 560	318 ± 178	224 ± 151	503 ± 198	438 ± 272
EI	Nmm <sup>2</sup> ×10 <sup>3</sup>	2.0 ± 1.0	1.6 ± 0.5	2.5 ± 1.6	2.3 ± 1.1	2.1 ± 1.0

Tabel 3.2. Karakteristieken van *Scirpus maritimus* (heen) met standaardafwijking (gemiddeld +/- standaardafwijking) uit de Westerschelde per meetperiode

Period		Dec 2014	Apr 2015	Sep 2015	Nov 2015	All
<b>Samples</b>		<b>20</b>	<b>20</b>	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>78</b>
$h_v$	mm	737 ± 169	399 ± 178	1015 ± 175	738 ± 208	722 ± 183
$b_v$	mm	6.8 ± 1.5	7.6 ± 1.9	8.0 ± 1.7	6.8 ± 1.4	7.3 ± 1.6
$\sigma_{max}$	MPa	6.8 ± 2.5	8.5 ± 4.1	9.5 ± 4.4	11.8 ± 6.2	9.2 ± 4.3
E	MPa	1130 ± 305	1625 ± 1120	917 ± 600	2052 ± 946	1431 ± 743
EI	Nmm <sup>2</sup> ×10 <sup>3</sup>	43 ± 29	58 ± 44	54 ± 35	51 ± 33	52 ± 35

### 3.2 Situatie voor de dijk Koehool-Lauwersmeer

Voor de dijk op het traject Koehool-Lauwersmeer liggen een groot aantal kwelders. Van west naar oost zijn de volgende kwelders te vinden: Westhoek, Noord-Friesland Buitendijks (de meest uitgestrekte kwelders grofweg tussen Zwarte Haan en Holwerd), 't Schoor, Wierum en Peazemerlannen (Figuur 3.2). De kwelders kunnen getypeerd worden aan de hand van ontwikkeling en beheer. Westhoek is een meer natuurlijke kwelder die zich uitbreidt en het gebied Noord-Friesland Buitendijks heeft zich vrijwel volledig ontwikkeld binnen de kwelderwerken (rijshouten dammen, zomerdijkjes, greppels). 't Schoor, Wierum en Peazemerlannen zijn allen vrij hooggelegen kwelders omgeven door een (voormalige) zomerdijk, met greppels voor drainage. De kwelder bij Wierum trekt zich terug middels een karakteristieke klif aan de voorzijde van de kwelder. 't Schoor en Peazemerlannen zijn relatief stabiel en vestigen een pionierzone op sommige plekken.

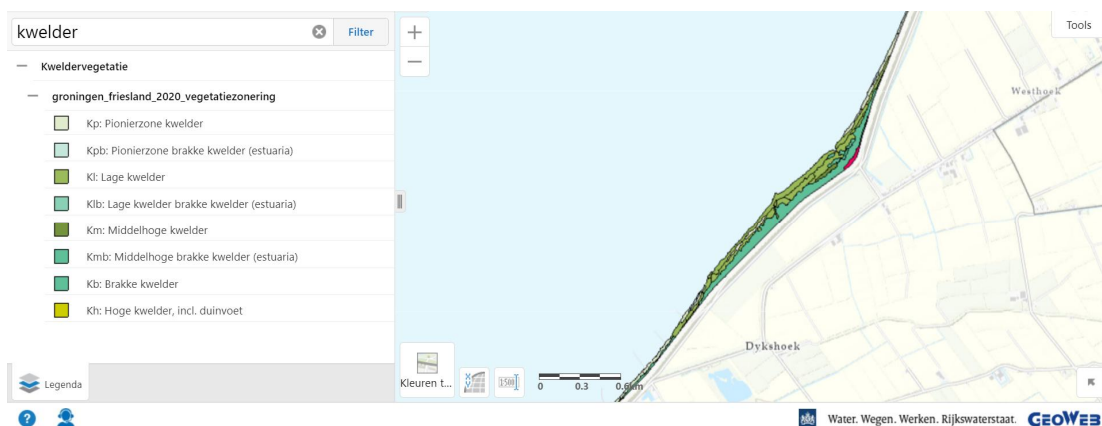
De huidige samenstelling van de kwelders, op het niveau van kwelderzoning, is gekwantificeerd in Tabel 3.3 (meest recent is 2014) en getoond in Figuur 3.3 tot en met Figuur 3.7 (jaar 2020). In de legenda zijn alleen de relevante kleuren verklaard. De midden tot hoge kwelderzones, die vanwege de hoogteligging de meeste potentie hebben om bij te dragen aan kustbescherming zijn, zijn sterk vertegenwoordigd in de kwelderwerken aan de vastelandskust van Friesland met een oppervlak van bijna 1000 ha.



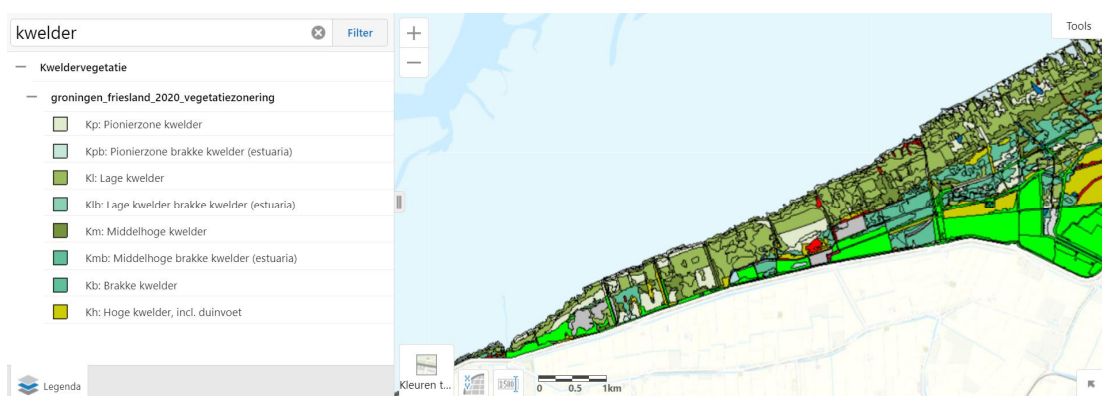
Figuur 3.2. Kwelders/voorlanden voor de dijk op het dijktraject Koehool-Lauwersmeer (bron: Google Earth).

Tabel 3.3. Arealen (in ha) van vegetatiezones in de Friese en Groninger kwelderwerken op basis van VEGWAD-karteringen in de SALT97-classificatie (inclusief boerenkwelders en ontpolderde gebieden bij Noarderleech en Bildtpollen, exclusief zomerpolders). Uit Elschot et al. (2019).

Kwelderzone	Friesland			Groningen		
	2002	2008	2014	2002	2008	2014
Pre-pionierzone	422	305	213	261	108	281
Pionierzone	527	460	608	425	512	421
Lage kwelderzone	520	457	346	355	306	405
Lage kwelderzone met pioniersoorten	55	375	538	3	10	45
Midden kwelderzone	181	121	232	129	68	77
Midden kwelderzone met zeekweek	428	392	359	401	455	432
Midden kwelderzone met R-soorten	0	61	30	0	20	1
Hoge kwelderzone	156	154	226	38	22	59
Hoge en brakke kwelderzone en ZD	239	74	63	4	4	5
Climaxvegetatie met riet	3	4	14	0	0	0
Zoete graslanden	0	131	53	0	61	25
Totaal	2528	2534	2682	1615	1566	1752



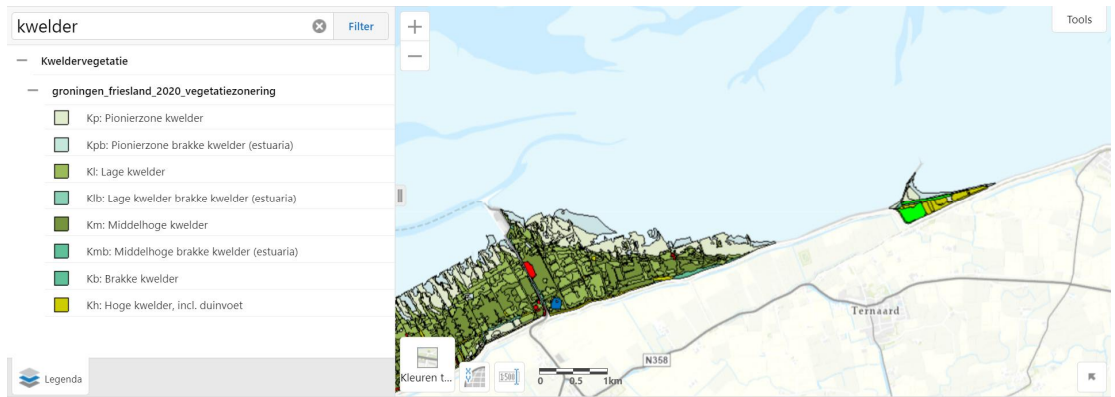
Figuur 3.3. Kwelderzonering in de kwelder van Westhoek op basis van observaties in 2020 (bron: kweldervegetatie webviewer Rijkswaterstaat GeoWeb).



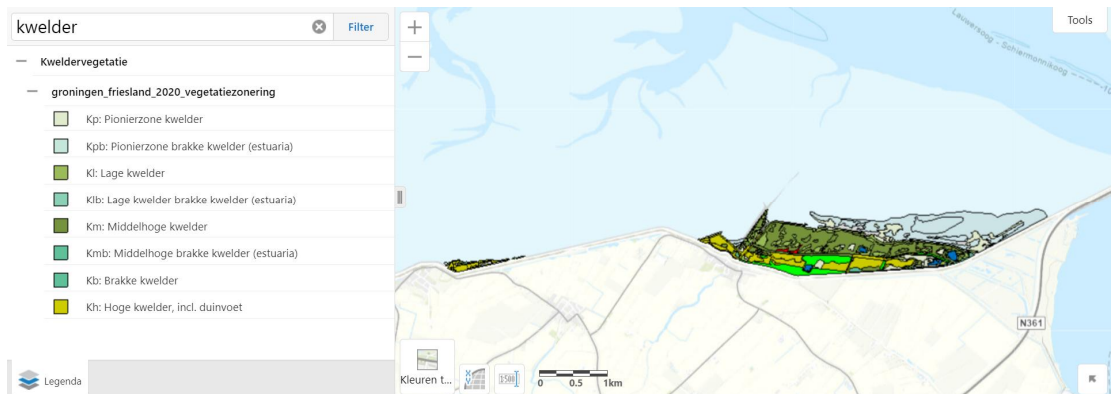
Figuur 3.4. Kwelderzonering in het westelijk deel van Noord-Friesland Buitendijks, van Zwarte Haan tot Bildtpollen op basis van observaties in 2020 (bron: kweldervegetatie webviewer Rijkswaterstaat GeoWeb).



Figuur 3.5. Kwelderzonering in het middendeel van Noord-Friesland Buitendijks, in en rondom Noarderleech en Blije en Ferwert Bûtendijks op basis van observaties in 2020 (bron: kweldervegetatie webviewer Rijkswaterstaat GeoWeb).



**Figuur 3.6.** Kwelderzoning Noord-Friesland Buitendijks in en rondom Holwert Bûtendyks west, ten oosten van de pier naar Ameland en 't Schoor op basis van observaties in 2020 (bron: kweldervegetatie webviewer Rijkswaterstaat GeoWeb).



**Figuur 3.7.** Kwelderzoning op de kwelder bij Wierum en Peazemerlannen op basis van observaties in 2020 (bron: kweldervegetatie webviewer Rijkswaterstaat GeoWeb).

## 4 Schade aan vegetatie door hoge golven

### 4.1 Huidige stand van de kennis

Kweldervegetatie is in staat om golven te dempen (hoofdstuk 5) enerzijds, maar de vegetatie zal vervormen en/of beschadigd raken als de golven groter worden: de eigenschappen van vegetatie veranderen. Anderzijds is de mate van schade bij een bepaalde golfbelasting afhankelijk van het seizoen (Reents et al. 2020; Vuik et al., 2018; Figuur 4.1). Dus het gedrag van vegetatie ten aanzien van golfbelasting is variabel in tijd en door belasting en daarmee is het van belang om dit aspect te kunnen kwantificeren.



*Figuur 4.1 Scirpus en Spartina op de kwelder bij Bath (Westerschelde) in de nazomer (boven) en winter (onder) (Vuik et al., 2018)*

Gedrag is hier gedefinieerd als (tijdelijke) vervorming van vegetatie en schade aan vegetatie. Bij vervorming kan men denken aan het buigen van vegetatie onder invloed van golven. Bij vegetatieschade valt te denken aan afbreken van stengels en of het ontwortelen van de gehele plant (uit de grond getrokken).

Er kan in principe op verschillende manieren vegetatieschade optreden:

- De stengels kunnen knakken, zonder dat ze volledig afbreken en losschieten
- De stengels kunnen afbreken
- De bladeren kunnen afbreken

- De plant kan uit de grond worden getrokken, ook wel ontworteling (eventueel na fluïdisatie van de bodem door de drukgradiënten in de bodem).

Deze laatste vorm van schade kan fysisch voorkomen door bijvoorbeeld oppervlakte-erosie en “self-scour”, waardoor de verankering van de plant achteruit gaat. Dit is een proces dat met name in de pionierzone voor kan komen, doordat de bodem hier “slapper” is, vegetatie deels bestaat uit jaarlingen (bijvoorbeeld zeekraal), en vegetatie verder uit elkaar staat. “Self-scour” is een proces waar door het bewegen van de plant en stroming rondom de plant een schuurgat ontstaat rondom de voet van de plant. Dit is geobserveerd in het lab, alsook in het veld in de kwelder in pioniervegetatie (Bouma et al., 2009; Friess et al., 2012; Van den Berg 2021). Oppervlakte-erosie kan eveneens resulteren in een slechtere verankering van de plant waardoor deze los komt uit de bodem. Dit proces is met name door laboratoriumexperimenten aangetoond (zie bijvoorbeeld Cao et al., 2017). Ontworteling door fluïdisatie in kwelders is in de praktijk nog nooit geconstateerd en lijkt daarom de minst waarschijnlijke vorm van schade.

Schade aan de vegetatie zal in eerste instantie invloed hebben op de mate waarin de vegetatie de golfcondities beïnvloedt. Maar de schade kan ook zo omvangrijk worden dat de vegetatie de bodem niet meer beschermt en er grote erosie gaat optreden tijdens een extreme storm. Dit laatste is minder waarschijnlijk, omdat de schade aan de vegetatie doorgaans geen invloed heeft op de wortels in de bodem, met name niet op de (midden)hoge kwelder.

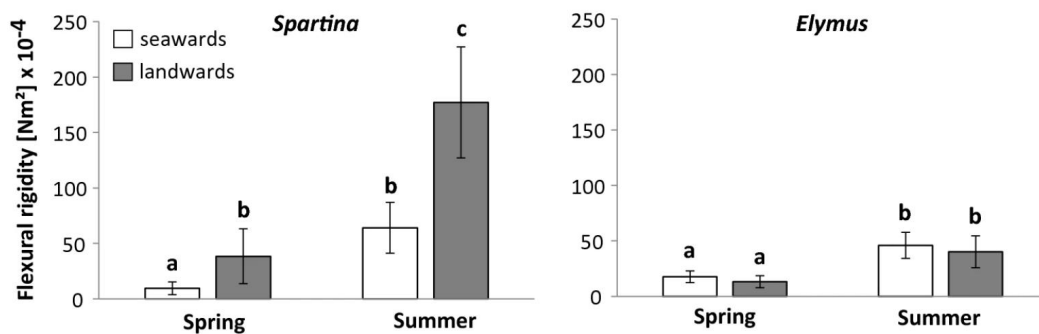
In dit hoofdstuk zal verder ingegaan worden op de variabele vegetatiesterkte door seizoensale veranderingen en schade door golven op verschillende hoogtes van de stengel.

#### 4.1.1 Variabele vegetatiesterkte

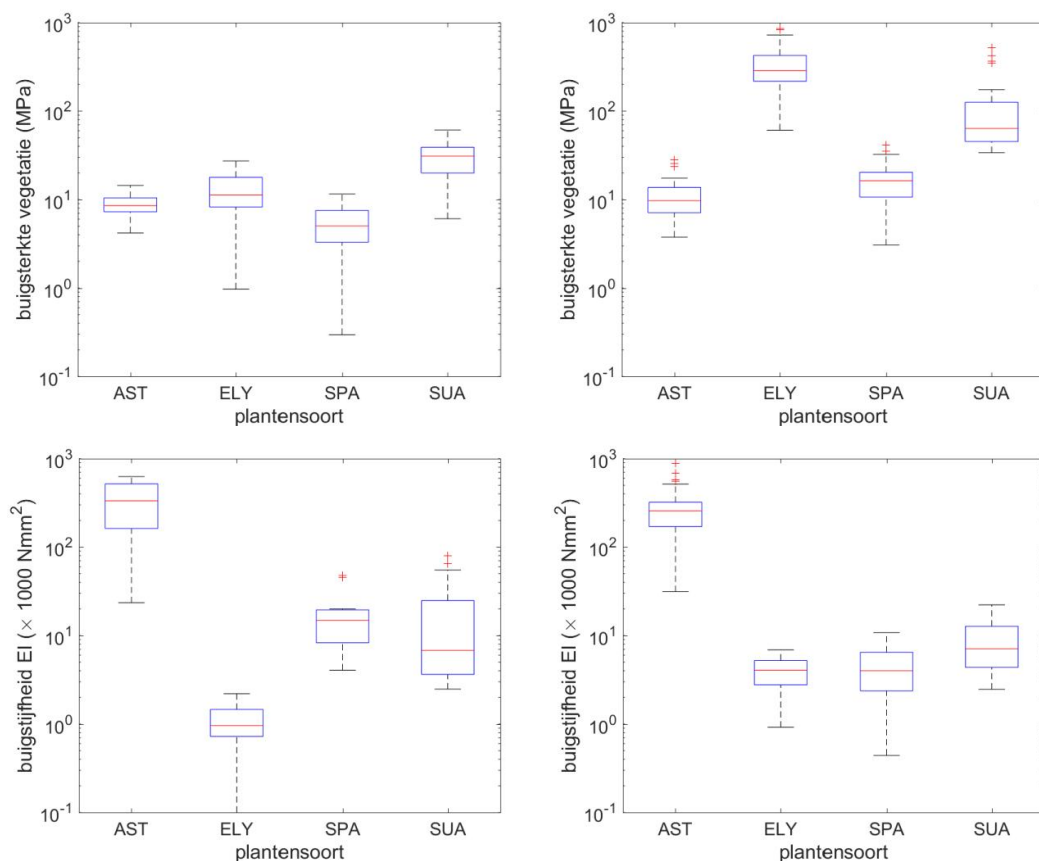
De vegetatiesterkte en resistentie tegen afbreken door hoge golven wordt veelal gerelateerd aan de volgende karakteristieken:

- Hoogte van de vegetatie  $h_v$  (mm)
- Diameter van de stengels  $b_v$  (mm)
- Dichtheid van de stengels  $N_v$  (stengels/m<sup>2</sup>)
- Buigstijfheid van de stengels  $EI$  (Nmm<sup>2</sup>)
- Buigsterkte van de stengels  $\sigma_{max}$  (MPa)

Deze parameters zijn tot op zeker hoogte gemeten in verschillende studies (e.g. Tabel 3.1 en Tabel 3.2). Bovengrondse biomassa (hoogte, diameter en dichtheid) is veranderlijk gedurende het jaar, zoals beschreven in par. 3.1.1. Ook de buigstijfheid en buigsterkte zijn veranderlijk afhankelijk van het seizoen (e.g. Vuik, 2017; Vuik et al., 2018; Schulze et al., 2019). Buigstijfheid en buigsterkte wordt gebaseerd op 3-punts buigproeven. Een proefstuk van de vegetatie wordt op twee ondersteuningën gelegd, waarna deze in het midden van bovenaf belast wordt met een pin die zakt met vaste snelheid (puntlast). Het instrument registreert de kracht die nodig is om de stengel te laten buigen en vervolgens te knakken (zie Vuik, 2017; Vuik et al., 2018; voor een uitgebreide beschrijving).



Figuur 4.2 Buigstijfheid van *Spartina* (Engels slijkgras; links) en *Elymus* (zeekweek; rechts) vegetatie uit de Noord-Duitse Waddenzee (Schulze et al., 2019).



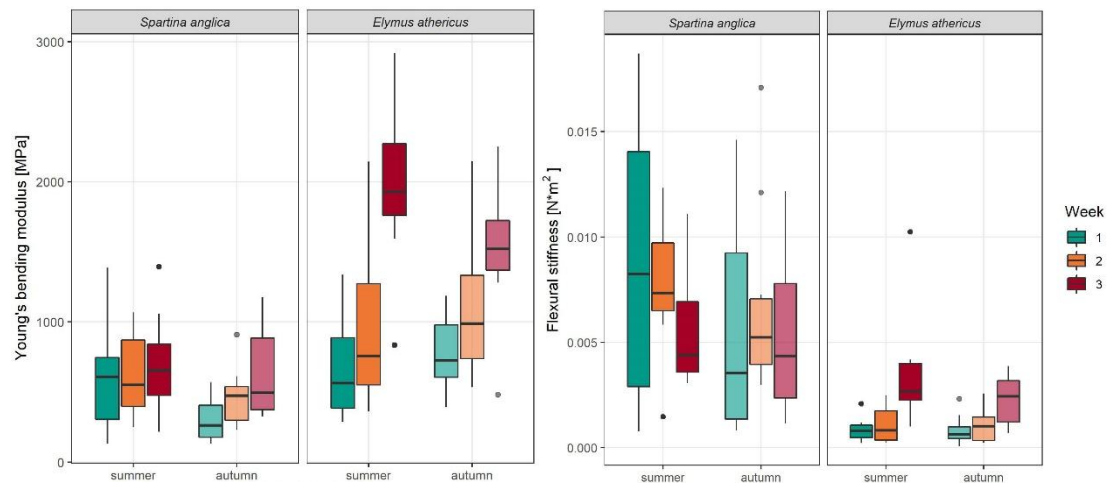
Figuur 4.3 Buigsterkte van vegetatie aan het begin van de winter (november 2016; linksboven) en het eind van de winter (maart 2016; rechtsboven) en buigstijfheid van de vegetatie aan het begin van de winter (november 2016; linksonder) en het eind van de winter (maart 2016; rechtsonder). Tests zijn uitgevoerd voor Aster (zeeaster; AST), *Elymus* (zeekweek; ELY), *Spartina* (Engels slijkgras; SPA) en *Suaeda* (schorrenkruid; SUA) (Vuik, 2017).

De verschillende studies waarin buigsterkte en buigstijfheid van vegetatie is beschouwd laten resultaten in dezelfde orde van grootte zien (Rupprecht et al., 2017; Vuik, 2017; Vuik et al., 2018; Schulze et al., 2019; Reents et al., 2020; Figuur 4.2 t/m Figuur 4.4; De afmetingen van kweldervegetatie zijn over het algemeen het grootst aan het einde van het groeiseizoen, waarna ze in de herfst en winter afnemen. Dit is duidelijk terug te zien in de bedekking, biomassa en dichtheid van metingen in de vastelandskwelders aan de kust van Groningen en Friesland (Figuur 3.1; Marin-Diaz et al., 2023). De vegetatiehoogte van de staande vegetatie blijft vrijwel gelijk nadat de maximale hoogte bereikt is. Desondanks neemt de vegetatiedichtheid af (en dus de fractie afgebroken vegetatie toe), waardoor de totale biomassa en dichtheid zal afnemen. Vuik et al. (2018) laat zien dat stengelhoogte en -dikte van *Spartina*



*anglica* (Engels slijkgras) en *Scirpus maritimus* (heen/zeebies) maximaal is aan het einde van het groeiseizoen in September (behalve hoogte van *Spartina anglica* (Engels slijkgras), deze is maximaal in November; Tabel 3.1; Tabel 3.2). In de semi-natuurlijke Marconi kwelder bij Delfzijl is zowel een toename als afname van vegetatie-afmetingen geobserveerd (Siegersma et al., submitted; Eekman, 2021). Vergelijkbare observaties zijn waargenomen in kwelders elders, bijvoorbeeld Verenigd Koninkrijk (Möller, 2006) en Duitsland (Schulze et al., 2019).

Tabel 3.1, Tabel 3.2 en Tabel 4.1). De buigstijfheid komt in de verschillende onderzoeken goed overeen (behalve een opvallende afwijking in Rupprecht et al., 2017), terwijl de buigsterkte meer afwijkt. Een enkele studie laat ook de variabiliteit van buigsterkte en buigstijfheid zien over de stengel (Rupprecht et al., 2015). Over het algemeen neemt de buigstijfheid af van de onderzijde naar de bovenzijde van de stengel, terwijl de buigsterkte toeneemt. Het is van belang om in acht te nemen dat de beschouwde vegetatie alleen de stengel behelst. Bij een aantal soorten, zoals *Elymus* (zeekweek) en *Aster* (zeeaster) is lager in de begroeiing ook blad te vinden dat onderdeel is van de plant (Figuur 4.5).



Figuur 4.4 Buigsterkte (links) en buigstijfheid (rechts) voor *Spartina anglica* (Engels slijkgras) en *Elymus athericus* (zeekweek) in zomer en herfst, gemeten onder invloed van golven over een periode van drie weken (Reents et al., 2020).

Tabel 4.1 Buigsterkte en buigstijfheid van vegetatie geplaatst in de golfgoot in Hannover (Rupprecht et al., 2017)

	Stem flexibility Young's bending Modulus [MPa] Mean	Stem flexibility Flexural rigidity [Nm <sup>2</sup> ×10 <sup>-5</sup> ] Mean
<i>Puccinellia</i> (Flume)	111.6±66.3	0.7±0.2
<i>Puccinellia</i> (Field)	284.5±369.1	2.1± 1.7
<i>Elymus</i> (Flume)	2696.3±1963.8	29.9±18.4
<i>Elymus</i> (Field)	2514.7±2977.1	56.9±20.7



Figuur 4.5 Blad aan onderzijde *Elymus athericus* (zeekweek; links), blad aan onderzijde en stengels *Elymus athericus* (zeekweek; rechts). (Adrie van Heerden via verspreidingsatlas.nl)

#### 4.1.2 Schade aan vegetatie door hoge golven

Schade aan vegetatie tijdens stormen leidt tot verlies van bovengrondse biomassa en verlaagt de resterende vegetatiedichtheid. Het gevolg is een afname van de golfdempende capaciteit van de kwelder, afhankelijk van de mate van schade aan de vegetatie. Daarom is het van belang om te kunnen kwantificeren onder welke hydrodynamische omstandigheden vegetatie zal afbreken en er zo schade aan vegetatie zal ontstaan en in welke mate dit zal zijn.

Een beperkt aantal studies heeft dit direct (metingen of experimenten) en indirect (gekalibreerd modellen) gekwantificeerd. Möller et al. (2014) en Rupprecht et al. (2017) laten middels een golfgootexperiment zien dat vegetatie afbreekt en biomassa verdwijnt onder medium tot hoge golven en medium orbitaalsnelheden. Opeenvolgende proeven met piek voorwaartse orbitaalsnelheden boven 0,4 m/s (tot 1 m/s) resulteerden in een verlies van 80% van bovengrondse *Elymus athericus* (zeekweek) over een periode van 11 dagen in deze studie. Dit werd met name veroorzaakt door de lage flexibiliteit van deze vegetatiesoort, aangezien er geen substantieel verlies van de flexibele soort *Puccinellia maritima* (kweldergras) werd geobserveerd. *Elymus athericus* stengels braken zo'n 5 tot 10 cm boven de bodem af. De vegetatie voor deze proef kwam van de Waddenzee kust in Oost Friesland, Duitsland.

In het veld is er beperkte data beschikbaar over verlies van vegetatie gedurende stormen. Impliciet zit het verlies van vegetatie wel in seizoenale metingen van vegetatie. Marin-Diaz et al. (2023) laat zien dat na het storm seizoen 2019-2020 van alle 9 gemeten vegetatie soorten nog vegetatie rechtop stond (gemeten bij Zwarte Haan, Holwerd, Dan Andel en Uithuizen). De maximaal gemeten significante golfhoogte op de zeevaartse kwelderrand gedurende het stormseizoen was 0,4 m tot 0,5 m. Van bijvoorbeeld *Elymus* (zeekweek) was bijna de helft van de dichtheid aan het einde van het stormseizoen nog intact (Figuur 3.1). De afname van vegetatiedichtheid, zal gedurende het seizoen niet alleen beïnvloed worden door hydrodynamiek, maar ook door andere belasting. De verwachting is dan ook dat meer vegetatie zal blijven staan wanneer een individueel event met hoge golven optreedt. In stormseizoen 2021-2022 kwamen meerdere stormen met relatief hoge golven voor (Corrie en drielingstorm Dudley, Eunice en Franklin). In het intergetijdegebied werden golven gemeten tot 1,03 m (RWS meetboeien Wierummerwad en Uithuizerwad). Terwijl de drielingstorm vrijwel aan het einde van het stormseizoen plaatsvond (2<sup>e</sup> helft februari) en vegetatie al langere tijd onder invloed stond van afbraakprocessen, bleek na visuele inspectie dat vegetatie tegen de

dijk grotendeels rechtop stond (Figuur 4.6). Na het betrekkelijk kalme stormseizoen 2022-2023 stond een deel van de vegetatie overeind en was een deel afgebroken of lag plat (Figuur 4.7).



*Figuur 4.6 Rechtopstaande vegetatie (vermoedelijk Phragmites (riet) en Elymus (zeekweek)) na drielingstorm Dudley, Eunice en Franklin februari 2022.*



Figuur 4.7 *Spartina anglica* (Engels slijkgras) op kwelders in de Westerschelde eind februari (linksboven) en eind maart (rechtsboven) en *Elymus athericus* (zeekweek) op Peazemerlannen (onder) na stormseizoen 2022-2023

Expliciete metingen voor en na stormen in het veld en in de golfgoot zijn zeer beperkt en zelfs afwezig voor golven hoger dan +/- 1 m. Middels een impliciete methode kan de fractie stengels die afbreekt onder invloed van golven berekend worden (Vuik et al., 2018). Het mechanisme dat deze rekenmethode in acht neemt is als volgt: zodra de buigspanning in de stengel ten gevolge van golven de buigsterkte van de stengel overschrijdt, breekt de stengel. De golven zorgen voor een roterende beweging in het water, de orbitaalbeweging. Dit resulteert in een maximale snelheid in het water en een maximale kracht ('drag force') op de stengels. Deze kracht levert een buigend moment en bijbehorende buigspanning in de stengel nabij de bodem, waarna de vegetatie knakt. Een uitgebreide beschrijving is terug te vinden in Vuik (2017) en Vuik et al. (2018).

De door golven veroorzaakte buigspanning is afhankelijk van een aantal variabelen:

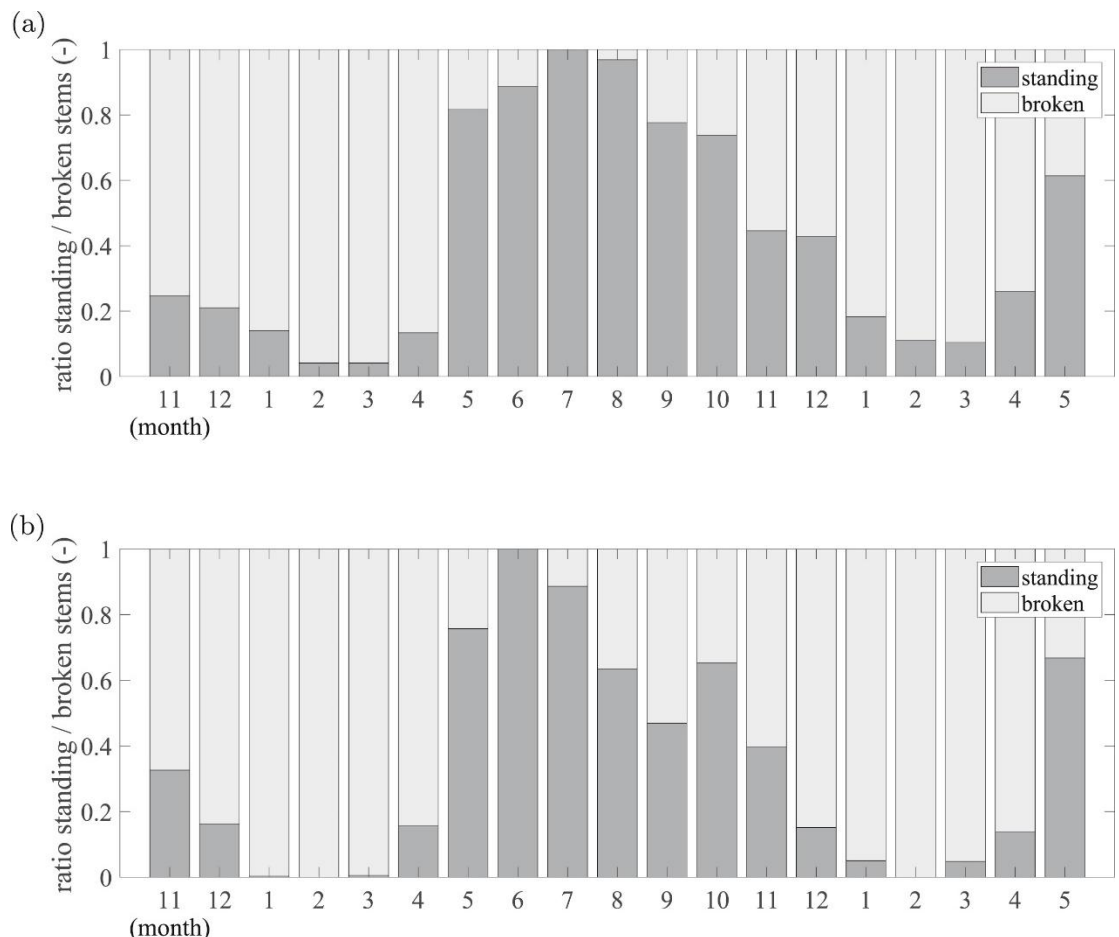
1. de orbitaalsnelheid  $u$  (m/s), die afhankelijk is van de golfhoogte, golfperiode en waterdiepte;
2. de dichtheid van water  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>);
3. de hoogte van de vegetatie  $h_v$  (mm);
4. de uitwendige en inwendige diameter van de holle, ronde stengels  $b_v$  (mm) en  $b_{v,in}$  (mm), die het oppervlaktetraagheidsmoment  $I$  (mm<sup>4</sup>) bepalen;
5. de buigfactor  $f_r$  (-) voor het bepalen van de effectieve hoogte van de stengels ( $h_{v,r} = (1-f_r) h_v$ );
6. de weerstandscoefficiënt  $C_D$  (-) voor de relatie tussen de kracht ('drag force',  $q_D$ ) en de snelheid van het water, die afhankelijk is van o.a. het frontale oppervlak van de plant;
7. de wrijvingscoëfficiënt  $C_F$  (-) voor de relatie tussen de wrijvingskracht langs het oppervlak van de gebogen plant ( $F_F$ ) en de snelheid van het bewegende water;
8. een correctiefactor  $A_c$  (-), die afgeregeld is om gemeten stengelbreuk en de door het model voorspelde stengelbreuk op elkaar af te stemmen ( $A_c = 1$  à  $2$ ). In deze correctiefactor die ook als kalibratiefactor gebruikt wordt, zitten processen als moeheid/progressieve schade en bescherming van het omliggende bladerdek.

De afleiding voor het bepalen van een kritische orbitaalsnelheid voor het afbreken van vegetatie wordt beschreven in Vuik et al. (2018). Deze kritische orbitaalsnelheid varieert van stengel tot stengel binnen een vegetatiesoort en wanneer men verschillende soorten vergelijkt. Dit komt door variaties in hoogte, diameter, buigstijfheid en buigsterkte. De formule voor de kritische orbitaalsnelheid (m/s) voor cirkelvormige, holle stengels, is als volgt:

$$u_{crit} = \sqrt{\frac{\sigma_{max} \pi (b_v^4 - b_{v,in}^4)}{8A_c \rho b_v^2 [C_D h_{v,r}^2 + 2\pi C_F (h_v - h_{v,r}) h_{v,r}]}} \quad \text{Vergelijking 4.1}$$

Wanneer deze vergelijking (of een variant voor driehoekige stengels) wordt toegepast op *Scirpus* (heen) en *Spartina* (Engels slijkgras), kan berekend worden welke fractie van de stengels blijft staan bij een bepaalde golfbelasting (Figuur 4.8; Vuik et al., 2018). De methode, die ontwikkeld is middels metingen aan *Scirpus* (heen) en *Spartina*, is ook succesvol gevalideerd middels *Elymus* door gebruik te maken van data uit Möller et al. (2014) en Rupprecht et al. (2017). Deze validatie laat zien dat het model breed toepasbaar is op andere kweldervegetatiesoorten.

Dit soort berekeningen leiden tot de conclusie dat een groot deel van de stengels afbreekt in de winter. Maar ondanks dat golfenergie gedurende het jaar natuurlijk verschilt van jaar tot jaar, is na het stormseizoen (2022-2023) te zien dat *Spartina anglica* (Engels slijkgras) op de kwelderrand daarentegen voor een groot deel nog overeind staat (Figuur 4.7). Dit geeft aan dat de formules nog niet perfect zijn en kalibratie vergen.



Figuur 4.8 Herberekende fractie staande en afgebroken stengels voor *Spartina anglica* (Engels slijkgras) bij Hellegat, Westerschelde (boven) en *Scirpus maritimus* (heen) bij Bath, Westerschelde (onder) in de periode november 2014 – mei 2016, gebaseerd op metingen van golfdemping (Vuik et al., 2018).

Bovenstaande rekenmethode is ook toegepast om het afbreken van vegetatie rondom de Waddenzee te berekenen op vier locaties (Vuik, 2017):

1. Noorderzijlvest, Dollard
2. Noorderzijlvest, Noordpolderzijl
3. Fryslan, Paessens
4. Fryslan, Noord-Friesland Buitendijks

Het afbreken is berekend voor condities met een overschrijdingskans van 1/100 jaar (orbitaalsnelheid bij de bodem +/- 1.0 m/s) en met een overschrijdingskans van 1/4000 jaar (orbitaalsnelheid bij de bodem +/- 1.2 m/s). In wintertoestand (november, maart), zal de vegetatie volgens de formules grotendeels afbreken. Wel zal *Elymus* (zeekweek) deels blijven staan, door de hoge buigsterkte van deze soort (Figuur 4.2 en Figuur 4.3, 4.3; Tabel 4.2 en Tabel 4.3).

Tabel 4.2 Inschatting van het percentage afbrekende vegetatie bij 1/4000 per jaar condities bij locatie 4, berekend op basis van de waarde van de optredende orbitaalsnelheid van 1.24 m/s binnen de kansverdeling van de kritische orbitaalsnelheid. Voor Aster (zeeaster; AST), *Elymus* (zeekweek; ELY), *Spartina* (Engels slijkgras; SPA) en *Suaeda* (schorrenkruid; SUA) (Vuik, 2017).

Maand	Maart	Juni	Augustus	November
AST	90%	0%	60%	95%
ELY	42%	50%	100%	93%
SPA	61%	100%	100%	100%
SUA	87%	0%	60%	70%

Tabel 4.3 Inschatting van het percentage afbrekende vegetatie bij 1/100 per jaar condities bij locatie 4, berekend op basis van de waarde van de optredende orbitaalsnelheid van 1.05 m/s binnen de kansverdeling van de kritische orbitaalsnelheid. Voor Aster (zeeaster; AST), *Elymus* (zeekweek; ELY), *Spartina* (Engels slijkgras; SPA) en *Suaeda* (schorrenkruid; SUA) (Vuik, 2017).

Maand	Maart	Juni	Augustus	November
AST	80%	0%	53%	84%
ELY	23%	30%	95%	93%
SPA	52%	95%	100%	100%
SUA	60%	0%	53%	50%

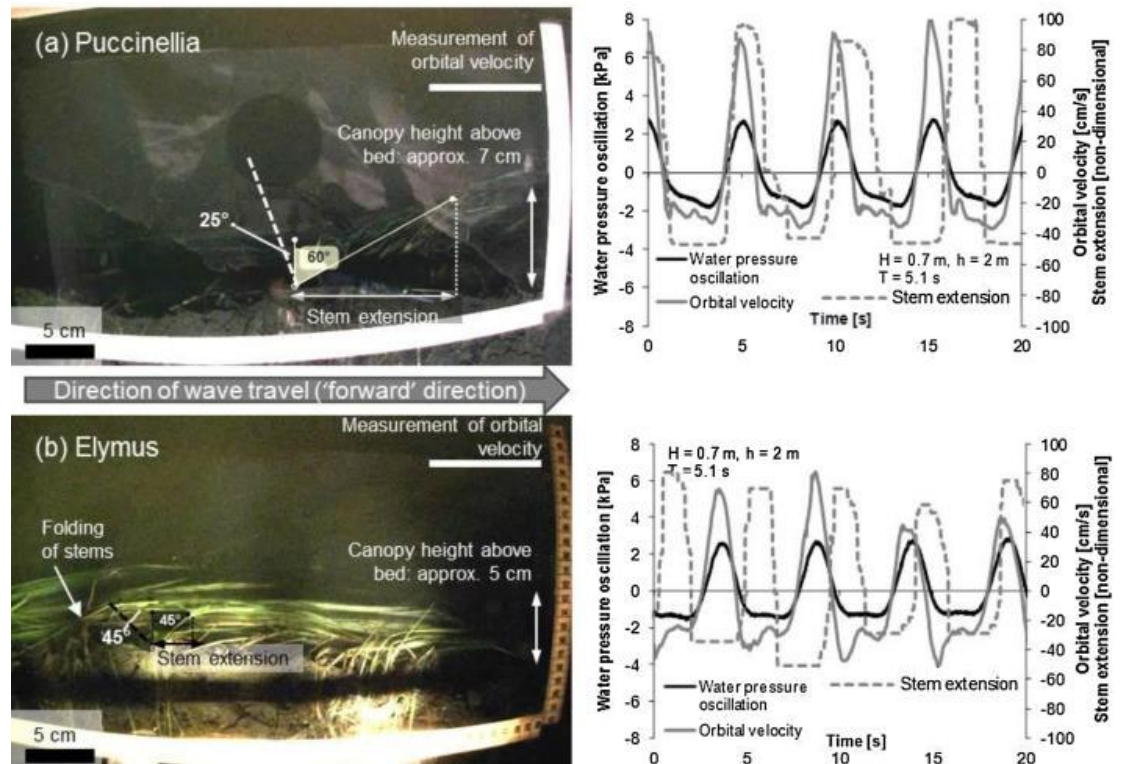
#### 4.1.3 Veranderlijk gedrag van vegetatie onder hoge golven

De vegetatie zal tijdens golfbelasting gaan buigen en bij te grote golven gaan afbreken. Maar de vraag is of de aanname wel correct is dat de planten solitair overeind staan en bij te grote krachten door de orbitaalbeweging breken. We zien dat bij sommige soorten, zoals *Elymus* (zeekweek; Figuur 4.5), het bladerdek ook invloed heeft op de belasting van de stengels.

Rupprecht et al. (2017), laat zien dat *Elymus* (zeekweek) en *Puccinellia* (kweldergras met beperkte hoogte), wiegend gedrag tonen onder lage orbitaalsnelheden (10.0 cm/s tot 31.6 cm/s). Onder gemiddelde orbitaalsnelheden (41.6 cm/s tot 62.7 cm/s) klappen *Elymus* stengels om op een hoogte van ongeveer 8 cm. Het onderste deel staat onder een hoek van zo'n 30 graden en het bovenste omgeklapte deel onder een hoek van 80 à 90 graden. De kortere *Puccinellia* vegetatie blijft meer rechtop staan, onder een hoek van zo'n 50 graden. Vanaf orbitaalsnelheden van 62.7 cm/s zal de beweging van *Puccinellia* veranderen van zwaaiend naar een zweepachtige beweging. Onder hoge orbitaalsnelheden (74.3 cm/s tot 90.9 cm/s) laten zowel *Elymus* als *Puccinellia* een zweepachtige beweging zien (Figuur 4.9). De

*Puccinellia* en *Elymus* vegetatie ligt vervolgens als een dik deken op de bodem. De invloed van de vegetatie op orbitaalsnelheden van de golven (vegetatie-golfinteractie) is groter bij *Puccinellia*. Dit is zelfs het geval na 8 testdagen, waarin een deel van de biomassa van *Elymus* weggeslagen is. Orbitaalsnelheden zijn 20% lager in *Elymus* in vergelijking met *Puccinellia*.

Deze paragraaf 4.1 geeft deels antwoord op vraag 6 van Diederik, met name gericht op het gedrag van verschillende vegetatiesoorten onder invloed van golven.



Figuur 4.9 Interactie van vegetatie en golven onder hoge orbitaalsnelheden (76 cm/s; waterdiepte is 2.0 m; golfhoogte is 0.7 m). Waterdruk (linker y-as), orbitaalsnelheid en uitwijking (rechter y-as; positief in de richting van de golven). *Puccinellia* wordt getoond in de bovenste afbeelding en grafiek; *Elymus* onder (Rupprecht et al., 2017).

## 4.2 Voorbeeldberekening schade aan vegetatie door afbreken

De fractie afgebroken stengels kan berekend worden middels bestaande data voor verschillende waterdieptes en golfhoogtes. Dit kan bijvoorbeeld uitgevoerd worden voor *Elymus athericus* (zeekweek). Door gebruik te maken van lineaire golftheorie om orbitaalsnelheden onder verschillende waterdieptes en golfhoogtes te berekenen, kan een vergelijking worden gemaakt met de kritische orbitaalsnelheid en het eventuele afbreken van vegetatie. Binnen dit model wordt afbreken van stengels expliciet en alleen beschouwd. Andere biomassa als blad (zie bijvoorbeeld Figuur 4.9), wordt niet beschouwd, maar kan wel van invloed zijn op golven.

De vegetatie eigenschappen zijn representatief voor de start van de winter (observaties november) en voor het einde van de winter (observaties maart) (Tabel 4.4). Waterdieptes van 2 m en 4 m zijn gebruikt, golven tussen 0.8 m en 2.0 m en golfsteilheden van 0.02 en 0.08. Golfhoogte / waterdiepte ratio's zijn beperkt tot 0.5, aangezien het aannemelijk is dat grotere ratio's niet voorkomen.

*Elymus* (zeekweek) stengels aan het begin van de winter (november) breken bij een waterdiepte van 4.0 m af voor 60% bij een golfhoogte van 0.8 m en voor 98% bij een golfhoogte van 2.0 m (Tabel 4.5). De berekeningen suggereren dat alle stengels afbreken bij ontwerpcondities en een veld met stoppels en liggend blad overblijft.

Aan het einde van de winter lijkt de vegetatie volgens de berekeningen beter bestand tegen de golven. Bij een waterdiepte van 4.0 m breekt slechts 2% af bij een golfhoogte van 0.8 m en 69% bij een golfhoogte van 2.0 m.

Voor waterdiepte van 2.0 m en een golfhoogte van 0.8 m breekt aan het begin van de winter 65% van de stengels af en aan het einde van de winter 9% volgens de berekeningen.

De verschillen tussen november en maart kunnen verklaard worden door een gemiddeld lagere stengel lente (lange stengels zijn gedurende het winterseizoen afgebroken), en een hogere buigsterkte en buigstijfheid wellicht door het verhouten van vegetatie.

Het is enerzijds onzeker of bovenstaande berekeningen kloppen, gezien alle aannames die er aan ten grondslag liggen, het extrapoleren van het model naar niet eerder gemeten extreme golfhoogtes, en ten slotte is het onzeker wat er overblijft van de vegetatie.

Tabel 4.4 Observaties van vegetatie eigenschappen van *Elymus athericus* (zeekweek) in november en maart. Gemiddelde +/- standaard afwijking (aantal samples).

	november	maart
	begin winter	einde winter
Lengte (cm)	77 ± 13 (180)	50 ± 14 (120)
Diameter (mm)	2.1 ± 0.4 (15)	1.3 ± 0.2 (19)
Dichtheid (stengels/m <sup>2</sup> )	637 ± 220 (36)	405 ± 339 (24)
Buigsterkte (MPa)	13.3 ± 6.9 (15)	219.7 ± 91.0 (19)
Buigstijfheid (x1000 Nmm <sup>2</sup> )	1.1 ± 0.6 (15)	4.5 ± 1.1 (19)
Kritische orbitaalsnelheid (m/s)	0.7 ± 0.4 (15)	1.3 ± 0.4 (19)

Tabel 4.5 Fractie afgebroken stengels berekend middels vergelijking 4.1.

									maand	maart	nov.
									mu	1.35	0.71
									sigma	0.37	0.39
h	Hm <sub>0</sub>	Hm <sub>0</sub> /L	L	k	omega	Tp	u	u <sub>shallow</sub>	conditie	maart	nov.
4	0.8	0.02	40	0.16	0.93	6.8	0.55	0.63	1	2%	34%
4	1.4	0.02	70	0.09	0.55	11.4	1.05	1.10	2	21%	81%
4	2.0	0.02	100	0.06	0.39	16.1	1.53	1.57	3	69%	98%
4	0.8	0.04	20	0.31	1.62	3.9	0.40	0.63	4	1%	21%
4	1.4	0.04	35	0.18	1.04	6.0	0.93	1.10	5	13%	72%
4	2.0	0.04	50	0.13	0.76	8.3	1.44	1.57	6	60%	97%
2	0.8	0.02	40	0.16	0.68	9.2	0.86	0.89	7	9%	65%
2	0.8	0.04	20	0.31	1.31	4.8	0.78	0.89	10	6%	58%

## 4.3 Toepassing

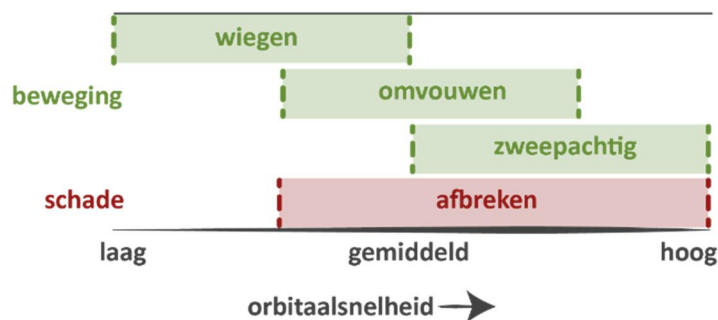
Rupprecht et al. (2017) laat zien dat het gedrag van vegetatie verandert naarmate orbitaal-snelheden groter worden. Logischerwijs is dit van invloed op de interactie van stroming en vegetatie. En kan dit van invloed zijn op hoe vegetatie het beste te representeren is in



numerieke modellen onder verschillende hydrodynamische omstandigheden. Men kan denken aan een representatie van vegetatie middels een cilinderbenadering, ruwheidsveld, alsook een poreus medium dat op de bodem ligt.

Naar aanleiding van proeven met *Elymus* (zeekweek) en *Puccinellia* (kweldergras) kan de volgende hypothese worden gesteld: (1) onder lage orbitaalsnelheden zal vegetatie wiegen en licht doorbuigen, (2) onder gemiddelde orbitaalsnelheden zal vegetatie sterker doorbuigen, omvouwen en ook gaan afbreken, (3) onder hoge orbitaalsnelheden zal vegetatie plat op de bodem liggen, afbreken, alsook een meer zweepachtige beweging tentoonspreiden (Figuur 4.10).

Tijdens het experiment in de Deltagoot (zie hoofdstuk 8) zal de exclusieve bijdrage van vegetatie aan golfdemping en vervorming van spectrum bepaald worden en tegelijkertijd is het streven om het gedrag van de vegetatie tijdens het experiment te observeren. Tussen de verschillende runs zal de staat van de vegetatie en afgebroken biomassa gekwantificeerd worden.



Figuur 4.10 Hypothese beweging vegetatie onder orbitaalsnelheden door golven

Een experiment in de Deltagoot is beperkt tot één dominante vegetatiesoort. Het buigen en vervolgens afbreken van vegetatie zal per vegetatiesoort verschillen. Door het bepalen van buigsterkte en buigstijfheid van vegetatie en de relatie tussen buigsterkte en buigstijfheid kan bepaald worden in welke mate de vegetatiehoogte door buiging reduceert en in welke mate vegetatie afbreekt (Vuik, 2017). Observaties tijdens het Deltagootexperiment kunnen de te kiezen waarden voor de vegetatie verbeteren. Daarnaast kan het afbreken onder verschillende orbitaalsnelheden beter geverifieerd worden. Door eerdere metingen van de buigsterkte en buigstijfheid van vegetatie, kan ook andere vegetatie meegenomen worden in verbeterde modellen en relaties voor buigen en afbreken.

In de Deltagoot (zie hoofdstuk 8) gaat specifiek voor dit onderwerp het volgende gemeten worden (zie vraag 4 van Roy):

- Golfcondities op drie locaties boven de begroeide kwelder
- Orbitaalsnelheid bij de bodem
- Vegetatiedichtheid en hoogte, zowel voor als na elke proef, zodat hiermee de relatie tussen de schade door de golfbelasting gelegd kan worden

Deze informatie levert ook de benodigde input voor de kalibratie van de Vegetatiemodule van Swan. De input voor Swan staat in meer detail beschreven in hoofdstuk 5.

In paragraaf 8.4 is uitgelegd dat bewust is gekozen voor het steken van de kweldervegetatie aan het eind van het groeiseizoen en het uitvoeren van de proeven in het aansluitende winterseizoen.

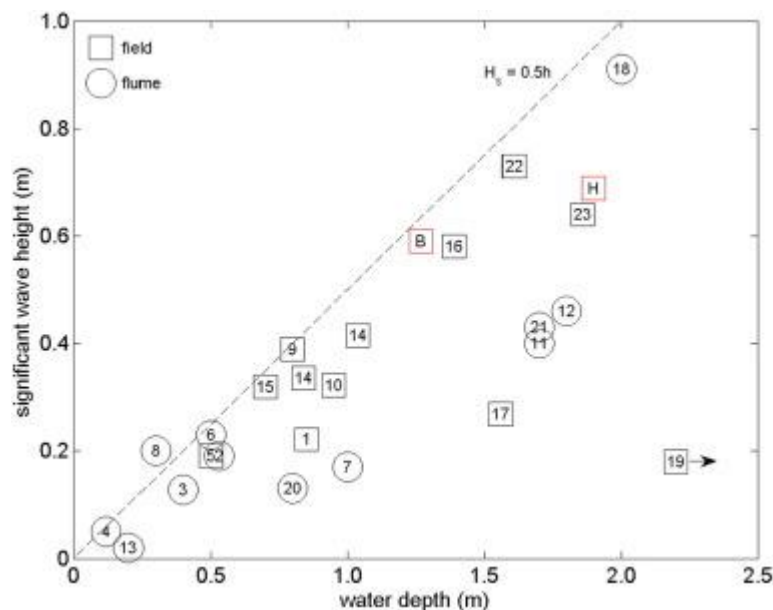
Deze paragraaf geeft antwoord op vraag 1 van Roy en vraag 8 van Diederik.

## 5 Invloed van vegetatie op golfcondities

### 5.1 Huidige stand van de kennis

Golfenergie over kwelders en begroeide vooroevers, is een resultaat van drie processen: (1) diepte gedreven golfbreking, (2) dissipatie van golfenergie door bodem frictie, en (3) verlies van golfenergie door een vegetatieveld. Het breken van de golven door de beperkte diepte heeft de grootste invloed op de golfcondities, maar de invloed van de vegetatie kan daaraan een relevante bijdrage leveren. Een steeds groeiende verzameling van literatuur in de afgelopen grofweg 20 jaar laat deze invloed van vegetatie op golfcondities zien. Literatuur laat zien dat kustbescherming door kust ecosystemen niet als lineair aangenomen kan worden. De natuurlijke dynamiek en variatie zorgt voor drempelwaardes, limiterende functies en een sterke niet-lineariteit (bijvoorbeeld Koch et al., 2009).

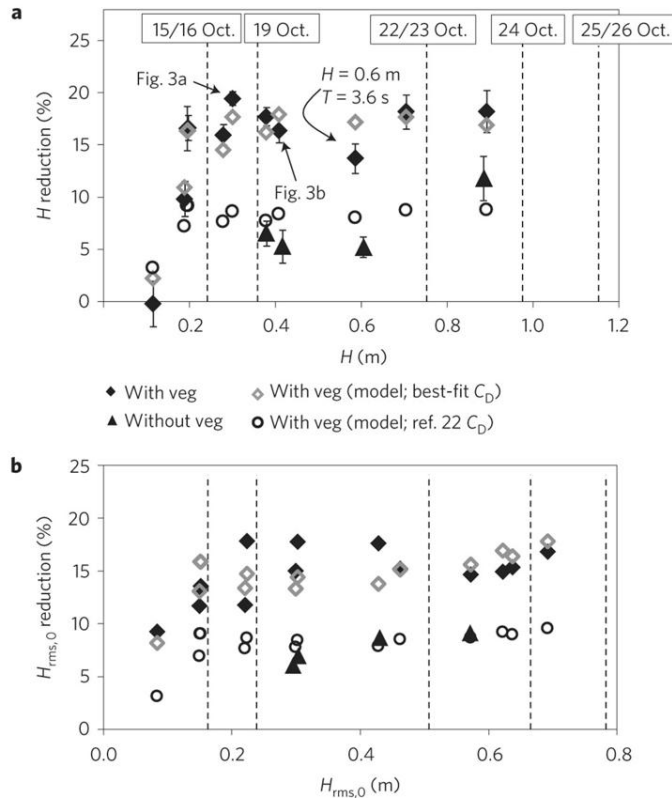
Invloed van vegetatie op golfcondities is gemeten in het veld en in het lab onder een verscheidenheid aan condities. Vuik et al. (2016) geeft een overzicht van inkomende golfhoogtes die gemeten zijn (Figuur 5.1). In deze studies zijn golfhoogtes gemeten op de kwelderrand tot 0.69m (waterhoogte is 1.9 m), alsook lagere golfhoogtes met een verscheidenheid aan waterdieptes. Onder de grootst gemeten golfhoogte werd op de twee beschouwde locatie een afname van de golfhoogte van meer dan 50% geobserveerd over een kwelderbreedte van ongeveer 55 m. Uiteraard is deze demping een integraal van alle dempingsprocessen, inclusief kwelderprofiel. Zhu et al. (2020) laat bij Uithuizen (Waddenzee) zien dat een golfhoogte van 0.85 m op de kwelderrand over enkele honderden meters afneemt tot een golfhoogte van 0.37 m aan de teen van de dijk. Over een gelijke lengte neemt de golf van 1.07 m tot 0.88 m af op een naburige locatie zonder kwelder.



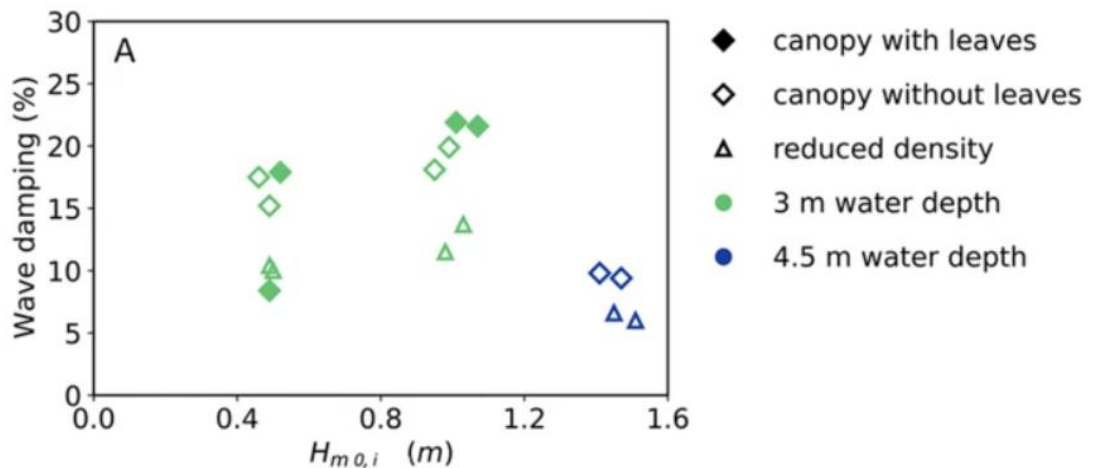
Figuur 5.1. Gemeten golfhoogtes en waterdieptes, beschreven in wetenschappelijke literatuur. Voor metingen onder regelmatige golfhoogte is de significante golfhoogte berekend middels:  $H_s = 1.41H$ . De gestreepte lijn geeft grofweg de diepte limitatie van golven door breking weer (Vuik et al., 2016).

In het lab zijn studies uitgevoerd die golfdemping onder gecontroleerde condities laten zien. De golfhoogte in experimenten met kwelders blijft beperkt tot 0.9 m (Möller et al., 2014). In dit real-scale experiment varieerde de golfdemping over een kwelderbreedte van 40m tussen 12% en 20% afhankelijk van de hydrodynamische condities. De hoogste regelmatige golf van 0.9 m

( $h = 2.0$  m) werd gedempt met 17%. Na afmaaien van vegetatie blijkt dat tot golfhoogtes van zo'n 0.2 m tot 0.4 m 60% van de demping werd veroorzaakt door de vegetatie tot 40% wanneer golven ( $H_{rms,0}$ ) werden verhoogd tot 0.6 m (Figuur 5.2). Uiteraard is in deze proeven forcering door wind niet meegenomen. Aangenomen kan worden dat deze bijdrage ook minimaal zal zijn over een kwelderlengte van 40 m.



Figuur 5.2. Percentage golfhoogtereductie onder regelmatige (boven;  $H$ ) en onregelmatige golven (onder;  $H_{rms,0}$ ). Errorbars refereren naar gemiddeld  $\pm 1$  standaard deviatie.



Figuur 5.3. Damping van significante golfhoogte door een wilgenbos van 40 m (Van Wesenbeeck et al., 2022).

Meer recent is een experiment uitgevoerd in de Deltagoot met wilgen (Van Wesenbeeck et al., 2022). Golfdemping in een waterdiepte van 3.0 m resulteerde in een maximum demping van 22% over 40 m (Figuur 5.3). Golfdemping in een waterdiepte van 4.5 m met een significante golfhoogte van zo'n 1.5 m was maximaal 10% over 40 m (zonder blad). Van Wesenbeeck et al. (2022) geeft aan dat de demping onder grotere waterdieptes met name werd veroorzaakt

door de dunnere top van de wilgen; de takken die meer flexibel zijn en waar meer doorbuiging werd geobserveerd, vergelijkbaar met kweldervegetatie.

Veldmetingen en labexperimenten laten zien dat de invloed van vegetatie op golfenergie niet alleen afhankelijk is van vegetatiekarakteristieken als vegetatie hoogte, diameter en dichtheid, maar ook afhankelijk van hydrodynamische karakteristieken als golfhoogte en waterdiepte (Möller et al., 2014; Van Wesenbeeck 2022). De invloed van vegetatie op golfhoogte is dus veranderlijk alsook de invloed van golven op het gedrag van vegetatie en daarmee golfdemping door vegetatie (zie ook hoofdstuk 4). Ten gevolge, kan een numerieke model benadering voor het voorspellen van golfdemping door vegetatie gedurende normale (e.g. maandelijks/jaarlijkse) condities niet geëxtrapoleerd en gebruikt worden voor meer extreme situaties. Bovenstaande alinea's in deze par. 5.1 geven schetsen in antwoord op vraag 6 van Diederik.

Numerieke modellen kunnen gebruikt worden om golfdemping door vegetatie te berekenen middels (1) een verhoogde coëfficiënt voor bodemruwheid/bodemfrictie of (2) een meer expliciete benadering waarin de vegetatie karakteristieken meegenomen worden middels een verzameling cilinders. In deze laatste benadering worden relevante fysische processen ook meer expliciet meegenomen. In deze modellen worden processen als drukverschillen en oppervlakte frictie gevangen in een bulk drag coëfficiënt ( $C_D$ ). Ook worden allerlei andere processen meegenomen in de bulk drag coëfficiënt (bijvoorbeeld gedrag van vegetatie als heen en weer wiegen). Daarnaast bevat deze  $C_D$  coëfficiënt ook processen die afwezig zijn in de modelformuleringen aangezien deze coëfficiënt berekend wordt en veelal als kalibratie parameter wordt gebruikt. Ondanks dat de  $C_D$  waarde afhankelijk is van lokale vegetatie karakteristieken en hydrodynamica, relateren veel studies  $C_D$  aan het Reynolds getal  $Re$  en het Keulegan-Carpenter getal  $K$  (bijvoorbeeld Méndez et al., 1999; Mendez and Losada, 2004). Vuik et al. (2016) laat een overzicht zien van een aantal relaties tussen  $C_D$  en  $Re$ .

Het spectrale golfmodel SWAN is geschikt en een veelgebruikt numeriek model om golfdemping door begroeide vooroevers te kwantificeren. De evolutie van het golfspectrum wordt beschreven in de "spectral action balance equation" (Hasselmann et al., 1973). De invloed van bodemruwheid kan in SWAN meegenomen worden middels drie formuleringen (JONSWAP, Collins, Madsen et al.), Madsen et al. (1988) is veelgebruikt om vegetatie middels een bodemruwheid te benaderen. In het model van Madsen et al. (1988) is de bodem frictie coëfficiënt een functie van bodem ruwheidshoogte en voorkomende golfcondities. Zo kan demping door vegetatie impliciet worden meegenomen. De bodem frictie coëfficiënt is (Deltares 2023):

$$C_{bottom} = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms} \quad \text{Vergelijking 5.1}$$

Hierin is  $f_w$  een dimensieloze frictie factor die berekend kan worden middels:

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + {}^{10} \log \left( \frac{1}{4\sqrt{f_w}} \right) = m_f + {}^{10} \log \left( \frac{a_b}{K_N} \right) \quad \text{Vergelijking 5.2}$$

Hierin is  $m_f = -0.08$  en  $a_b$  is een representatieve bodem excursie amplitude.  $K_N$  is de bodem ruwheids-lengte schaal. Middels deze bodem ruwheids-lengte schaal, de Nikuradse coëfficiënt, kan een vegetatieveld gerepresenteerd worden in bovenstaande vergelijkingen.

Golfdemping door vegetatie kan expliciet meegenomen worden door een source term (Dalrymple et al., 1984; Méndez & Losada, 2004; Suzuki et al., 2012):

$$S_{ds,veg} = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} g^2 \tilde{C}_D b_{veg} n_b \left( \frac{\tilde{k}}{\sigma} \right) \frac{\sinh^3 \tilde{k} h_{veg} + 3 \sinh \tilde{k} h_{veg}}{3k \cosh^3 \tilde{k} h} \sqrt{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad \text{Vergelijking 5.3}$$

Hierin is  $\tilde{C}_D$  de drag coëfficiënt,  $b_{veg}$  de stengel diameter van vegetatie,  $n_b$  de vegetatiedichtheid,  $\tilde{k}$  het gemiddelde golf getal,  $\tilde{\sigma}$  de gemiddelde frequentie,  $h_{veg}$  de vegetatiehoogte,  $E_{tot}$  de totale golfenergie en  $E(\sigma, \theta)$  de energie over golf frequentie en richting.

Jacobsen et al. (2019) heeft de expliciete methode aangepast door frequentie afhankelijke dissipatie door vegetatie mee te nemen die toegepast kan worden op meerdere lagen in de verticaal. Deze methode is verder verkend door flexibiliteit van vegetatie in een frequentie afhankelijke reductie factor mee te nemen (Ascencio, 2020). Beide methodes laten een verbetering zien in de berekening van golfreductie over en door vegetatie. Ascencio (2020) laat ook een goede overeenkomst zien van zijn SWAN model met BE SAFE metingen ( $H_s < 1.0$  m) tijdens stormen in de Waddenzee over kwelders bij Uithuizen.

SWAN is in verschillende studies gebruikt om golfdemping over Nederlandse kwelders in de Waddenzee en Westerschelde te berekenen. Vuik et al. (2016), heeft de golfdemping berekend voor golfhoogtes van 1.5 m, variabele waterdieptes (1.0 m tot 4.0 m) en variabele kwelderlengte (0 m tot 800 m) met en zonder vegetatie (vegetatie in november staat; expliciete cilinderbenadering). 200 m kwelderlengte resulteert zonder vegetatie in een demping tussen 0% en 20%, terwijl meer dan 40% van de golfhoogte gedempt wanneer vegetatie wordt meegenomen. Willemsen et al. (2020) vergelijkt kwelders zonder vegetatie, onder dagelijkse omstandigheden (vegetatie middels expliciete cilinderbenadering) en extreme omstandigheden (stoppels middels impliciete benadering). Variabele kwelderlengtes over een periode van 65 jaar zijn meegenomen in de berekeningen en laten onder extreme omstandigheden een minimale golfdemping van 6% tot 12% zien op kwelders aan de noordzijde van de Westerschelde. Kwelders aan de zuidzijde van de Westerschelde laten een demping tussen 3% en 27% zien. De lage waarden worden met name veroorzaakt door transecten met erg korte kwelders van soms maar enkele meters tot een tiental meters. Zowel Vuik et al. (2016) als Willemsen et al (2020) hebben geen windforcering opgenomen in de SWAN runs. Expliciete bijdrages van vegetatie zijn alleen bepaald onder dagelijkse condities, waar een bijdrage van enkele tientallen procenten is berekend. Van der Reijden (2019), laat zien dat op een lang voorland (Noarderleech, Friesland) de bijdrage van vegetatie aan golfdemping tussen 6% en 9% ligt. Vegetatie is in deze studie gemodelleerd middels een impliciete benadering met een Nikuradse coefficient ongeveer gelijk aan kwelders gedurende orkaan condities (c.f. Wamsley et al., 2010).

Zowel lab- en veldmetingen, als modelstudies laten een variabiliteit zien van golfdemping door kwelders en vegetatie onder verschillende hydrodynamische omstandigheden. In het veld en lab zijn golfhoogtes geobserveerd lager dan +/- 1.0 m. Dit betekent beperkte al dan niet afwezige data voor demping van vegetatie onder extreme golven. Alleen al in SWAN modellen zijn er tal van mogelijkheden om het effect van vegetatie mee te nemen. Dit betekent minimaal even zoveel mogelijkheden voor keuzes van parameter waarden voor deze modellen die ook nog eens kunnen variëren onder verschillende omstandigheden. Een eerste scan van de het resultaat van meenemen van verschillende parameterwaarden en processen wordt getoond in par. 5.2. Zowel in deze paragraaf 5.1 als in paragraaf 5.2 is ingegaan op opmerking 1 van Robert/Myron.

## 5.2 Voorbeeldberekening met SWAN

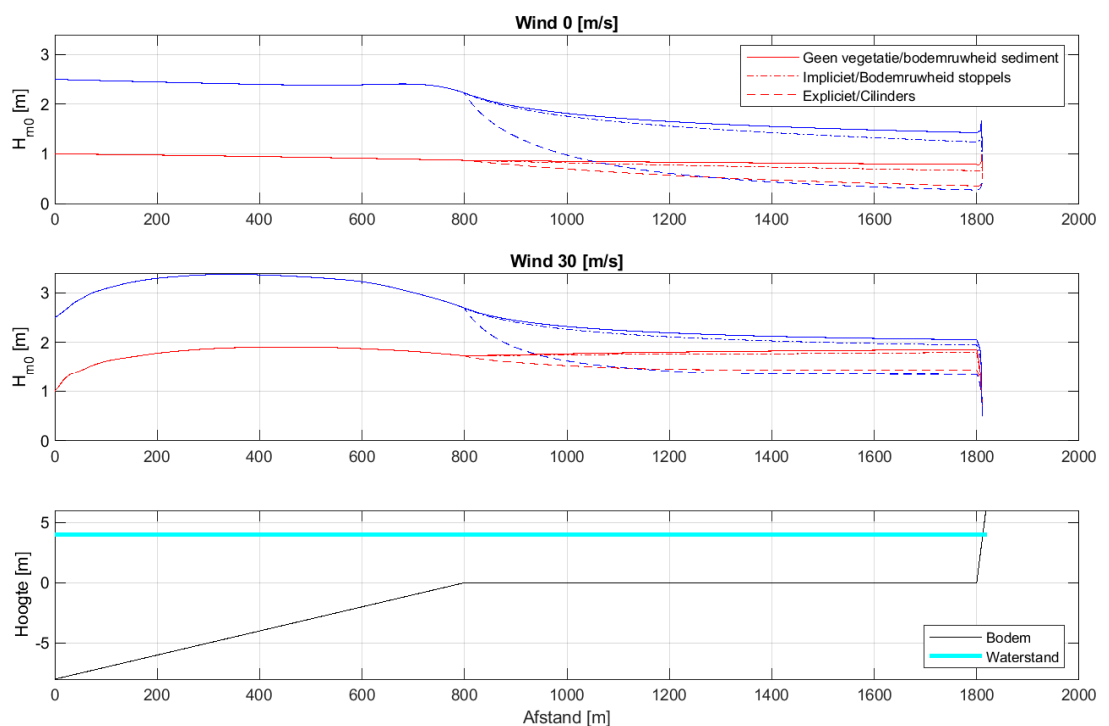
Door middel van SWAN berekeningen met en zonder vegetatie kan een inschatting worden gemaakt van het effect van vegetatie op het golfveld op het voorland voor de dijk. Twee veelgebruikte methoden hiervoor zijn de impliciete (toepassen van een verhoogde ruwheid) en expliciete (cilinder modellering) methode, zie paragraaf 5.1.

Een academische 1D testcase is opgezet met een hellend 1:100 voorland dat van relatief diep water (-8 m) naar de rand van de kwelder (0 m) loopt, bij een waterstand van respectievelijk +2 m en +4 m. De kwelder heeft een lengte van 1 kilometer en sluit aan op een dijk met een talud van 1:3. Een gridgrootte van 1 meter is gebruikt en de BOI SWAN instellingen zijn aangehouden (Rijkswaterstaat, 2021). Uitzondering hierop zijn de berekeningen zonder wind, hier zijn de quadruplets (niet-lineaire golfwisselwerkingen) uitgeschakeld.

Drie type berekeningen zijn gemaakt:

1. zonder vegetatie (een ruwheid van  $kN=0.001$  op het gehele domein),
2. met een verhoogde ruwheid op de kwelder  $kN=0.05$  (kwelder met afgebroken vegetatie waar stoppels resten; en  $kN=0.001$  op de rest van het domein) en
3. met de expliciete cilinder modellering op de kwelder met vegetatie karakteristieken na het groeiseizoen (en  $kN=0.001$  op de rest van het domein) (zie vraag 4 van Vincent).

Voor dit laatste is een vegetatiedichtheid van 1113 stengels/m<sup>2</sup>, stengeldiameter van 1.7 mm, vegetatiehoogte van 70 cm en een bulk drag coefficient van 0.6 aangehouden (Suzuki & Arikawa 2010; Möller et al., 2014; Vuik et al., 2016; Vuik, 2017; Willemsen et al., 2020; Marin-Diaz et al., 2023). De verwachting is dat het effect van de vegetatie op het golfveld varieert voor verschillende omgevingscondities. Om dit in beeld te brengen zijn berekeningen gemaakt met een windsnelheid van 0 en 30 m/s, een waterstand van 2 en 4 m en 'offshore' significante golfhoogtes van 1, 1.5, 2 en 2.5 m op basis van een JONSWAP spectrum met een golfsteilheid van 5%.



*Figuur 5.4 Significante golfhoogtes voor SWAN berekeningen zonder vegetatie, met verhoogde ruwheid en met de cilinder modellering. De blauwe en rode lijn in de bovenste twee panelen geven een 'offshore' golfhoogte weer van 2.5 en 1 meter respectievelijk. Het onderste paneel geeft de bodem en waterstand (4 m) weer.*

Figuur 5.4 geeft de ruimtelijke resultaten weer van de significante golfhoogte voor de drie type vegetatie berekeningen. Een waterstand van 4 meter op de kwelder is beschouwd. Duidelijk te zien is dat de golfhoogte op de kwelder afneemt. Voor de berekeningen met vegetatie neemt de golfhoogte nog sterker af (zie vraag 1 van Robert/Myron). Opvallend is de enorme afname in golfhoogte voor de berekeningen met de cilinder modellering (de gestreepte lijn). Opgemerkt

wordt dat op ondiep water, een waterstand van 2 meter op de kwelder, vrijwel alle golfbreking plaatsvindt voor/op de rand van de kwelder. Alle verschillende offshore golfhoogtes nemen daardoor af tot praktisch dezelfde golfhoogte (~1 m).

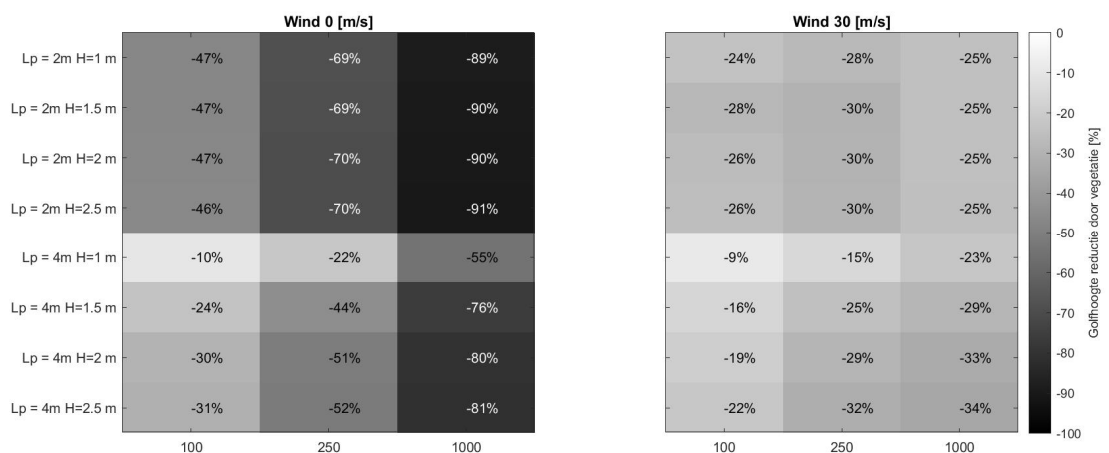
Figuur 5.5 en Figuur 5.6 geven de golfreductie door vegetatie weer van de gehele testmatrix op 100, 250 en 1000 meter vanaf de kwelerrand voor expliciete en impliciete vegetatie modellering respectievelijk. Opgemerkt wordt dat de golfhoogtereductie door dieptebeperking in alle type berekeningen aanwezig is en hier dus enkel de 'extra' golfhoogtereductie door vegetatie wordt beschouwd. De golfhoogte reductie is berekend volgens:

$$dH = \frac{H_{vegetatie} - H_{geen\ vegetatie}}{H_{geen\ vegetatie}} \cdot 100\% \quad \text{Vergelijking 5.4}$$

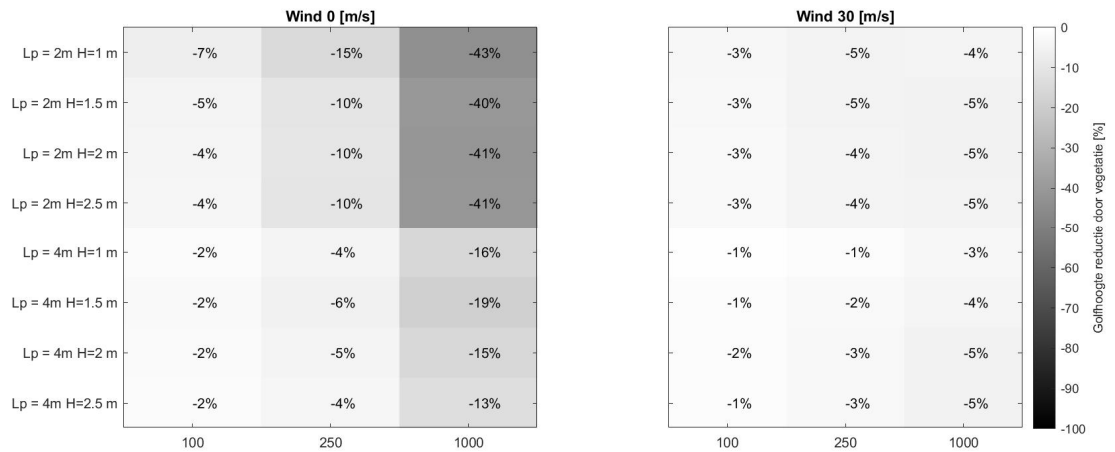
In deze berekeningen is nog geen rekening gehouden met schade aan de vegetatie. Met andere woorden, alle vegetatie is aanwezig, of alle vegetatie is afgebroken tot korte stoppels. Daardoor zal de werkelijke golfhoogtereductie ergens tussen de waarden van Figuur 5.5 en Figuur 5.6 in zitten. Dit zorgt echter voor een flinke onzekerheid over het effect van de vegetatie op de golfhoogte (zie vraag 1 van Vincent). Dit is afhankelijk van de wijze waarop het berekend wordt met de huidige middelen. Het plan is om de mate van schade aan de vegetatie en de invloed op de golfcondities te relateren aan de eigenschappen van de vegetatie: hoogte, dichtheid, stijfheid en buigsterkte. Zo kunnen de resultaten van het huidige onderzoek vertaald worden naar andere omstandigheden en andere vegetatiesoorten. Hier is al enige literatuur over beschikbaar (zie vraag 6 van Diederik).

Figuur 5.5 en Figuur 5.6 laten zien dat de golfhoogte reductie door vegetatie:

- Significant kleiner is als wind wordt meegenomen in de berekening (zie vraag 7 van Diederik)
- Relatief kleiner is met een grotere waterdiepte
- Groter is met de expliciete cilindermethode dan met de impliciete verhoogde ruwheid
- Groter wordt naarmate de kwelderlengte tot de dijkteen/het uitvoerpunt groter is
- Niet zo sterk afhankelijk is van de 'offshore' golfhoogte. Uitzondering hierop is de case met expliciete vegetatie modellering en een waterstand van 4 meter. Volgens de berekeningen is voor de meeste gevallen de golfhoogtereductie dus procentueel even groot onafhankelijk van de inkomende golfhoogte.



Figuur 5.5 Golfhoogte reductie door vegetatie met de expliciete cilinder modellering. Het linker en rechter paneel geeft de resultaten weer met een windsnelheid van 0 en 30 m/s respectievelijk.



Figuur 5.6 Golfhoogte reductie door vegetatie met de impliciete verhoogde ruwheid modellering. Het linker en rechter paneel geeft de resultaten weer met een windsnelheid van 0 en 30 m/s respectievelijk.

### 5.3 Gecombineerde golfbreking en vegetatie modellering

De SWAN berekeningen laten zien dat golfbreking plaatsvindt door dieptebeperking op de kwelder. Op ondiepe voorlanden hebben beide processen, golfbreking en de invloed van vegetatie volgens expliciete modellering, significante invloed op het golfveld. Voor het BOI is het van belang dat de invloed van vegetatie én golfbreking zo goed mogelijk benaderd worden. Voor de modellering van golfbreking in SWAN wordt momenteel in het BOI de Van der Westhuysen (2009, 2010) brekerformulering gehanteerd. Deze formulering is gekalibreerd en geverifieerd op basis van lab en veldmetingen met verschillende bodemprofielen en is daardoor toepasbaar in de Deltagoot en in de Waddenzee.

Op basis van referentie proeven (zonder vegetatie) in de Deltagoot kan de nauwkeurigheid van de Van der Westhuysen (2009,2010) brekerformulering worden getoetst. De invloed van vegetatie kan vervolgens separaat in de SWAN vegetatiemodule worden toegevoegd. De vegetatiemodule wordt gekalibreerd en geverifieerd met proeven met vegetatie. Opgemerkt wordt dat golfbreking en de invloed van vegetatie ruimtelijk en fysisch samenhangen. De robuustheid van de verbeterde vegetatiemodule ten opzichte van golfbrekermodellen kan worden getest door naast Van der Westhuysen (2009, 2010) ook alternatieve formuleringen van bijvoorbeeld Battjes en Janssen (1978) en Salmon et al. (2015) door te rekenen. Hiernaast kan de verbeterde vegetatiemodule in combinatie met de brekermodellen worden getoetst met (historische) veldmetingen indien voldoende informatie beschikbaar is over de aanwezige vegetatie in het modelgebied. Dit laatste valt buiten de scope van dit project. (Zie vraag 1 van Robert)

### 5.4 Kalibratie van de vegetatiemodule van Swan

De vegetatiemodule van Swan is momenteel de beste rekenmethode om de invloed van de vegetatie op de golfcondities te berekenen. Dit kan echter momenteel nog niet goed gebruikt worden voor dijkversterkingen, omdat nog onvoldoende duidelijk is welke input er gebruikt moet worden. De volgende invoer is nodig (zie vraag 1 van Roy):

- vegetatiedichtheid
- vegetatiehoogte
- karakteristieke diameter van de planten
- typische drag coefficient



Het plan is om deze vegetatiemodule van Swan te kalibreren aan de hand van de voorgestelde Deltagootproeven (zie hoofdstuk 8). Voor deze kalibratie wordt het volgende gemeten:

- Golfcondities op drie locaties boven de begroeide kwelder
- Vegetatiedichtheid en hoogte (voor en na elke proef, zie ook 4.3)
- Karakteristieke diameter van de planten

Vervolgens worden de proeven nagerekend en worden de parameters in het rekenmodel en de typische drag coefficient zo getuned dat er een goede overeenkomst is tussen de berekeningen en de metingen. Door dit voor alle proeven uit te voeren, dus met verschillende waterstanden, golfcondities en mate van schade aan de vegetatie, kan een vrij brede kalibratie worden gerealiseerd. (zie vraag 4 van Roy en vraag 5 van Robert/Myron)

Het volledige voorgestelde meetprogramma is gegeven in par. 8.3.2 en 8.3.3.

## 6 Belasting op de dijk

### 6.1 Golfoploop en golfoverslag (kruinhoogte)

De hydraulische belasting op de dijk wordt (o.a.) vertaald naar een golfoploophoogte ( $z_{2\%}$ ) en golfoverslag debiet ( $q$ ) om de faalkans van de dijk te bepalen ten aanzien van het mechanisme “erosie van het boventalud” en “erosie van de kruin en het binnentalud” (benodigde kruinhoogte). De TAW (2002) is de algemeen geaccepteerde leidraad voor de berekening van deze ontwerp- en beoordelingsparameters.

De algemene formule voor de bepaling van golfoploop wordt gegeven door (TAW, 2002):

$$z_{2\%} / H_{m0} = 1,75 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_0 \quad (0.1)$$

Met een maximum van:

$$z_{2\%} / H_{m0} = \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot (4,3 - 1,6 / \sqrt{\xi_0}) \quad (0.2)$$

Met  $z_{2\%}$  het 2%-golfoploophoogte boven de stilwaterlijn,  $H_{m0}$  de significante golfhoogte,  $\xi_0 = \tan \alpha / \sqrt{s_0}$  de brekerparameter en  $\gamma_b, \gamma_f, \gamma_\beta$ : invloedsfactoren voor geometrie en ligging van de dijk: een berm, taludruwheid en hoek van golfaanval respectievelijk. De golfoploop is een belangrijke component in de formules van de cumulatieve overbelastingsmethode voor het beoordelen van gras op het boventalud, kruin en binnentalud.

De formule van het golfoverslagdebiet is als volgt (TAW, 2002):

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \cdot \xi_0 \cdot \exp \left( -4,3 \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right) \quad (0.3)$$

Met een maximum van:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0,2 \cdot \exp \left( -2,3 \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right) \quad (0.4)$$

Met  $q$  het gemiddeld overslagdebiet ( $m^3/s/m$ ),  $h_k$  de vrije kruinhoogte ten opzichte van de actuele stilwaterlijn (m),  $\alpha$  de taludhelling ( $^\circ$ ),  $g$  de gravitatieconstante ( $9,8 m/s^2$ ) en  $\gamma_b, \gamma_f, \gamma_\beta$  en  $\gamma_v$  de invloedsfactoren (-) voor de invloed van respectievelijk de berm, de ruwheid van het taludoppervlak, de hoek van golfaanval en voor een verticale wand op het talud.

De invloed van de golfperiode komt tot uiting via de golfsteilheid ( $s_{op}$ ) in de brekerparameter:

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{op}}} \quad (0.5)$$

Met  $s_{op}$  de golfsteilheid (-), gedefinieerd als  $s_{op} = H_{m0} / (g / (2\pi) \cdot T_p^2)$

Er is hier niet gebruik gemaakt van de recentere formules van Lashley en Altomare (2016), omdat bij het beoordelen en ontwerpen van dijken nog steeds bovenstaande formules worden gebruikt in Nederland. Bij de analyse van de resultaten van de proeven zal wel een vergelijking met die recentere formules gemaakt worden.

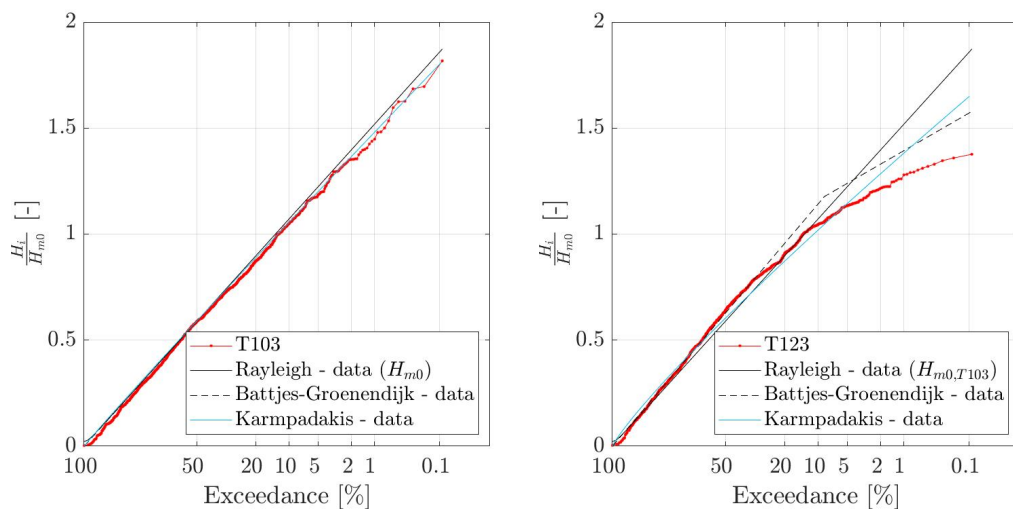
#### 6.1.1 De golf(oploop)hoogteverdeling bij een ondiep voorland

Op een ondiep voorland, daar waar de waterdiepte  $h$  kleiner is dan drie à vier keer de golfhoogte, zal golfbreking plaatsvinden door dieptebeperking (TAW, 2002). In deze situatie

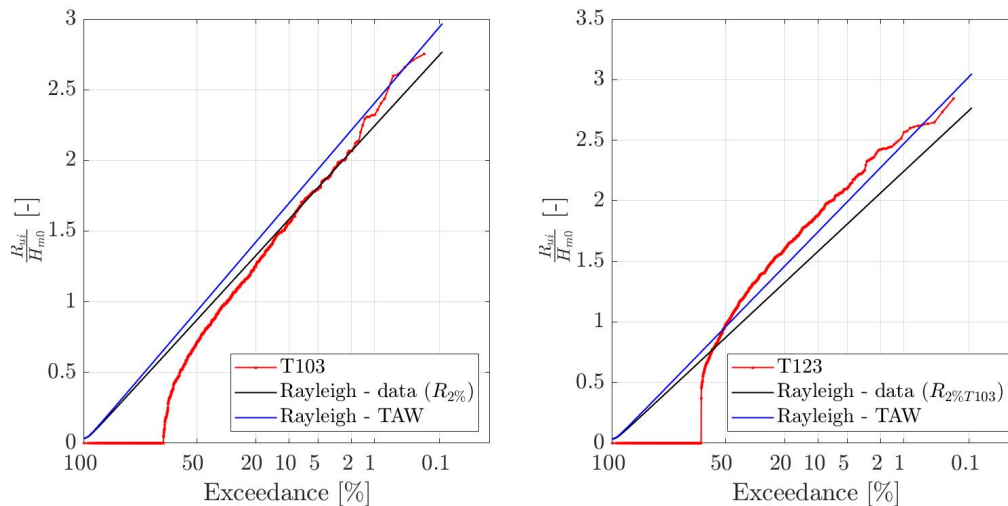
zullen de hoogste golven breken, wat niet enkel de karakteristieke golfparameter  $H_{m0}$  reduceert, maar ook de golfhoogteverdeling verandert. Op diep water worden golfhoogtes beschreven met de Rayleigh verdeling. Op (hellende) ondiepe voorlanden worden de hoogste golven door het breken verkleind en buigt daardoor de staart met lage overschrijdingskansen van de golfhoogteverdeling af (Battjes & Groenendijk 2000, Karpadakis 2022). Battjes & Groenendijk (2000), beschrijft een ondiep water golfhoogteverdeling die is geïmplementeerd in de COBM (Cumulatieve OverBelastings Methode) en in de expert versie van Basis Module Gras Buitentalud.

Figuur 6.1, overgenomen uit recent onderzoek van Deltares (2022), laat duidelijk zien dat de golfhoogteverdeling verandert op een ondiep voorland. Hieruit volgt dat de verhouding van de hoogste golven ten opzichte van de significante golfhoogte op diep water groter is dan die op ondiep water,  $H_{2\%,diep}/H_{m0} \geq H_{2\%,ondiep}/H_{m0}$ . Het verloop van de golfoploophoogteverdeling, relevant voor bepaling  $z_{2\%}$  voor diep en ondiep water, is nog niet gevat in een formule. Hiervoor is te weinig data beschikbaar. Op basis van een klein aantal testresultaten is echter wel te zien dat de golfoploophoogteverdeling ook afbuigt, al lijkt dit in mindere mate dan de golfhoogteverdeling, zie Figuur 6.2.

Bij een ondiep voorland neemt dus niet alleen de significante golfhoogte af door het breken, wat een vermindering van de golfoploop geeft, maar is ook de golfoploophoogteverdeling anders dan bij een dieper voorland. Hierdoor worden de hoge golfoploopgebeurtenissen extra verlaagd. Dit heeft een aanzienlijke invloed op de golfoverslag, omdat die bepaald wordt door de hoogste golfoplopen.



Figuur 6.1 De golfhoogteverdeling op diep water (links) en ondiep water (rechts) overgenomen uit Deltares (2022). De verdeling is genormaliseerd met de golfhoogte gemeten bij de teen van de dijk.



Figuur 6.2 De golfploophoogte verdeling op diep water (links) en ondiep water (rechts) overgenomen uit Deltares (2022). De verdeling is genormaliseerd met de golfhoogte gemeten bij de teen van de dijk.

### 6.1.2 Golfperiode en infra-gravity waves

Door golfbreking gaat niet enkel energie verloren maar herverdeelt energie zich ook over het spectrum. Zo neemt de laagfrequente energie toe door golf-golf interacties en vallen in de brekingszone bij sterke breking (minstens 30 à 50% golfhoogtereductie) golfgroepen uiteen waardoor laag frequente energie, infra-gravity waves, vrij komen (Holthuisen 2007; Lashley, 2022). Dit zorgt voor een toename in de golfperiode  $T_{m-1,0}$ .

Dit beïnvloedt het type brekers op het dijktalud (de brekerparameter  $\xi_0$ ). Een toename in golfperiode leidt tot een toename in het overslagdebiet (en golfploophoogte) (Plouvier 2022; Vos 2022).

De formules van Lashley zijn gebaseerd op een groot aantal 1-D berekeningen waarin de omzetting van deining of sea state naar IG-Waves is onderzocht met geavanceerde golfmodellen als BOSZ, SWASH en Xbeach. Er werd een synthetische dataset gecreëerd met een 1-D schematisatie van Xbeach-NH (NH=niet-hydrostatisch).

Lashley (2022) benadrukt echter dat de invloed van een verhoogd voorland netto nog steeds positief is door het energieverlies ten gevolge van golfbreking. Verder wordt opgemerkt dat de invloed van infra-gravity waves sterk afhangt van de lokale condities. Zo dient er tussen de brekerzone en de teen van de dijk voldoende ruimte te zijn voor het geven van het maximale infra-gravity wave effect.

De infra-gravity waves geven een verhoging van de golfploop, maar de invloed van de afgenomen golfhoogte door het breken op het voorland is nog steeds veruit dominant.

### 6.1.3 Invloedsfactor ondiep water golfoverslag

Het netto positieve effect van ondiepe voorlanden is ook beschreven in Van Steeg et al. (2020). Uit numerieke berekeningen en fysieke metingen is geconcludeerd dat het overslagdebiet afhankelijk is van de waterdiepte voor de dijkconstructie. Om het effect van ondiep water (zonder de aanwezigheid van vegetatie) mee te nemen is de invloedsfactor  $\gamma_d$  afgeleid:

$$\gamma_d = c_1 \cdot \left( \frac{H_{m0,toe}}{h_t} \right) + c_2 \quad (0.6)$$

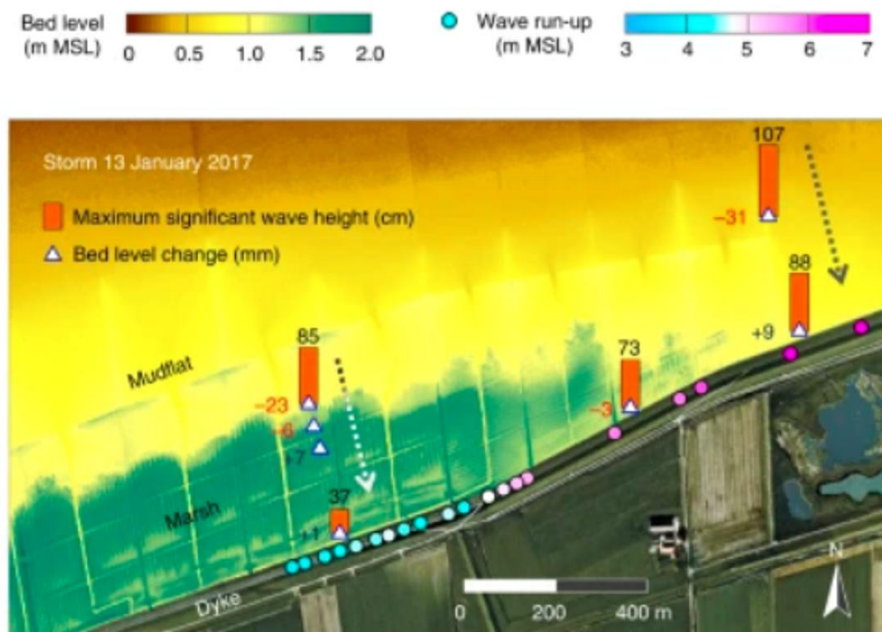
Met  $h_t$  de waterdiepte bij de teen (m),  $H_{m0,toe}$  de significante golfhoogte bij de teen (m) en twee empirische constanten  $c_1=-1,4$  en  $c_2=1,4$ . Deze invloedsfactor wordt net als de andere

invloedsfactoren in de exponent meegenomen van formule (0.1) en (0.3). Volgens de formule wordt voor een kleinere waterdiepte een kleinere invloedsfactor en dus kleiner overslagdebiet berekend.

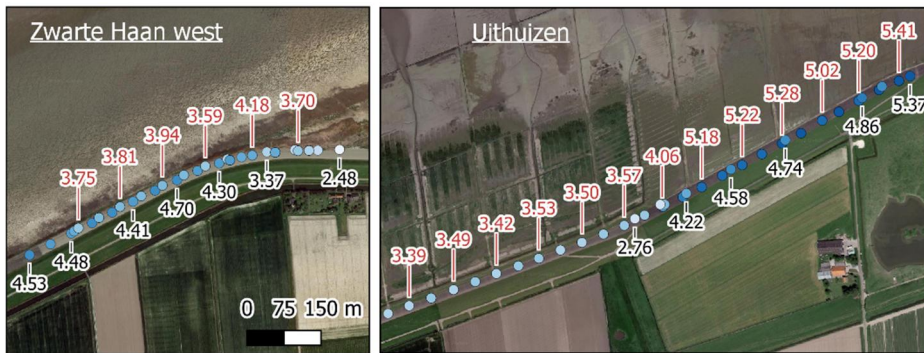
#### 6.1.4 Invloed van vegetatie

De invloed van vegetatie op de golfloop en golfoverslag is nog nooit expliciet gemeten onder exact vergelijkbare condities. Gezien de verwachting dat de vegetatie de golfhoogte verkleint, zal de vegetatie ook een verkleining van de golfloop en de golfoverslag geven. Metingen aan de hoogte van veekranden op dijk, die als benadering van de golfloop gezien kunnen worden, laten een duidelijk verschil zien tussen een dijk met en zonder voorland. Zhu et al. (2020) laat dit zien op een dijktraject bij Uithuizen (Figuur 6.3) waar na een storm in 2017 een duidelijk verschil in hoogte van de veekrand waar te nemen was (run-up). Vergelijkbare metingen zijn gedaan na storm Corrie en storm Eunice (Figuur 6.4). Bij Uithuizen is bijvoorbeeld een verschil van 2 m hoogte van de veekrand geobserveerd na Eunice. Bij Zwarte Haan is juist na Corrie een hoogteverschil van de veekrand van 2 m gemeten.

Ook wordt geconstateerd dat de wijze waarop golven breken op het voorland door de vegetatie veranderd. Er ontstaat een veel bredere zone van golfbreking, waardoor infra-gravity waves mogelijk minder invloed hebben op de golfloop en golfoverslag. Dit is het geval bij een lage of afwezige klif in het profiel.



Figuur 6.3 Veekrand hoogte (gekleurde markers), maximaal gemeten golfhoogte en bodemhoogteverandering na een storm op 13 januari 2017 (Zhu et al., 2020).

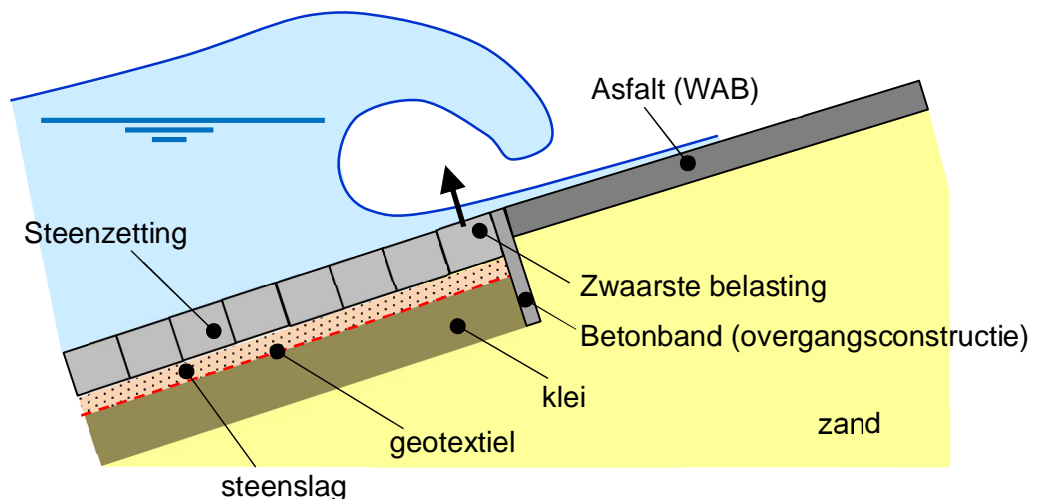


Figuur 6.4. Metingen van veekranden (m + n.a.p.) bij Zwarte haan (links) en Uithuizen (rechts) na stormen Corrie (zwart; wind uit noordnoordwest) en Eunice (rood; wind uit oost).

## 6.2 Golfdruk (stabiliteit steenzetting)

Voor de stabiliteit van de dijkbekledingen (steenzettingen, asfalt en gras) is de golfbelasting van groot belang. Voor moderne steenzettingen en waterbouwasfaltbeton (WAB) zijn de golfklappen bepalend voor het ontwerp (en de beoordeling). Deze golfklappen komen iets onder de stilwaterlijn op de bekleding neer, zie Figuur 6.5. Tijdens de storm zal de waterlijn variëren als gevolg van de stormopzet en het getij. Doorgaans geldt dat een hogere waterstand ook hogere golven met zich meebrengt. Voor de situatie zoals getekend in Figuur 6.5 geldt voor de steenzetting dat een extreem hoge waterstand, waarbij de golfklappen op het asfalt neerkomen, er feitelijk weinig belasting is. De stabiliteit van de steenzetting wordt bepaald door de hoogste waterstand die nog net golfklappen op de steenzetting geeft. De zetstenen vlak onder de overgang worden dan het zwaarst belast en zijn bepalend voor het ontwerp van de steenzetting op het ondertalud.

Langs de Friese en Groningse kust (Waddenzee) zijn er veel dijken voor met een bekleding als in Figuur 6.5, waarbij de overgang op NAP+2,0 à 2,5 m ligt (ruim boven het hoogwater). Voor deze dijken geldt dat de stabiliteit van de steenzetting bepaald wordt door zware golfaanval tijdens storm met een waterstand van omstreeks NAP+3,5 à 4,5 m.



Figuur 6.5, Golfbelasting op dijkbekleding met op het ondertalud een steenzetting en het boventalud asfalt

Door de aanwezigheid van een hoog voorland wordt de significante golfhoogte mede bepaald door de waterdiepte boven dit voorland. Maar daarnaast heeft het voorland ook een invloed op de golfhoogteverdeling (zie hoofdstuk 5 en par. 6.1.1), waardoor de golven met een kleine overschrijdingsfrequentie, zoals  $H_2\%$ , relatief meer worden beperkt door de waterdiepte dan de

significante golfhoogte. Omdat steenzettingen vooral gevoelig zijn voor dit soort hoge golven in het golfveld, heeft het ondiepe voorland een relatief grote invloed op de voor steenzettingen relevante belasting.

De stabiliteit van de steenzetting wordt met name bedreigd door drukgradiënten op het talud. Voor moderne steenzettingen zijn de drukgradiënten aan de randen van een golfklap bepalend, terwijl voor de nog maar weinig toegepaste rechthoekige betonblokken ook de drukgradiënten bij de golfneerloop belangrijk zijn. Het drukverloop (uitgedrukt in de formules als stijghoogte) op elk moment in de golven bepaalt dus de stabiliteit, terwijl het verloop in de tijd op een bepaalde locatie van minder belang is.

Voor steenzettingen wordt de stabiliteit berekend door voor vijf karakteristieke drukverlopen op het talud (met specifieke grote drukgradiënten) het stijghoogteverschil over de toplaag te berekenen (Klein Breteler, 2022):

1. tussen de golfklap en het golffronten van een golfklap type 1
2. aan de landzijde van de golfklap van een golfklap type 1
3. aan de landzijde van de golfklap van een golfklap type 2
4. aan de voet van een hoog stijghoogteverschil tijdens golfneerloop
5. aan de voet van een steil stijghoogteverschil tijdens golfneerloop

De steenzetting moet voor al deze karakteristieke belastingen stabiel zijn.

Uit experimenten is gebleken dat de locatie van de maatgevende golfklap op het talud ook afhankelijk is van de waterdiepte op het voorland. Doordat bij een ondiep voorland deze locatie iets minder diep onder de waterlijn zit dan bij een dieper voorland, is de maatgevende waterstand bij een ondiep voorland iets lager. Doorgaans zal dan ook de golfhoogte wat kleiner zijn. Formules voor deze invloed zijn uit kleinschalig modelonderzoek afgeleid door Mourik (2012). Vooral bij relatief lange golven ( $s_{op} = H_{m0}/(gT_p^2/2\pi) < 0,02$  à  $0,03$ ) is dit effect groot, terwijl dit soort lange golven juist veel voorkomen bij een ondiep voorland, omdat de golfhoogte door breking wordt verlaagd en de golfperiode maar weinig verandert.

Mourik (2012) heeft een invloedsfactor afgeleid om dit effect van het ondiepe voorland te verdisconteren in de berekeningen van de locatie van de golfklappen en de golfneerloop:

- Als  $h_m/H_{m0} < 2,2$ :

$$f_{klap,ondiep} = \min(17,6 \cdot s_{op} + 0,22; 1) \quad (0.7)$$

$$f_{neerloop,ondiep} = \min(12,9 \cdot s_{op} + 0,50; 1) \quad (0.8)$$

- Als  $2,2 < h_m/H_{m0} < 2,8$ : interpoleren
- Als  $h_m/H_{m0} > 2,8$ :  $f_{klap,ondiep} = f_{neerloop,ondiep} = 1$

Met:

$f_{klap,ondiep}$  = invloedsfactor voor de diepte van de golfklap onder de waterlijn bij ondiep water (-)

$f_{neerloop,ondiep}$  = invloedsfactor voor de diepte van de golfneerloop onder de waterlijn bij ondiep water (-)

$h_m$  = maatgevende waterdiepte, namelijk de waterdiepte op  $L_{op}/2$  afstand van de teen van de dijk (m)

$L_{op} = gT_p^2/(2\pi)$  = diep water golflengte (m)

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

$g$  = versnelling van de zwaartekracht ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )

$s_{op} = H_{m0}/L_{op}$  = golfsteilheid (-)

Rekenvoorbeeld:

- waterdiepte boven de kwelder:  $h_m = 3$  m
- significante golfhoogte boven de kwelder:  $H_{m0} = 1,5$  m
- golfperiode:  $T_p = 6$  s
- golfsteilheid:  $s_{op} = 0,027$
- niveau van de golfklap op diep water t.o.v. SWL:  $z_{klap} = -H_{m0} \cdot \tan \alpha \cdot \min(0,42 \cdot s_{op}^{-0,5} - 0,2; 6,5) = -1,0$  m
- invloedsfactor voor het ondiepe voorland:  $f_{klap,ondiep} = 0,70$ .
- De maatgevende waterstand is daardoor 30 cm lager door het ondiepe voorland en dat betekent een golfhoogtereductie van ongeveer 10%.

Het is goed denkbaar dat de diepte van de golfklap en de neerloop nog verder beïnvloed wordt als er vegetatie op het voorland staat. De vegetatie beïnvloedt het brekerproces op het voorland (de brekerzone wordt veel breder) en dat kan invloed hebben op de vorm van de golven als ze aankomen bij de dijk. Dit aspect kan gemeten worden in de Deltagoot als er drukopnemers op het ondertalud worden geplaatst.

## 6.3 Erosie van de Groene Dijk

Traditioneel worden dijkbekledingen gemaakt van asfalt of steenzettingen, met een grasbekleding op klei op het bovenste deel van het buitentalud, de kruin en het binnentalud. Meer en meer wordt de bekleding van het buitentalud vanaf de hoogwaterlijn gemaakt van een dikke kleilaag met gras. Zo'n dijk wordt een 'groene dijk' genoemd. Dat is begonnen bij de dijk bij Ferwerd in de tachtiger jaren, maar wordt nu ook toegepast aan de zuidkant van de Dollard en mogelijk ook een tweede traject van de dijk Koehool-Lauwersmeer.

Dit soort dijken ondervinden wat erosie tijdens extreme omstandigheden. Dat onderhoud zal minder zijn als de golfhoogte gereduceerd wordt door de vegetatie op de kwelder (zie vraag 2 van Jos). De erosie kan berekend worden met de volgende formule van Mourik (2020):

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = c_e \cdot \left[ 1,32 - 0,079 \cdot \frac{V_e}{H_{m0}^2} \right] \cdot [4,1 \cdot \tan \alpha] \cdot \left[ \min \left( 2,0 ; \frac{0,06}{s_{op}^{0,8}} \right) \right] \cdot [1,7 \cdot (H_{m0} - 0,4)^2]$$

Met:

$c_e$  = erosiecoëfficiënt = 0,7 (-)

$d_e$  = maximale erosiediepte, loodrecht op het talud (m)

$d_0$  = erosiediepte aan de zeezijde van de erosiekuil, loodrecht op het talud (m)

$H_{m0}$  = significante golfhoogte gebaseerd op het golfspectrum (m)

$s_{op} = H_{m0}/(gT_p^2/(2\pi))$  = golfsteilheid gebaseerd op de significante golfhoogte en piekperiode bij de teen van de dijk (-)

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

$\partial V_e/\partial t$  = erosiesnelheid = toename erosievolume per strekkende meter dijk per uur ( $m^3/m/h$ )

$V_e$  = erosievolume per strekkende meter dijk op het moment van berekenen van de erosiesnelheid ( $m^3/m$ )

$\alpha$  = taludhelling dijk ( $^\circ$ )

$\alpha_{klif}$  = taludhelling van de erosieklif ( $^\circ$ )

$\alpha_{terras}$  = taludhelling van het erosieterras ( $^\circ$ )

Het berekende erosievolume kan met de volgende formule omgerekend worden naar een erosiediepte (met  $\tan(\alpha_{terras}) = 1/10$ ;  $\tan(\alpha_{klif}) = 2$ ;  $d_0 = 0$ ):

$$d_e = \sqrt{\frac{2V_e \tan(\alpha - \alpha_{terras}) + d_0^2}{\left(1 + \frac{\tan(\alpha - \alpha_{terras})}{\tan(\alpha_{klif} - \alpha)}\right)}}$$



Hiermee is een voorbeeld doorgerekend: Als de golfhoogte bij de dijk door de vegetatie met 15% is afgenomen en de golfperiode met 5% is afgenomen, zal de erosiediepte in de klei 20 cm minder zijn.

# 7 Erosie bij de teen van de dijk en de klif

## 7.1 Erosie bij de teen

De vooroever op het traject Koehool-Lauwersmeer is slibrijk, en deze slibrijke bodem is mogelijk onderhevig aan erosie tijdens stormcondities. In deze paragraaf wordt eerst ingegaan op de te verwachten erosie als er geen vegetatie op zou staan (zachte slibbodem) en daarna wordt erosie ingeschat als er vegetatie staat en de bodem mede daardoor meer stevigheid heeft.

In de voorliggende paragraaf wordt een inschatting gegeven van erosiesnelheden aan de voet van de dijk in afwezigheid van vegetatie. De erosiesnelheden van dergelijke bodems is moeilijk in te schatten omdat (1) de sterkte van de bodem onbekend is (afhankelijk van de mate van consolidatie en zand-slibgehalte) en (2) de verticale drukverdeling belangrijk is voor erosie onder stormcondities, maar deze drukverdelingen en de precieze invloed op erosie niet goed bekend zijn. Dit laatste speelt niet bij zandige bodems vanwege de relatief hoge permeabiliteit (doorlatendheid) van zand.

Dat leidt voor slibrijke bodems tot de volgende bronnen van onzekerheid:

- **Waterbeweging.** De erosie van een bodem wordt standaard berekend op basis van een bodemschuifspanning, wat een maat is voor de horizontale snelheidsgradiënt nabij de bodem. Voor slibrijke bodems zijn de dynamische drukverdelingen aanvullend van belang vanwege het optreden van massa-erosie en bezwijking.
- **Erosietype.** Slib kan eroderen als individuele deeltjes of als grotere eenheden (massa-erosie), afhankelijk van de waterbeweging en de mate van consolidatie. Massa-erosie komt vooral voor bij moeilijk erodeerbare bodems en energetische condities, en is moeilijk voorspelbaar. Daarnaast kan de bodem ook bezwijken (liquifactie). Een slibbodem bestaat voor een groot deel uit water, ook een relatief sterke slibbodem. Liquifactie is een proces waarbij door cyclische bewegingen (bijvoorbeeld door drukvariaties onder golven) de interne structuur van de bodem vloeibaar wordt. Labexperimenten op bodemmonsters genomen in het interessegebied (8 km ten oosten van Koehool, bij Zwarte Haan), suggereren echter dat liquifactie niet optreedt, zelfs niet bij extreme golfcondities (Winterwerp et al., 2012).
- **Sterktetoename in de bodem.** De dichtheid van de bodem neemt toe door consolidatieprocessen. Hierdoor erodeert de bovenste centimeters van de bodem veel makkelijker dan de bodem op 10 of 100 cm dieper. De toename in sterkte van de bodem is slechts beperkt bekend.

Onze kennis over alle processen gerelateerd aan erosie / sterkte opbouw van de bodem is onvoldoende om op basis van een beperkte hoeveelheid gegevens de mate van erosie of bezwijking van de bodem kwantitatief te benaderen. Als alternatief wordt hieronder op basis van eerdere studies uitgevoerd in het gebied een inschatting gegeven in hoeverre erosie of bezwijking van de bodem verwacht mag worden.

### Bodemschuifspanningen

Voor het bepalen van de erosie gaan we ervan uit dat erosie plaatsvindt als gevolg van de horizontale orbitaalbeweging, en dat verticale drukken geen rol spelen. Hierdoor kan bodemerosie gerelateerd worden aan de bodemschuifspanning  $\tau_w$ , welke kwadratisch gerelateerd is aan de orbitaalsnelheid  $u_{orb}$  en een wrijvingsfactor  $f_w$ :

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho_0 f_w u_{orb}^2$$

De orbitaalsnelheid is gegeven door (e.g. van Rijn, 1990)

$$u_{orb} = \frac{\pi H_{m0}}{T \sinh(kh)}$$

Waarbij  $h$  de waterdiepte is,  $H_{m0}$  de representatieve golfhoogte,  $T$  de golfperiode,  $k$  het golfgetal. Een eerste orde inschatting voor het golfgetal is  $k = 2\pi / L$ , waarbij de golflengte  $L = cT$  en de golfsnelheid  $c = \sqrt{gh}$

De wrijvingsfactor  $f_w$  is berekend met de formule van Swart (1974)

$$f_w = 0.00251 \exp\left(5.21(A/k_s)^{-0.19}\right)$$

Deze formule geldt indien  $A/k_s > 1.57$ ;  $f_w = 0.03$  voor  $A/k_s \leq 1.57$ . Hierbij is  $A = u_{orb} / \sigma$  waarbij de golfrequentie  $\sigma = 2\pi / T$ . De bodemruweheidslengte  $z_0 = k_s / 30$ . De bodemruweidshoogte  $k_s$  kan afgeschat worden uit de korrelgrootte  $D_{90}$  via  $k_s = 3 D_{90}$  (van Rijn, 1993).

Tenslotte reflecteert de golf tegen de dijk, typisch over een afstand van 1 tot 2 golflengtes (Klopman en van der Meer, 1999). Deze reflecterende golf versterkt momentaan de inkomende golf, wat leidt tot golfamplificatie en hogere bodemschuifspanningen. De reflectie wordt uitgedrukt als een fractie van de inkomende golfenergie  $\alpha$ . Aangezien de golfenergie  $E$  kwadratisch schaalt met de golfhoogte als  $E = \rho g H_{m0}^2 / 8$  zal de reflecterende golfhoogte schalen met  $\sqrt{\alpha}$ . Echter, omdat de bodemschuifspanning  $\tau_w$  kwadratisch schaalt met golfhoogte  $H_{m0}$  bestaat er een lineair verband tussen de bodemschuifspanning in de reflecterende golf  $\tau_{w,ref}$  en  $\alpha$ . De totale bodemschuifspanning (van de inkomende en reflecterende golf gecombineerd) wordt hierdoor ingeschat als

$$\tau_{w,t} = (1 + \alpha) \tau_w$$

Voor typische invoerparameters als in Tabel 7.1 leidt dit tot een bodemschuifspanning van bijna 9 Pa (Tabel 7.2). De vraag is vervolgens in hoeverre dit leidt tot erosie. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van metingen uitgevoerd door Colosimo et al. (2020) en Colosimo et al. (in review).

Tabel 7.1 Maatgevende golfcondities en korrelgrootte voor de bodemschuifspanningsberekeningen

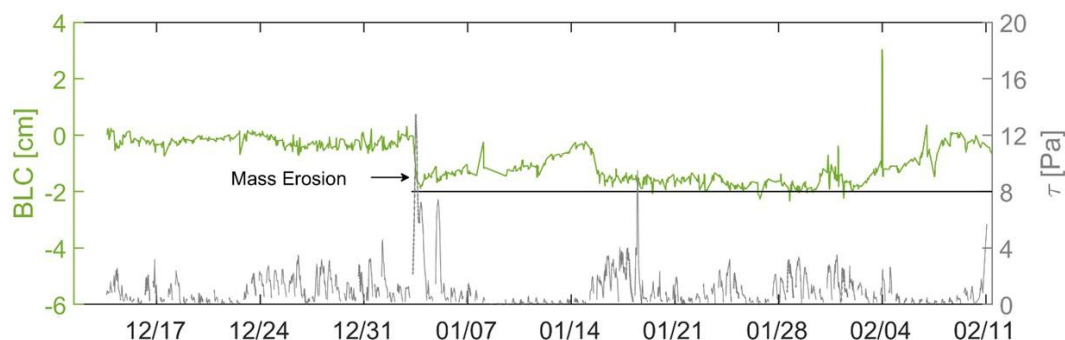
Parameter	symbool	waarde
Waterdiepte [m]	$h$	4
Golfhoogte [m]	$H_{m0}$	2
Golfperiode [s]	$T$	6
Dichtheid water [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$	1000
Reflectie parameter [-]	$\alpha$	0.25
Korrelgrootte [m]	$D_{90}$	100 10 <sup>-6</sup>

Tabel 7.2 Berekende golfparameters

Parameter	symbool	waarde
Ruwheidshoogte [m]	$k_s$	$7.5 \cdot 10^{-5}$
Bodemruwheidslengte [m]	$z_0$	$2.5 \cdot 10^{-6}$
Golfsnelheid [m/s]	$c$	6.26
Golfenlengte [m]	$L$	37.6
Golfgetal [-]	$k$	0.17
Orbitaalsnelheid [m/s]	$u_{orb}$	1.46
Wrijvingsparameter	$f_w$ [-]	0.0056
Golfgeïnduceerde bodemschuifspanning [Pa]	$\tau_w$	6.93
Totale golfgeïnduceerde bodemschuifspanning [Pa]	$\tau_{w,t}$ [Pa]	8.67

### Bodemveranderingen

Colosimo et al. (2020) en Colosimo et al. (in review) heeft metingen uitgevoerd naar de waterbeweging en bodemverandering in het intergetijdengebied tussen Koehool en Westhoek. Een voorbeeld van deze metingen zijn gepresenteerd in Figuur 7.1. Hierbij is het effect van een storm (begin Januari) op de bodemhoogte te zien. Tijdens eerste stormcondities in eind December, waarbij de bodemschuifspanning opliep tot 4 Pa, erodeerde de bodem niet. Pas bij een storm (begin Januari) waarbij de bodemschuifspanning opliep tot 8 Pa, erodeerde de bodem (enkele cm). De snelheid waarmee dit gepaard ging suggereert dat dit het gevolg was van massa erosie. Deze erosie fase werd binnen een week gecompenseerd door depositie, maar het afgezette slib is dusdanig zacht dat dit bij volgende stormen (midden januari) meteen erodeert.



Figuur 7.1 Bodemhoogte BLC en bodemschuifspanning  $\tau$  gemeten in van December 2017 tot Februari 2018 op een afstand van 400 meter van de dijk van Koehool. Uit Colosimo et al. (in review).

Er treden condities op waarbij de bodemschuifspanning oploopt tot 8 Pa (zoals de maatgevende condities in Tabel 7.1). Het is echter waarschijnlijk dat erosie plaatsvindt als massa erosie (geïllustreerd in Figuur 7.2). Massa erosie vindt plaats wanneer de normaalspanningen een aantal keer (2-5x) hoger zijn dan de ongedraineerde bodemschuifspanning. Deze normaalspanningen worden vooral bepaald door de dynamische druk onder golven, en minder door de horizontale bodemschuifspanning  $\tau_w$ . Nabij de dijk zal door breking en reflectie de normaalspanning hoger zijn dan bij de metingen in het intergetijdengebied (zoals in Figuur 7.1). Het is daarom te verwachten dat massa erosie plaatsvindt. De erosie vindt met name plaats daar waar er gradiënten zijn in de belasting en dat is het geval bij de teen van de dijk. De hoeveelheid erosie is echter moeilijk te voorspellen: dit is afhankelijk van onbekenden in de

materiaaleigenschappen, de dynamische drukverdeling onder golven, en de duur van de storm.



Figuur 7.2 Ontwikkeling van een klif, typisch voor massa erosie, bij Koehool. Uit Colosimo et al. (in review).

Gezien de grote onzekerheden omtrent de erosie bij de teen van de dijk moet een ruime marge aangehouden worden voor de range waarbinnen de erosie vermoedelijk zal vallen. Naar verwachting krijgt de erosiediepte in de loop van een extreme storm een waarde tussen orde 0,1 à 0,2 en 0,5 à 0,8 m. In de staart van de storm slibt een deel van de erosiekuil doorgaans weer dicht.

In een ontwerp of beoordeling van een waterkering is het bij een dergelijke onzekerheid gebruikelijk om van de worst case uit te gaan, dus in dit geval 80 cm.

### **Begroeide kwelders**

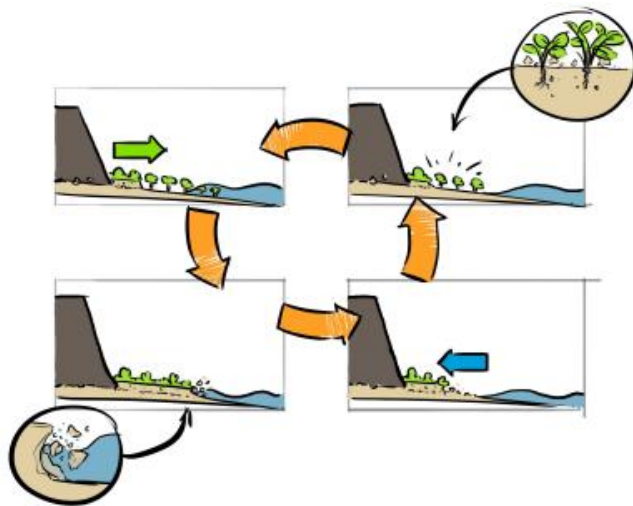
Bij een begroeide kwelder daarentegen, is de te verwachten erosie geringer omdat vegetatie de golfenergie dempt, omdat de wortels de bodem versterken en omdat de bodem steviger is door de (versnelde) consolidatie door de vegetatie. Over de eerste twee aspecten kan aan de hand van het voorgestelde Deltagootexperiment meer zekerheid over verkregen worden.

## **7.2 Erosie bij de klif**

Naast klifvorming in het intergetijdengebied onder invloed van massa-erosieprocessen (zoals hierboven beschreven) worden kliffen ook regelmatig gevormd op de grens tussen de kwelder en het onbegroeide intergetijdengebied. Sedimentatie en klifvorming volgen elkaar hierbij cyclisch op (zie ook Hoofdstuk 2).

Zodra het voorland voldoende hoog is geworden door vegetatie, ontstaat er pioniersvegetatie die de sedimentatie verder versterkt. Na verloop van tijd wordt het voorland steeds hoger en zal meer en meer begroeid raken, zie ook Figuur 7.3. In dit proces neemt de erosie van het kwelderoppervlak af en de sedimentatie toe.

Aan de zeezijde is de vegetatie het dunste en is er tijdens storm golfaanval die erosie kan veroorzaken. Zo ontstaat er vaak een klif met hoogte van enkele decimeters tot orde 1 m hoog. Door de erosie van de klif wordt de begroeide kwelder smaller en dat is relevant voor de totale golfdempende capaciteit van het voorland en de vegetatie op de lange termijn.



Figuur 7.3, Cyclus van erosie en sedimentatie

Er is al veel onderzoek gedaan naar de erosie van de klif. Uit de (Engelstatige) literatuur zijn de volgende zaken naar boven gehaald:

- **Desk study:** Mild conditions result in continuous lateral erosion and frequent flooding, whereas extreme events result in limited lateral erosion (Fagherazzi, 2014)
- **Field observations:** Wind exposure and presence of pioneer vegetation seaward from the marsh edge drives cliff retreat (Wang et al., 2017)
- **Field observations/numerical modelling:** Wave forcing is larger at salt marshes that are laterally shrinking (Callaghan et al., 2010)
- **Field observations/numerical modelling:** Wave thrust on the marsh scarp strongly depends on tidal level. The thrust increases with tidal elevation until the marsh is submerged and then rapidly decreases (Tonelli et al., 2010)
- **Field observations/numerical modelling:** linear correlation between wave energy flux and erosion rate, at short (monthly) temporal scales, can be found when mass failure events are excluded from the analysis (Bendoni et al., 2016)
- **Numerical modelling/aerial observations:** decadal retreat of salt marsh is driven by a threshold width for the adjacent tidal flat (Mariotti and Fagherazzi, 2013)
- **Numerical modelling:** Spatial patterns in marsh loss. For all tidal ranges, an increase in RSLR triggers channel widening, whereas a decrease in sediment supply triggers tidal flat deepening and increases wave edge erosion (Mariotti, 2020)
- **Field observations/cellular automata modelling:** high waves energy erodes marsh boundary uniformly, resulting in a smooth marsh edge. Low wave energy erodes non-uniformly, since importance of local resistance becomes more important, resulting in a jagged mars boundary (Leonardi and Fagherazzi, 2014)
- **Field observations:** linear relationship between erosion rates of marsh boundaries and incident wave energy collapse. Long-term salt marsh deterioration is dictated by average wave conditions. Violent storms and hurricanes contribute less than 1% to long-term salt marsh erosion rates (Leonardi et al., 2016)
- **Field observations/numerical modelling:** rate of edge erosion and the incident wave power density are linearly related (Marani et al., 2011).
- **Field observations/numerical modelling:** A stronger relationship was found between wave energy flux and volumetric erosion rates along the marsh edges than with lateral erosion rates (McLoughlin et al., 2015)
- **Field observations/numerical modelling:** There is a progressive relation between the erosion rate and the wave conditions. A twice as large wave height gives a more than twice as large ersion rate (Houttijn Bloemendaal et al, 2023)

Relevante numerieke modellen zijn:

- **Numerical modelling:** centennial development of full basin for assessing salt marsh extent including waves and probabilistic and deterministic marsh edge erosion model (Mariotti and Canestrelli, 2017)
- **Numerical modelling:** centennial development of intertidal profile under SLR (both expansion and retreat), including waves and biomass development (Mariotti and Fagherazzi, 2010).

De literatuur laat zien dat de erosie van de klif vooral optreedt tijdens relatief veel voorkomende stormen (frequentie van meer dan eens per jaar tot eens per jaar). De zwakkere stormen geven hier en daar kliferosie, waardoor de klif een zigzaglijn ontwikkelt, terwijl zware stormen overall kliferosie geven en daardoor de klif weer wat rechter gaat lopen.

Tijdens zeer extreme stormen met hoge waterstand zit de klif zo ver onder water dat er niet veel of geen erosie optreedt.

De huidige kennis rust vooral op veldmetingen met golfcondities tot ca 1 m golfhoogte. Het is daarom zinnig om tijdens het voorgenomen Deltagootonderzoek ook de erosie te meten bij golven in de range van 0,7 à 1,5 m. Zo vinden we aansluiting op de kennis uit de literatuur en verkrijgen we waardevol verificatie-materiaal bij wat grotere golven. Het lijkt wat minder zinnig om de erosie te meten bij golven groter dan 1,5 m, omdat deze doorgaans bij vrij hoge waterstanden optreden. Desondanks zijn hierover geen meetresultaten uit het veld beschikbaar.

Gezien de constatering in de literatuur dat de kliferosie beperkt blijft tijdens extreme omstandigheden, die relevant zijn voor de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen, heeft het meten van de kliferosie minder prioriteit in dit onderzoek. Maar als er toch kweldervegetatie met ondergrond in de Deltagoot wordt beproefd, is het een mooie meeropbrengst als ook de kliferosie wordt gemeten. Er zal strak gemonitord worden dat de kliferosie niet zo groot wordt dat dit het hoofddoel van de proeven gaat beïnvloeden. Daarom wordt tijdens een deel van de proeven de klif beschermd met een rijshouten dam (zie paragraaf 8.3.3).

## 8 Deltagootproeven

### 8.1 Dijk Koehool-Lauwersmeer

Het plan is om de resultaten uit de Deltagootproeven als eerste toe te passen op de dijk Koehool-Lauwersmeer. Voor deze dijk worden momenteel de verschillende opties voor de versterking geïnventariseerd. Voor een deel van dit traject moet volgens de eerste berekeningen de steenzetting op het ondertalud gerenoveerd worden, het asfalt op het boventalud en is er een hoogte-opgave.

In de oriënterende berekeningen is de invloed van de vegetatie niet meegenomen, omdat er nog onvoldoende vertrouwen is in de beschikbare rekenmethodes. De Deltagootproeven kunnen hierin verandering brengen.

De recente innovaties voor het ontwerp van dijken zijn al wel zo goed mogelijk toegepast om de versterkingsopgaven zover mogelijk, maar wel verantwoord, te minimaliseren. Als de invloed van de vegetatie met voldoende vertrouwen kan worden meegenomen, kan hierin nog een extra stap gezet worden, die verdere besparingen kan opleveren. In deze paragraaf is dit nader toegelicht.

De hydraulische belastingen bij Koehool – Lauwersmeer zijn afgeleid met een specifiek voor dit project aangepaste hydraulische database, i.o.m. RWS-WVL. De hoogteligging van de voorlanden is hierin meegenomen tussen het HR-uitvoerpunt en de teen van de dijk. Onrealistische golfhoogtes in verhouding tot de lokale waterdiepte zijn op sommige locaties naar beneden bijgesteld, vanwege de te verwachten golfbreking. Los van nieuwe releases en het meenemen van vegetatie, lijkt er op dit moment weinig tot niets meer aan de huidige hydraulische belastingen te optimaliseren.

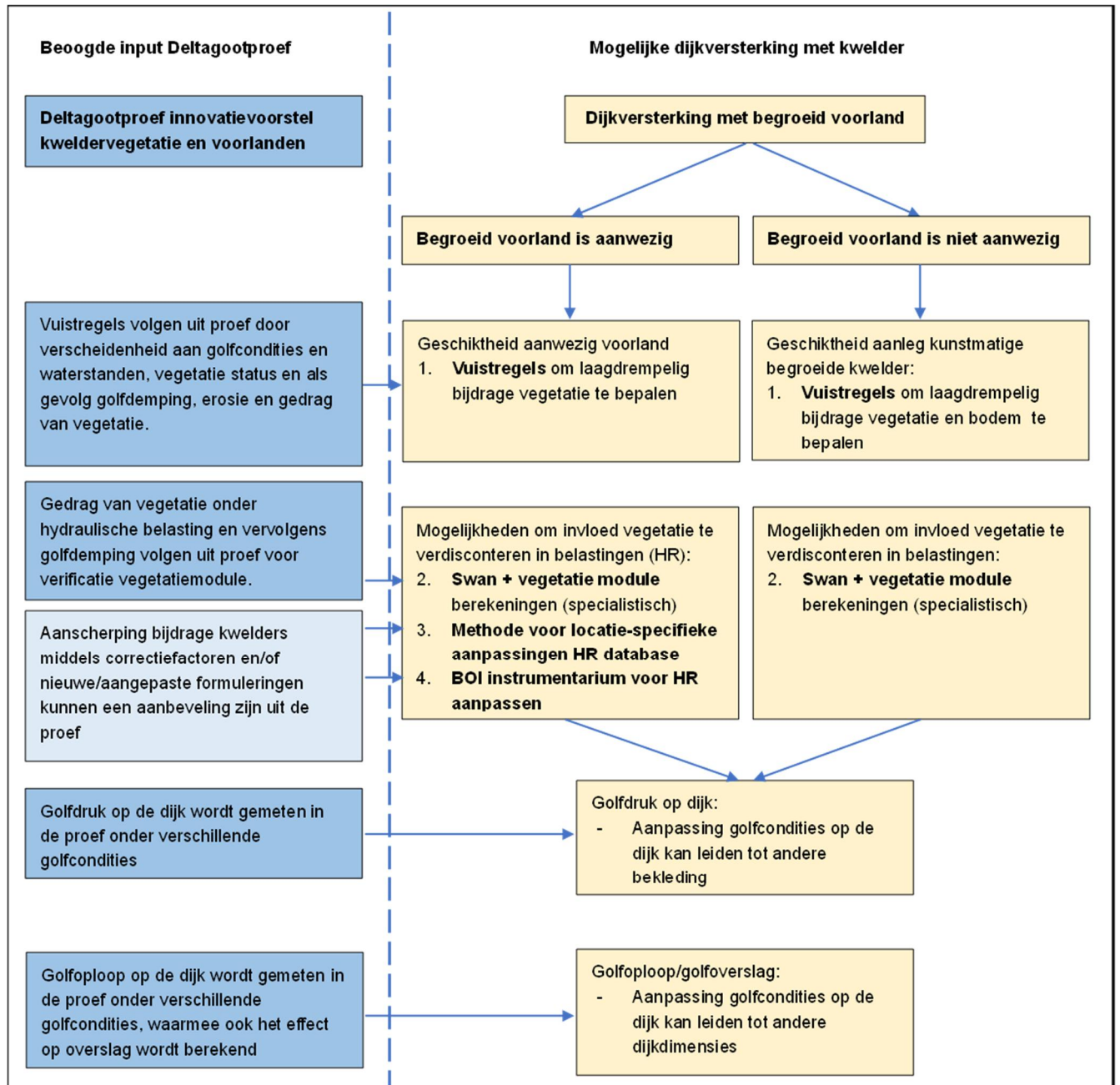
Verder zijn binnen dit dijkversterkingsproject al veel optimalisaties en tools toegepast om de versterkingsopgave aan te scherpen en te verkleinen. Enkele voorbeelden hiervan zijn:

- Piping is volledig uit de scope verwijderd door tijdsafhankelijk rekenen voor getijdenafzettingen toe te passen;
- Freatische lijn onder asfaltbekleding nauwkeurig bepaald met uitgebreid meetnet;
- Onderzoek naar gedrag van funderingslaag onder asfaltbekleding i.c.m. hoge freatische lijn;
- Nieuwste inzichten voor GEBU golfklapzone met aangepaste formules van Mourik uit Deltagootproeven voor bepaling kleilaagdikte groene dijken;
- Nieuwste inzichten voor GEBU golfploopzone en overgang hard-zacht uit Deltagootproeven door gebruik Matlab-scripts en GEBU-faalkanstool;
- Huidige groene dijk (11,5 km) uit de scope gerekend o.b.v. Deltagootproeven en erosiebestendigheid en erodeerbaarheid dijkenklei;
- Optimalisatie van ligging buitenberm in relatie tot golfoverslag;
- Lopend onderzoek naar toepasbaarheid van gerijpt (bagger)slib als dijkenklei;
- Lopend aanvullend geotechnisch onderzoek om scope macrostabiliteit nog verder te verkleinen;
- Beoordeling van steenzettingen opknippen in meerdere deelsegmenten, zodat niet het gehele vlak wordt afgekeurd, maar vanaf een bepaalde NAP-hoogte

Het is daarbij goed om te realiseren dat bovenstaande optimalisaties en innovaties zich vooral richten op de sterktekant van de waterkering. Het Deltagootonderzoek voor het meenemen van de invloed van kweldervegetatie richt zich echter op de belastingkant en zit dus een niveau hoger. Dit is een belangrijk verschil, want de uitkomsten van het Deltagootonderzoek worden



gebruikt als invoergegevens voor alle berekeningen waarbij golfparameters een rol spelen. Concreet betekent dit dat het meenemen van de kweldervegetatie een extra optimalisatie oplevert voor alle faalmechanismen, met uitzondering van piping en micro- en macrostabiliteit zonder golfoverslag. De potentiële bijdrage van de Deltagootproeven is opgenomen in onderstaand schema (Figuur 8.1).



Figuur 8.1. De beoogde input van de Deltagootproef (donkerblauw is beoogd resultaat van de proef, lichtblauw kan een aanbeveling zijn) op een mogelijke dijkversterking met kwelder (lichtbruin).

De nieuwe kennis uit de voorgestelde Deltagootproeven kan goed gebruikt worden voor het verkleinen van de opgaven ten aanzien van de steenzettingen. Er moet onderscheid gemaakt worden tussen steenzettingen onder en boven het voorland.

- Steenzettingen onder het voorland:  
Voor de steenzettingen die onder het maaiveld/slib liggen, is het vooral van belang om de stabiliteit van deze grondlaag tijdens maatgevende omstandigheden aan te tonen. De huidige kennis gaat er vanuit dat deze grondlaag

wegslaat, als gevolg van een erosiekuil in de dijkteen, waardoor de steenbekleding zonder gronddekking wordt beoordeeld in Steentoets. Als uit de gootproeven blijkt dat dit niet aansluit bij de werkelijkheid en de grondlaag stabiel is, kan de steenzetting onder het maaiveld worden goedgekeurd op stabiliteit van de toplaag. Er zal wel een minimale gronddekking benodigd zijn, maar het oppervlak waarover een geringe gronddekking aanwezig is, is zeer beperkt. De steenzetting heeft namelijk een taludhelling van ca. 1:3,5 en het maaiveld ligt nagenoeg horizontaal.

- Steenzettingen boven het voorland:

Voor steenzettingen die boven het maaiveld liggen, zijn de golfparameters van belang die volgen uit het meenemen van de vegetatie op het voorland. Het is niet eenvoudig om hier een concrete benodigde golfhoogtereductie voor uit te rekenen, omdat meerdere parameters een belangrijke rol spelen. Voor steenbekledingen is de golfperiode ook van belang en de invloed van vegetatie op zowel de golfperiode als golfhoogte is afhankelijk van de waterdiepte. Steenbekledingen worden beoordeeld met een stormverloop bij meerdere waterdieptes, waardoor er vrij veel aannames moeten worden gedaan om een specifieke golfhoogtereductie te kunnen kwantificeren. Ook vanwege de grote variatie in steenbekledingen op het traject Koehool – Lauwersmeer, lijkt het behoorlijk tijdrovend en niet heel zinvol om hier voorafgaand aan de Deltagootproeven heel gedetailleerd in te duiken. Doordat de maatgevende omstandigheden voor steenbekledingen binnen Koehool – Lauwersmeer optreden bij waterstanden rond +3,5 m NAP is op voorhand wel te zeggen dat de invloed van vegetatie groter is dan bij de maximale waterstanden.

Naar verwachting is er nog meer golfhoogtereductie te verwachten bij matige stormen dan bij extreme stormen, omdat bij matige stormen er minder schade aan de vegetatie optreedt. Dit zou ook een reductie van het onderhoud kunnen betekenen, bijvoorbeeld van het dijkvak waar een 'groene dijk' is gepland (zie vraag 5 van Jos).

## 8.2 Bijdrage van Deltagootproeven aan het invullen van de kennisleemtes

In bovenstaande hoofdstukken is de bestaande kennis beschreven en daaruit blijkt dat er al veel kennis en rekenmodellen beschikbaar zijn. De belangrijkste tekortkoming is een verificatie bij grote golfaanval met golven in de range van 1 tot 2 m. Concreet gaat het om het meten van het gedrag van de vegetatie (en schade door de golven), de golfhoogtereductie (en spectrumverandering), erosie bij de dijkteen, belasting op de dijk en erosie bij de klif aan de zeezijde bij extreme condities en medium condities. Het uitvoeren van deze metingen in de Deltagoot zorgt ervoor dat er vertrouwenwekkende metingen ten grondslag worden gelegd aan de numerieke berekeningen die toegepast kunnen worden bij een dijkontwerp. Ten aanzien van het meten van de erosie gaat de aandacht primair uit naar de erosie bij de teen van de dijk en is het meten van de erosie bij de klif aan de zeezijde van secundair belang.

Doordat er al een vrij goede basis ligt in de beschikbare literatuur, kan er met een goede verificatie een rekenmethodiek worden gecreëerd die toepasbaar is in heel Nederland.

Zonder deze metingen blijft de invloed van de vegetatie onzeker en zal de te verdisconteren golfhoogtereductie bij extreme condities niet of nauwelijks boven 8% uitkomen (zoals Van der Reijden berekent op basis van slechts stoppels). Met deze proeven kan onder bepaalde omstandigheden een effect van 20 à 30% bereikt worden. En het geeft naar verwachting het benodigde vertrouwen dat nodig is om waterschappen te laten besluiten om de invloed van de vegetatie mee te nemen in het ontwerp.



*Figuur 8.2 Kwelder bij Tjeburen*

Als deze zaken op grote schaal worden gemeten dan kunnen we vervolgens de overige processen met bureaustudies, kleinere gootproeven, numerieke berekeningen en veldmetingen hieraan toevoegen:

- infragravity waves (voor zover deze al niet optreden in de proeven),
- effect van scheve golfaanval (2D in horizontaal)
- invloed van golfsteilheid in een bredere range dan in de proeven
- invloed van vegetatiedichtheid
- invloed van het meegroeien van het begroeide voorland (lange termijn impact)

Doordat de proefresultaten gebruikt worden voor het ijken van de numerieke modellen en aangevuld worden met de resultaten van de overige onderzoeken in het kader van het NWO-project 'Living Dikes', worden resultaten verkregen die naar verwachting toepasbaar zijn in een breed toepassingsgebied in de Waddenzee en Zuidwestelijke Delta. Hiermee borduren we voort op het werk van Möller (proeven op vegetatie met golven tot 1 m), Reents en Vuik (schade aan vegetatie), Zhu (invloed van soort en dichtheid), Vuik (golfhoogtereductie), Suzuki en Ascencioo (implementatie van invloed vegetatie in numeriek model Swan), Van der Reijden (minimale invloed van zwaar beschadigde vegetatie) en vele andere onderzoekers in dit werkveld.

Het gaat concreet om de volgende onderwerpen:

- primair:
  - golfhoogtereductie door de vegetatie op het voorland, afhankelijk van de waterstand, golfcondities en mate van schade aan de vegetatie
  - invloed van de vegetatie op de golfperiode (en spectrum) (en infra-gravity waves, mochten deze meetbaar optreden)
  - invloed op de golfhoogteverdeling
  - schade aan de vegetatie als functie van de waterstand en golfcondities
  - invloed van de vegetatie op de hydraulische belasting van de dijk, namelijk de golfloop en de golfdruk op het talud
  - erosie bij de teen van de dijk
- secundair:
  - erosie bij de klif aan de zeezijde van de begroeide kwelder
  - erosie van het kwelderoppervlak

In de Deltagoot van Deltares is het mogelijk om volgroeide kweldervegetatie, inclusief de ondergrond en de achterliggende dijk, op ware grootte aan te brengen en te beproeven met elke gewenste golfbelasting tot en met de extreme belasting van hoge golven. In dit hoofdstuk is dit nader uitgewerkt.

Door de Deltagoot in de breedte in tweeën te splitsen kan de erosie bij twee verschillende grondsoorten onderzocht worden. Er kan echter maar één type vegetatie beproefd worden vanwege de vereiste uniformiteit in golfdemping. Er wordt gekozen voor de op hogere kwelders veel voorkomende Elymus (Strandkweek) op advies van Tjeerd Bouma van NIOZ. Ten aanzien van het meten van de erosie gaat de aandacht primair uit naar de erosie bij de teen van de dijk en is het meten van de erosie bij de klif aan de zeezijde van secundair belang.

## 8.3 Modelopstelling en proevenprogramma

### 8.3.1 Kweldervegetatie in de Deltagoot

Voor het kwantificeren van de erosie van de ondergrond, schade aan de vegetatie en de golfhoogtereductie door de vegetatie is een zo natuurgetrouwe modelopstelling in de Deltagoot nodig. Dat betreft zowel de vegetatie als de ondergrond.

Gekozen wordt voor een volgroeide kwelder met geconsolideerde ondergrond. Bij een jonge kwelder met weinig geconsolideerde ondergrond is het denkbaar dat de erosie iets groter is. Doorgaans is dit een situatie die slechts een paar jaar aanwezig is, omdat de vegetatie een sterk versnelde consolidatie geeft (zie vraag 2 van Robert/Myron).

Om volgroeide kweldervegetatie naar de Deltagoot te brengen, is het noodzakelijk om deze in ongestoorde staat, inclusief de ondergrond, van het voorland voor een Waddenzeedijk te halen en te transporteren naar de Deltagoot. Het alternatief, het opkweken van deze vegetatie, kost namelijk een paar jaar.

Het doel is om de kweldervegetatie in wintertoestand te beproeven, omdat het te verwachten is dat de zwaarste stormen op de Nederlandse waterkeringen in de winter plaatsvinden (stormseizoen). De huidige planning is om deze proeven in december/januari uit te voeren en niet te lang ervoor de kweldervegetatie uit het voorland van de Waddenzeedijk te halen. Momenteel is dit gepland voor september, omdat de ervaring leert dat daarna de kwelder steeds minder begaanbaar wordt.

We zijn van plan om de gesteldheid van bodem en vegetatie te bemonsteren en bemeten, als de kwelderblokken bij Deltares zijn, en dit te vergelijken met de situatie in het veld. Door het beschikbaar hebben van deze data, is er ook een mogelijkheid dit te vergelijken met kwelders in een ander ontwikkelingsstadium die bijvoorbeeld te vinden zijn in een BwN maatregel (zie vraag 2 en 3 van Robert/Myron en zie vraag 2 en 5 van Diederik).

Deltares heeft ervaring met het steken van kleiblokken met gras van zeedijken door middel van speciale stalen mallen. Dezelfde methode kan nu ook gebruikt worden om de kweldervegetatie met ondergrond uit het voorland te steken en te transporteren naar de Deltagoot. De werkwijze is te zien in Figuur 8.3. Er wordt een stalen bak zonder bodem met een hydraulische kraan in de ondergrond gedrukt, vervolgens wordt de grond rondom weggegraven en wordt er een dikke stalen onderplaat onder geschoven. Zo ontstaat een bak van 2x2 m<sup>2</sup> met vegetatie en ondergrond, die met een vrachtwagen getransporteerd kan worden.

Gezien de vrij hoge vegetatie op de kwelder, wordt er een opzetstuk op de mal geplaatst tijdens het in de grond drukken, zodat de bak van de kraan de vegetatie niet plat drukt (zie vraag 3 van Jos).

Eenmaal aangekomen bij de Deltagoot wordt de stalen bak op het voorland geplaatst, wordt de onderplaat eronder uitgetrokken met een sterke lier en worden de zijwanden gelicht. Door de blokken klei met vegetatie hard tegen elkaar te drukken, wordt er een bijna naadloze en ongestoorde grondlaag met kweldervegetatie in de Deltagoot gerealiseerd (zie Figuur 8.4).



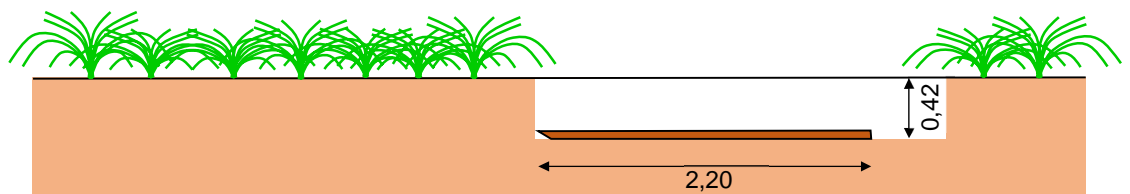
Figuur 8.3, Stalen bak zonder bodem wordt in de grond gedrukt (links) en na het rondom weggraven van de grond wordt een stalen bodemplaat eronder geschoven (rechts)



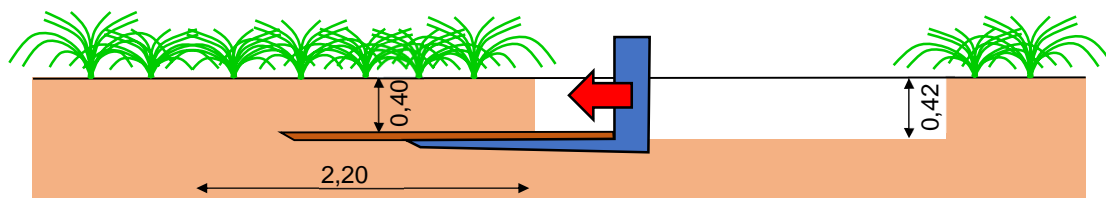
Figuur 8.4, In de Deltagoot worden de stalen bakken naast elkaar geplaatst (links) en wordt de grond met vegetatie uitgepakt en tegen elkaar geschoven, resulterend in een vrijwel naadloze kleilaag met vegetatie (rechts)

Met deze stalen bakken wordt de eerste 16 m vanaf de zeewaartse klif en de laatste 4 m tegen de dijk aangelegd. Hier krijgt de kweldervegetatie dus 70 cm dikke laag grond eronder. Voor de rest van de modelopstelling is een laag grond van 40 cm voldoende en wordt een iets eenvoudigere methode gebruikt voor het oogsten van de kweldervegetatie (zie Figuur 8.5 t/m Figuur 8.8):

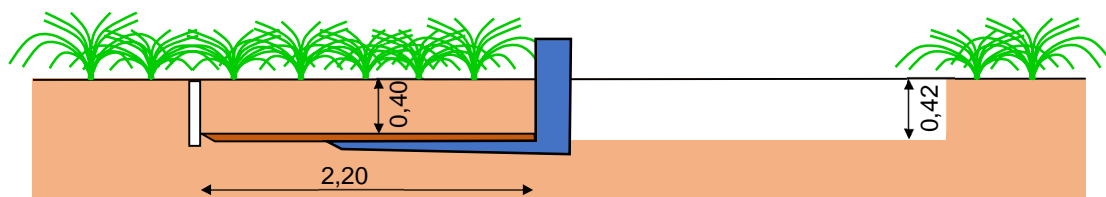
- gat in de kwelder graven van 2,5x2,5 m<sup>2</sup> en 40 cm diep
- 25 mm multiplex plaat van 2,2x2,2 m<sup>2</sup> in het gat leggen en vervolgens horizontaal onder de eraastgelegen kweldervegetatie (met grond) schuiven (met grote graafmachine).
- rondom los steken
- plaat met grond en vegetatie (met vork aan hydraulische kraan) optillen en naast het gat leggen
- zijwandjes rondom eraan schroeven
- oppakken en op vrachtwagen naar de Deltagoot



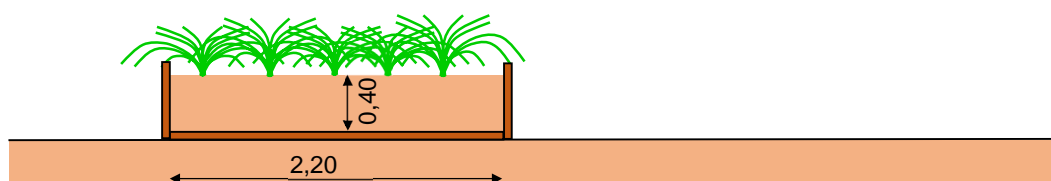
Figuur 8.5 Kuil graven van 0,42 m diep en 2,2 m breedte en 25 mm dikke multiplex onderplaat van 2,2x2,2 m<sup>2</sup> erin leggen



Figuur 8.6 Multiplex onderplaat onder de vegetatie drukken met grote palletvork aan 25 t hydraulische kraan



Figuur 8.7 Rondom weggraven met smalle lepel aan graafmachine (of pizza-wiel)



Figuur 8.8 Blok met vegetatie eruit hijsen en rondom met 15 mm multiplex inpakken

Tijdens het transport vanaf de Waddenzee naar Delft is het denkbaar dat het trillen in de vrachtwagen leidt tot een toename van de dichtheid van de ondergrond (zie vraag 2 van Diederik). In het verleden is dit nooit een probleem geweest, waarschijnlijk vanwege het grote gewicht van de kleiblokken die bewegingen dempt. Eventueel kunnen de kleiblokken op een zachte ondergrond in de vrachtwagen worden gezet.

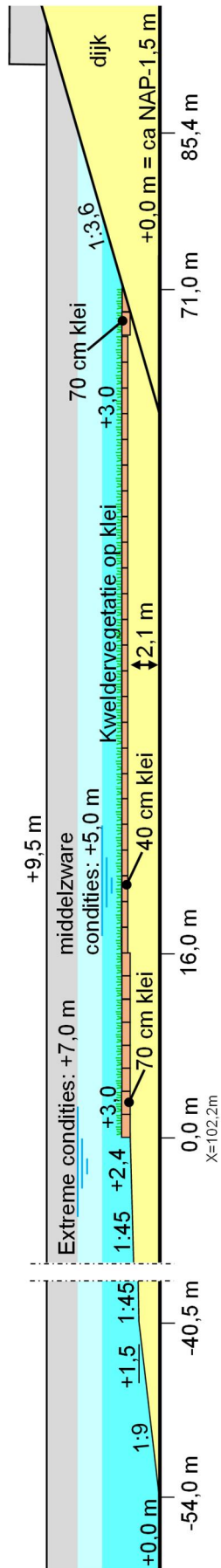
Het transport zal plaatsvinden in een dichte vrachtwagen, zodat de rijwind geen effect heeft op de vegetatie (zie vraag 5 van Diederik). Het feit dat het een halve dag in het donker zit, heeft geen invloed op de vegetatie. Er is overleg met Maike Paul, die direct betrokken was bij de proeven met kweldervegetatie in Hannover, om alle ervaring in het in goede staat houden van de vegetatie zowel tijdens transport als de proef, zo goed mogelijk te benutten.

### 8.3.2 Modelopstelling

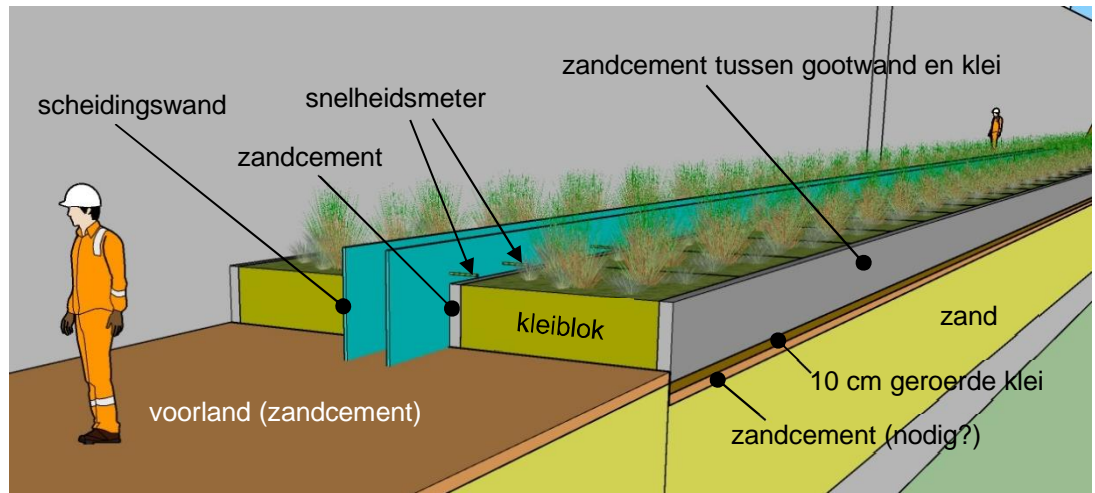
Het plan is om in de Deltagoot een begroeide vooroever van 71 m aan te leggen tegen een dijk met talud van 1:3,6. De modelopstelling is te zien in Figuur 8.9.

Aan de zeezijde van de kweldervegetatie is een onbegroeid voorland aanwezig met helling van 1:45, waar de golven zich aanpassen aan de beperkte diepte. Onder +1,5 m ten opzichte van de gootbodembodem loopt dit steiler naar beneden met een helling van 1:9, omdat dit de proeven verder niet beïnvloedt. Dit deel van de modelopstelling kan niet eroderen want het is vastgelegd met zandcement.

Details over deze modelopstelling moeten nog verder uitgewerkt worden. Voorlopig is het idee om in het eerste deel van de proeven de klif niet te beschermen en vanaf ca 5 m erosie een bescherming met bijvoorbeeld een rijshouten dammetje aan te brengen.



Figuur 8.9, Overzicht van de modelopstelling in de Deltagoot



Figuur 8.10, Modelopstelling aan de zeezijde van de kwelder (klif)

De bodem onder de vegetatie bestaat uit 40 en 70 cm kwelderklei met daaronder ongeveer 2,5 m zand, zie Figuur 8.9). Door de vervorming van de bodem en door de aanwezigheid van lucht, waardoor het water samendrukbaar is, kan er enige watertransport zijn in verticale richting in deze kleilaag, zowel in werkelijkheid als in de Deltagoot. De ervaring uit het verleden laat echter zien dat dit geen liquifactie (verweking / fluidisatie) geeft (zie vraag 4 van Robert / Myron en vraag 1 van Diederik). In bijlage B is de grootte van het verticale verhang afgeschat aan de hand van berekeningen voor een vereenvoudigde situatie..

Er is gekozen voor een rechte kwelder met vegetatie, zonder hoogte variatie, geulen en krekken. Dergelijke variaties zouden het kalibreren van de beschikbare formules bemoeilijken en bovendien is deze kwelder wat te klein om het effect op de golfcondities van dit soort variaties goed te meten.

Na het inbouwen van de kweldervegetatie in de Deltagoot worden monsters van de vegetatie genomen om de eigenschappen te bepalen en deze te vergelijken met die op de kwelder in Friesland (zie vraag 5 van Vincent). Het gaat om het product van de elasticiteitsmodulus (E) en traagheidsmoment (I). Zo kunnen we zien of de eigenschappen van de vegetatie in de Deltagoot door transport et cetera is veranderd..

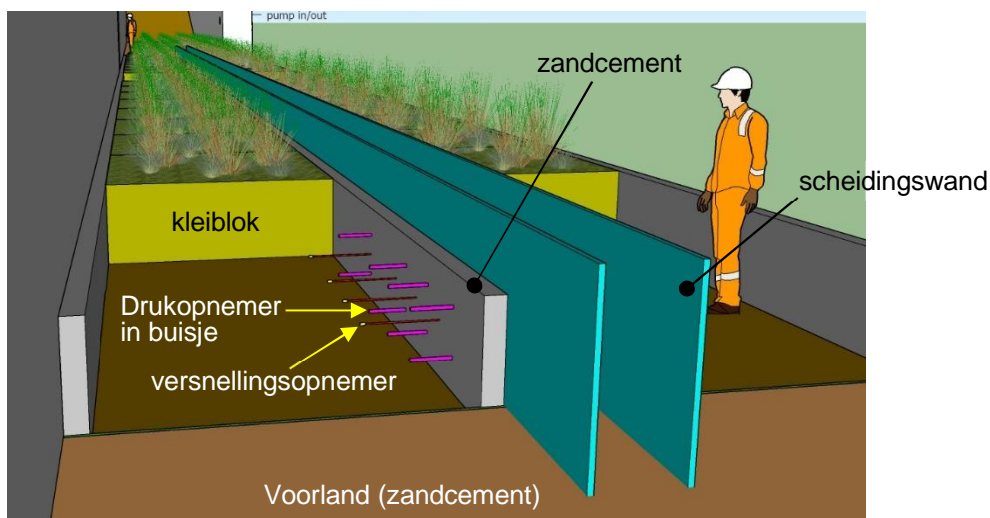
Gedacht wordt aan de volgende metingen:

- Golfhoogtemeter boven de kwelder  
Boven de kleiblokken met kweldervegetatie wordt de golfhoogte op een aantal locaties met behulp van video gemeten. Het doel hiervan is de golfhoogtereductie, golfhoogteverdeling en verandering van het spectrum nauwkeurig te bepalen. Mogelijk dat de Deltagoot te kort is om Infra-gravity waves nauwkeurig te meten. Dit gaat echter wel geprobeerd worden.
- Detailmeting van de golfhoogte bij de klif en op het voorland:  
Met twee Sick-lasers kan het wateroppervlak gemeten worden. Dit geeft belangrijke informatie over de golfhoogtereductie.
- Golfloop op de dijk
- Golfdruk op de dijk:  
Met 30 drukopnemers de golfdruk meten die nodig is om steenzettingen te ontwerpen of te beoordelen (kan in principe ook voor asfalt gebruikt worden)
- Orbitaalsnelheid tijdens de golven tussen de vegetatie en erboven:  
Enkele snelheidsmeters die tussen de vegetatie worden aangebracht op 10 cm boven het kleioppervlak, met de eerste boven de voorrand van de kweldervegetatie en vervolgens op onderlinge afstand van 1 m (aantal is afhankelijk van beschikbaarheid). Zie Figuur 8.10. Bovendien enkele bij de teen van de dijk.



Deze instrumenten hebben als doel om een relatie te leggen tussen de oppervlakte-erosie van de klei en de schuifspanning op het kleioppervlak. Verder kan een relatie gelegd worden tussen de watersnelheid en de schade aan de vegetatie.

- **Golfdruk in de klei:**  
12 drukopnemers op 25 cm van de zijkant in een stalen buisje op 0,5, 1,0 en 2,5 m van de voorrand van de kwelder, zie Figuur 8.11, en in de kwelderblokken bij de teen van de dijk.  
Deze instrumenten hebben als doel om vast te stellen hoe de druk in de klei zich opbouwt tijdens de golfbelasting en hoe deze druk zich voortplant in de klei. Dit zal met name meetbaar zijn zodra er scheuren in de klei zijn ontstaan door de golfbelasting. Dit levert validatiedata voor een te ontwikkelen numeriek rekenmodel.
- **Erosieproces (bewegingen van kleiblokken voordat ze wegspoelen):**  
8 versnellingsopnemers die los in de klei worden aangebracht door middel van een boring vanaf de zijkant, zie Figuur 8.11. Ze komen halverwege de hoogte van de kleilaag op een halve meter van de zijkant van de klei, op 0,75, 1,25 en 1,75 m van de voorrand van de kwelder en in de kwelderblokken bij de teen van de dijk.  
Deze instrumenten hebben als doel meer inzicht te krijgen in de bewegingen van de klei en kleiblokken tijdens het erosieproces. Dit is waarschijnlijk goed meetbaar zodra de erosie in de buurt van het instrument komt. Op deze wijze is waarschijnlijk een indruk te krijgen van het moment waarop er scheuren in de klei komen. De focus ligt op de eerste 2 m vanaf de klif, omdat het niet haalbaar is om dit over veel meer meters goed te meten.
- **Gedrag van de vegetatie tijdens de proeven:**  
Hoewel het water waarschijnlijk erg troebel is gaat toch geprobeerd worden om de beweging van de vegetatie tijdens de proeven te detecteren (bij voorkeur met video) (zie vraag 2 van Vincent).
- **Schade aan de vegetatie**  
Voor en na elke proef wordt de schade aan de vegetatie nauwgezet in kaart gebracht. De vegetatiedichtheid en hoogte zijn belangrijke parameters voor de kalibratie van de vegetatiemodule van Swan.



Figuur 8.11, Opengewerkte modelopstelling om te laten zien waar de drukopnemers en versnellingsopnemers in de klei zitten.

Na elke proef (met de duur van 1000 golven) wordt de klei en de vegetatie gedetailleerd geïnspecteerd (opnames van vegetatiekarakteristieken in vegetatieplots, biomassa van de drijvende vegetatie op het wateroppervlak) en wordt door middel van een laserscan het oppervlak van de gehele ondergrond ingemeten, aannemende dat dit zichtbaar is voor de laser tussen de planten. Als dat niet zichtbaar is, worden er een aantal indicatoren op het talud

geplaatst en ingemeten. Op basis van deze metingen wordt de erosie bepaald als functie van de hydraulische belasting.

De verwachting is dat de erosie vooral aan de zeezijde plaatsvindt (klif) en zeer beperkt bij de teen van de dijk.

Eventueel kunnen ook proeven uitgevoerd worden met de grastrekker om de sterkte van het wortelnet te vergelijken met dat van gras. Voorlopig is dit nog niet in het programma opgenomen (zie vraag 4 van Diederik).

### 8.3.3 Proevenprogramma

Het proevenprogramma bestaat uit een aantal proevenseries waarin steeds de volgende aspecten worden gemeten:

- de golftransmissie over de kwelder (golfhoogte-overschrijdingsverdeling en spectrum),
- bij welke golfcondities welke mate van schade aan de vegetatie optreedt,
- de belasting op de dijk (golfoploop en golfdruk op het talud),
- de erosie bij de teen van de dijk
- de erosie van het kwelderoppervlak (erosiediepte en erosievolume)
- de erosie van de klif aan de zeezijde (erosiediepte en erosievolume)

proef	h (m)	h <sub>kwelder</sub> (m)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	S <sub>op</sub> (-)	Opmerking
K01	5,00	2,00	0,80	3,58	0,04	
K02	5,00	2,00	1,00	4,00	0,04	
K03	5,00	2,00	1,00	5,66	0,02	
K04	5,00	2,00	1,20	4,39	0,04	
K05	6,00	3,00	1,00	4,00	0,04	
K06	6,00	3,00	1,20	4,39	0,04	
K07	6,00	3,00	1,40	4,74	0,04	
K08	6,00	3,00	1,40	6,70	0,02	
K09	6,00	3,00	1,60	5,06	0,04	
K10	7,00	4,00	1,60	5,06	0,04	
K11	7,00	4,00	1,80	5,37	0,04	
K12	7,00	4,00	2,00	5,66	0,04	
K13	7,00	4,00	2,00	8,01	0,02	
K14	6,00	3,00	1,60	5,06	0,04	
K15	6,00	3,00	1,40	6,70	0,02	
K16	6,00	3,00	1,40	4,74	0,04	
K17	5,00	2,00	1,20	4,39	0,04	
K18	7,00	4,00	2,00	5,66	0,04	Zonder vegetatie
K19	7,00	4,00	2,00	8,01	0,02	Zonder vegetatie
K20	6,00	3,00	1,40	6,70	0,02	Zonder vegetatie
K21	6,00	3,00	1,60	5,06	0,04	Zonder vegetatie
K22	5,00	2,00	1,00	5,66	0,02	Zonder vegetatie
K23	5,00	2,00	1,20	4,39	0,04	Zonder vegetatie

Tabel 8.1, Voorlopig proevenprogramma, dat nog nader geoptimaliseerd moet worden

Het voorlopige proevenprogramma is te vinden in Tabel 8.1. De volgorde van de proeven is zo gekozen dat begonnen wordt met de proeven die de minste erosie of schade aan de planten geven. De erosie bij de klif hebben we in de hand door middel van de bescherming (rijshouten dam) bij meer of minder proeven. Zo kunnen we inspelen op het proefverloop.

Er zijn proeven opgenomen met diverse golfsteilheden om te onderzoeken wat effect hiervan is, mede omdat de numerieke modellen onverwachte resultaten geven ten aanzien van dit aspect.

Dit proevenprogramma moet nog nader geoptimaliseerd worden.

Steeds gaat de volgende proef voort met de vegetatie-situatie van het einde van de vorige proef. Daarom wordt begonnen met de kleine golfhoogtes en komen de grote golfhoogtes pas aan het eind van het proevenprogramma. Elke proef duurt in principe 1000 golven, tenzij tijdens de uitvoering van de proeven geconcludeerd wordt dat een andere proefduur beter is (dit geeft antwoord op vraag 2 van Roy).

In de tabel is gebruik gemaakt van de volgende symbolen:

- $h$  = waterdiepte bij het golfschot (m)
- $h_{kwelder}$  = waterdiepte boven de kwelder (m)
- $H_{m0}$  = significante golfhoogte bij het golfschot (m)
- $T_p$  = golfperiode bij de piek van het spectrum bij het golfschot (s)
- $s_{op}$  =  $H_{m0}/(gT_p^2/(2\pi))$  = golfsteilheid (-)

De hoogste golfhoogte in het proevenprogramma betreft  $H_{m0} = 2,0$  m, wat het maximaal haalbare is in de Deltagoot.

In het proevenprogramma wordt stap voor stap de belasting op de vegetatie groter, zodat waarschijnlijk er steeds meer schade aan ontstaat. Tijdens de laatste vier proeven worden een aantal proeven weer herhaald, nadat de proeven met de zwaarste belasting zijn uitgevoerd. Er is dan veel meer schade aan de vegetatie dan de eerste keer dat deze werd uitgevoerd. Met deze proeven meten we de golfhoogtereductie en invloed op de golfperiode als de vegetatie zwaar beschadigd is door eerdere golfbelasting.

Mogelijk is er ook een invloed van de belastingduur op de omvang van de schade. Daarom worden enkele proeven met langere duur uitgevoerd (zie vraag 7 van Jos).

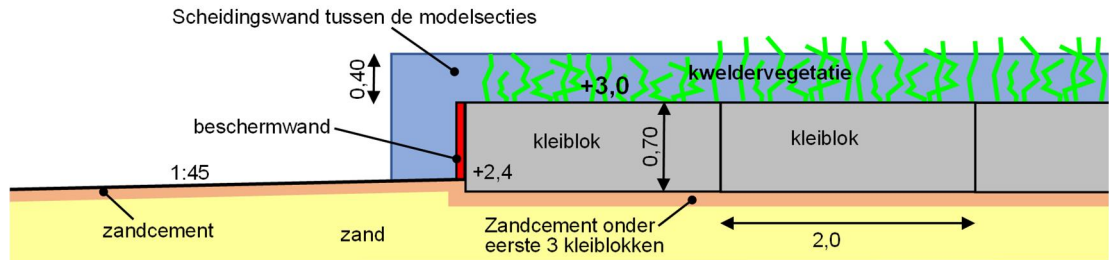
Schade aan de vegetatie zal in eerste instantie invloed hebben op de mate waarin de vegetatie de golfcondities beïnvloedt. Maar de schade kan ook zo omvangrijk worden dat de vegetatie de bodem niet meer beschermt en er grote erosie gaat optreden tijdens de extreme golfcondities. Dit lijkt minder waarschijnlijk, omdat doorgaans de wortels achterblijven in de bodem, maar dit wordt wel tussen de proeven gecontroleerd. Er wordt niet gekeken of er na een proef wortels in de bodem zijn afgebroken, terwijl de plant er nog wel staat.

Verder gaan er enkele proeven herhaald worden nadat de vegetatie volledig is verwijderd en de bodem vlak is gemaakt, zie proef K18 – K23. De keuze van de golfcondities en waterstand voor deze proeven wordt gemaakt aan de hand van de proefresultaten van de proeven tot dan toe. Deze proeven vormen de referentie voor het kwantificeren van de invloed van de vegetatie (0-situatie), zie vraag 5 en 7 van Robert/Myron).

Er wordt niet gekozen voor een ongeconsolideerde bodem als nul-situatie (voorland zonder vegetatie zoals in de werkelijkheid), omdat in de praktijk dit soort voorlanden veel lager liggen. Juist als de voorlanden wat hoger liggen en er vegetatie op komt, is er een versnelde consolidatie die binnen een paar jaar leidt tot een stevige ondergrond zoals beproefd wordt in de Deltagoot (zie vraag 7 van Robert/Myron). Hierdoor wordt er uitsluitend gekeken naar het verschil tussen wel en geen vegetatie. Dat er zonder vegetatie meer erosie zal gaan optreden, wordt hierin niet beschouwd.

Voorgesteld wordt om een deel van het proevenprogramma uit te voeren terwijl de klif aan de zeezijde is beschermd met tijdelijke wand, zie Figuur 8.12. Het feit dat deze klif beschermd wordt tegen erosie heeft geen invloed op de golftransmissie over de kwelder. Voorgesteld wordt om deze bescherming aan te brengen zodra er ca 5 m erosie is opgetreden en aan het eind van het proevenprogramma weer te verwijderen tijdens de proeven zonder vegetatie (zie vraag 3 van Roy).

De verticale klif, zoals getekend in Figuur 8.12, kan op zich invloed hebben op de golfcondities boven de kwelder. In nader overleg zal de uiteindelijke vormgeving hiervan worden vastgesteld.



Figuur 8.12, Modelopstelling aan zeezijde van de kwelder met beschermwand van rishout en/of breuksteen tijdens de golftransmissieproeven

Doordat na elke proef ook gekeken gaat worden naar de schade aan de vegetatie en erosie van de kwelder en bij de teen van de dijk, kunnen er ongeveer twee proeven per dag uitgevoerd worden.

Verder zal door schade aan de vegetatie er organisch materiaal aan het oppervlak drijven tijdens de proeven. Dit drijvende materiaal is naar verwachting zo weinig dat het geen invloed heeft op de golfcondities. Wel zal er een veekrand op het talud vormen. De ligging hiervan zal worden gemonitord, maar het zal ook worden verwijderd om te zorgen dat er betrouwbare golfoploopmetingen kunnen worden uitgevoerd (zie vraag 3 van Vincent). Na elke proef wordt het veek verwijderd.

Veekranden worden dikwijls gebruikt op de dijk om terug te rekenen wat de golfcondities waren. Door dit ook in de Deltagoot te doen, kan de methode verbeterd worden. De gemeten veekranden kunnen vergeleken worden met de resultaten uit de rapporten van Vos (2022) en Plouvier (2022), die ze gebruikt hebben om de berekende invloed van IG-waves te verklaren. Veekrandwaarnemingen zijn volgens Vos momenteel nog onvoldoende precies om onderscheid te maken tussen de verschillende rekenmodellen voor oploop en de invloed van IG-waves. Zij kunnen wel gebruikt worden om te verifiëren of een formule plausible uitkomsten geeft gegeven de grote onzekerheden.

In de praktijk kan het ook voorkomen dat er zoveel veek voor de dijk in het water drijft, dat er bijna geen golven meer op de dijk komen. Dit betreft tonnen aan materiaal (200 à 300 m<sup>3</sup> in de Deltagoot) en er wordt daarom niet voor gekozen dit in de Deltagoot te simuleren, gezien de hoge kosten van het aanbrengen en verwijderen van dit materiaal (zie vraag 3 van Diederik).

## 8.4 Locatiekeuze voor het steken van kweldervegetatie met ondergrond

Er loopt momenteel een overleg met de gebiedsbeheerders van de kwelders voor de dijk Koehool-Lauwersmeer om locaties te selecteren waar de kweldervegetatie kan worden geoogst. Voorlopig zijn er twee locaties op het voorland van de Peazumerlannen en een locatie oostelijk van de veerdam naar de veerboot van Holwerd als mogelijkheid geopperd.

Informatie over het lutum- en zandgehalte is gegeven in Tabel 2.1.



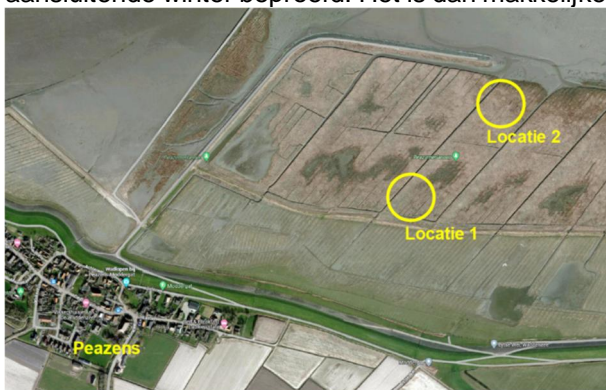
Figuur 8.13, Holwerd, oostelijk de veerdam



Figuur 8.14, Peazumerlannen

Omdat de zwaarste stormen in de winter verwacht worden tijdens het stormseizoen, ligt de focus op vegetatie in wintertoestand. Daarom is het plan om de proeven in de winter uit te voeren.

Verder wordt de vegetatie bewust aan het eind van het groeiseizoen gestoken en tijdens de aansluitende winter beproefd. Het is dan makkelijker om de vegetatie in goede staat te houden.



Figuur 8.15, Twee potentiële locaties op de Peazumerlannen

## 8.5 Rapportage

De modelopstelling, proevenprogramma en proefresultaten worden gerapporteerd in een meetverslag. Alle ruwe metingen en de verwerkte data worden beschikbaar gesteld aan de partners van Living Dikes.

Na het opstellen van deze meetrapportage, wordt ook een eerste versie van een handreiking opgesteld. In deze handreiking wordt beschreven hoe en in welke mate een begroeide kwelder kan worden meegenomen in het ontwerp van een dijk. Dat gaat enerzijds om de dijkbekleding en anderzijds om de dijkhoogte. Verder wordt in deze handreiking een rekenmethode gegeven voor het berekenen van de invloed van de vegetatie op de belasting van de dijk. Dit betreft de maatgevende golfdruk op het talud en de invloed op golfploop/golfoverslag.

De feedback van de waterschappen zal in deze eerste versie worden verwerkt. Deze handreiking wordt in 2024 opgeleverd.

Een belangrijk aspect van de handreiking zal het omgaan met onzekerheden zijn. De invloed van vegetatie wordt door diverse factoren beïnvloed, met grote verscheidenheid in de praktijk. Aan de hand van de informatie uit de literatuur en de resultaten van de Deltagootproeven zullen hier praktisch bruikbare aanbevelingen voor worden gedaan.

De handreiking zal concrete informatie bevatten over hoe de vegetatiemodule van Swan gebruikt moet worden om de invloed van vegetatie op correcte wijze te verdisconteren. Dit betreft een concrete aanzet voor het opnemen van de kennis uit dit onderzoek in het BOI (zie vraag 6 van Robert/Myron en vraag 9 van Diederik).

Het is denkbaar dat de vegetatiemodule van Swan enige aanpassing nodig heeft, bijvoorbeeld omdat de rekenmethode afhankelijk moet worden van de orbitaalsnelheid (zie vraag 4 van Vincent).

Daarnaast zullen op basis van een aantal berekeningen ook eenvoudige vuistregels worden afgeleid, waarmee snel de globale invloed van de vegetatie kan worden berekend voor concrete dijkversterkingsprojecten. Dit is praktisch voor de verkenningsfase, waarna bij het uitwerken van het definitief ontwerp alsnog Swan-berekeningen met vegetatiemodule kunnen worden uitgevoerd voor de dijkvakken waar de vegetatie een belangrijke invloed heeft.

Deze eenvoudige vuistregels leveren reductiefactoren voor de golfcondities die berekend zijn met Hydra-NL of Riskeer ten behoeve van voorlopige berekeningen (zie vraag 4 van Jos). Input voor deze eenvoudige berekeningen is:

- waterdiepte op het voorland
- breedte van het voorland
- golfhoogte aan de rand van de kwelder
- golfsteilheid aan de rand van de kwelder
- golfrichting
- windsnelheid
- type vegetatie

Met de eenvoudige formules wordt dan eerst de te verwachten schade aan de vegetatie berekend en vervolgens de invloed op de golfcondities. In een later stadium kunnen gedetailleerde vegetatieschadeberekeningen en Swan-berekeningen met de vegetatiemodule worden uitgevoerd, eventueel in 1-D. Daar is waarschijnlijk inbreng van een expert bij nodig, omdat een gemiddeld dijkontwerpteam hier te weinig kennis voor heeft. Mogelijk kan dit in de verdere toekomst geautomatiseerd worden in Riskeer (dat valt buiten het huidige project).

Nadat het hier geoffreerde onderzoek is afgerond zal de handreiking verder uitgebreid worden door het team van 'Living Dikes' in samenspraak met de betrokken waterschappen. Er zullen dan ook andere aspecten worden opgenomen, zoals:

- verwachte lange-termijn groei van het voorland als functie van de hoeveelheid sediment in het water
- bijdrage aan de natuurwaarde van het gebied
- recreatie
- juridische aspecten en vergunbaarheid
- et cetera

De eindversie van de handreiking wordt verwacht in 2026, aan het eind van het Living Dikes project. Die eindversie van de handreiking is geen onderdeel van het Deltagootproject, maar een product van het NWO-project Living Dikes.

Tijdens de analyse van de proefresultaten zal ook een overleg met Rijkswaterstaat-WVL nagedacht worden hoe de resultaten concreet in BOI kunnen gaan landen en/of een aanpak ontwikkeld kan worden hoe bestaande databases op project-specifiek niveau aangepast kunnen worden (via vegetatiemodule van SWAN).

## 9 Conclusies

De onderhavige rapportage betreft fase 1 van een onderzoek dat wordt uitgevoerd in opdracht van het Wetterskip Fryslân, met financiering van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), om specifieke kennisleemtes in te vullen die thans het verdisconteren van de invloed van de kweldervegetatie op het waterkeringssysteem in de weg staan.

Uit dit onderzoek blijkt dat het interessante voordelen biedt als begroeide kwelders een onderdeel vormen van het waterkeringssysteem. Enerzijds zorgt het voor een reductie van de golfbelasting op de dijk, die meegroeit met de zeespiegelstijging en zo blijvend de golfbelasting reduceert, en heeft een reductie van de erosie bij de teen van de dijk. Anderzijds draagt het bij aan het oplossen van de ecologische knelpunten van de Waddenzee.

De begroeiing draagt bij aan het verkleinen van de golfhoogte bij de dijk, maar deze verkleining is wel afhankelijk van de vegetatiesoort en schade aan de vegetatie. Naarmate de golven groter zijn, zal er meer schade ontstaan aan de vegetatie. De golfhoogtereductie die bij kleine golven ( $H_{m0} < 1$  m) tientallen procenten kan zijn, zal daarom bij grote golven beperkt blijven tot 5 à 15% bij een kwelder met een breedte van honderden meters.

Er is in het verleden al veel onderzoek uitgevoerd naar de invloed van golven op de schade aan de vegetatie en de invloed van de vegetatie op de golfhoogtereductie. Dit heeft er onder meer toe geleid dat er een vegetatiemodule is voor Swan, waarmee de invloed van de vegetatie op de golfcondities kan worden berekend. De juiste keuze van de inputparameters is echter nog wel een probleem, zeker als het gaat om beschadigde vegetatie. Daarnaast zou het mooi zijn als het veranderende gedrag van vegetatie onder toenemende golfhoogtes kan worden meegenomen. Om de mate van schade door afbreken aan de vegetatie te berekenen is er het rekenmodel van Vuik. Deze rekenmethode lijkt vrij goed te werken voor een breed scala aan vegetatiesoorten.

De kennis omtrent de invloed van de vegetatie op de golfcondities wordt echter nog niet toegepast bij het ontwerpen en beoordelen van waterkeringen. Het belangrijkste knelpunt hierbij is het ontbreken een overtuigende kalibratie met golven in de range van 1 tot 2 m hoogte met een focus op golfdemping, schade en gedrag van de vegetatie in de golven en erosie bij de teen.

In hoofdstuk 8 van dit rapport is een onderzoek voorgesteld in de Deltagoot van Deltares, met echte kweldervegetatie uit de Waddenzee. Hiermee kan een kwelder met breedte van 70 m worden gemaakt, die belast kan worden met grote golven bij verschillende waterstanden. De verwachting is dat dit de benodigde kalibratie gaat opleveren. Met deze kalibratie komt er een rekenmethode beschikbaar waarmee waterschappen met vertrouwen de invloed van vegetatie kunnen verdisconteren in het ontwerp en beoordeling van waterkeringen. Dit kan enerzijds miljoenen euro's schelen bij dijkversterkingsprojecten (Deltares & Living Dikes, concept plan van aanpak 15-06-2022) en anderzijds een grote stimulans zijn voor het verder ontwikkelen en beheren van begroeide kwelders.



# Referenties

Ascencio Ascencio, J. (2020). Spectral Wave Dissipation by Vegetation: A new frequency distributed dissipation model in SWAN.

Ascencio, J. A., Jacobsen, N. G., McFall, B. C., Groeneweg, J., Vuik, V., & Reniers, A. J. (2022) Evaluation of implicit and explicit wave dissipation models for submerged and emergent aquatic vegetation *Journal of Coastal Research*, 2022

Baptist, M. J., Dankers, P., Cleveringa, J., Sittoni, L., Willemsen, P. W. J. M., Van Puijenbroek, M. E. B., ... & Elschot, K. (2021). Salt marsh construction as a nature-based solution in an estuarine social-ecological system. *Nature-Based Solutions*, 1, 100005.

Battjes, J. A., & Groenendijk, H. W. (2000). Wave height distributions on shallow foreshores *Coastal Engineering*, 40(3), 161–182. doi:[https://doi.org/10.1016/s0378-3839\(00\)00007-7](https://doi.org/10.1016/s0378-3839(00)00007-7)

Bondoni, M., Mel, R., Solari, L., Lanzoni, S., Francalanci, S., & Oumeraci, H. (2016). Insights into lateral marsh retreat mechanism through localized field measurements. *Water Resources Research*, 52(2), 1446-1464. [10.1002/2015wr017966](https://doi.org/10.1002/2015wr017966).

Best, Ü. S. N., Van der Wegen, M., Dijkstra, J., Willemsen, P. W. J. M., Borsje, B. W., & Roelvink, D. J. A. (2018). Do salt marshes survive sea level rise? Modelling wave action, morphodynamics and vegetation dynamics. *Environmental Modelling & Software*, 109, 152-166. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.004>.

Bouma, T. J., Friedrichs, M., Klaassen, P., Van Wesenbeeck, B. K., Brun, F. G., Temmerman, S., ... & Herman, P. M. J. (2009). Effects of shoot stiffness, shoot size and current velocity on scouring sediment from around seedlings and propagules. *Marine Ecology Progress Series*, 388, 293-297.

Callaghan, D. P., Bouma, T. J., Klaassen, P., van der Wal, D., Stive, M. J. F., & Herman, P. M. J. (2010). Hydrodynamic forcing on salt-marsh development: Distinguishing the relative importance of waves and tidal flows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89(1), 73-88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2010.05.013>.

Cao, H., Zhu, Z., Balke, T., Zhang, L., & Bouma, T. J. (2018). Effects of sediment disturbance regimes on *Spartina* seedling establishment: Implications for salt marsh creation and restoration. *Limnology and Oceanography*, 63(2), 647-659.

Colosimo, I., de Vet, P.L.M., van Maren, D.S., Reniers, A.J.H.M., Winterwerp, J.C., van Prooijen, B.C., 2020. The Impact of Wind on Flow and Sediment Transport over Intertidal Flats. *Journal of Marine Science and Engineering* 8, 910. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/8/11/910>, doi:10.3390/jmse8110910.

Colosimo, I., van Maren, D.S., de Vet, P.L.M., Winterwerp, J.C., van Prooijen, B.C., in review. Winds of Opportunity: the Effects of Wind on Intertidal Flat Accretion. Submitted to *Geomorphology*.

D'Alpaos, A., & Marani, M. (2016). Reading the signatures of biologic–geomorphic feedbacks in salt-marsh landscapes. *Advances in Water Resources*, 93, 265-275. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.004>.

- Dalrymple, R. A., Kirby, J. T., & Hwang, P. A. (1984). Wave diffraction due to areas of energy dissipation. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 110(1), 67-79.
- De Jong, D.J., K.S. Dijkema, J.H. Bossinade, & J.A.M. Janssen, 1998. SALT97, een classificatieprogramma voor kweldervegetaties. Rijkswaterstaat (RIKZ, Directie Noord Nederland, Meetkundige Dienst) & IBN-DLO (Texel), 26 p.
- Deltares (2023). Delft3D-WAVE simulation of short-crested waves with SWAN User Manual.
- Deltares & Living Dikes (concept, 15-06-2022). Plan van aanpak kwantificering van werking kwelder als onderdeel van waterkeringssysteem, Erosie van kwelder en golfhoogtereductie in de Deltagoot meten.
- Dijkema, K. S., Van Duin, W. E., Dijkman, E. M., Nicolai, A., Jongerius, H., Keegstra, H., ... & Jongsma, J. J. (2011). Vijftig jaar monitoring en beheer van de Friese en Groninger kwelderwerken: 1960–2009. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOT-werkdocument, 229.
- Doeleman, M.W., Den Bieman, J.P. (2022). Influence of water depth on the wave height, wave run-up and front velocities. Deltares, report 11208034-011, September 2022
- Duin, W.E. (2018). Kweldermonitoring in de Peazemerlannen en het referentiegebied West-Groningen. Jaarrapport 2017, Artemisia, rapport 27 maart 2018
- Eekman, L. H. (2021). Seasonal variation in salt marsh vegetation: impact of physical stressors on the development, decay and seed retention of *Salicornia Europaea* (Master's thesis, University of Twente).
- Elschot, K., Puijenbroek, M., Lagendijk, G., van der Wal, J. T., & Sonneveld, C. (2020). Lange-termijnontwikkeling van kwelders in de Waddenzee (1960-2018) (No. 182). Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu.
- Fagherazzi, S. (2014). Coastal processes: Storm-proofing with marshes. *Nature Geosci*, 7(10), 701-702.10.1038/ngeo2262.
- Ford, H., Garbutt, A., Ladd, C., Malarkey, J., & Skov, M. W. (2016). Soil stabilization linked to plant diversity and environmental context in coastal wetlands. *Journal of vegetation science*, 27(2), 259-268.
- Friess, D. A., Krauss, K. W., Horstman, E. M., Balke, T., Bouma, T. J., Galli, D., & Webb, E. L. (2012). Are all intertidal wetlands naturally created equal? Bottlenecks, thresholds and knowledge gaps to mangrove and saltmarsh ecosystems. *Biological Reviews*, 87(2), 346-366.
- Hasselmann, K. F., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Eake, K., et al. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint North sea wave Project (JONSWAP). In *Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A*.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge: Cambridge University Press

- Houttuijn Bloemendaal, L. J., D. M. FitzGerald, Z. J. Hughes, A. B. Novak & I. Y. Georgiou (2023), Reevaluating the wave power-salt marsh retreat relationship, *Nature Portfolio*, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30042-y>
- Jacobsen, N. G., & McFall, B. C. (2019). A frequency distributed dissipation model for canopies. *Coastal Engineering*, 150, 135-146.
- Karmpadakis, I., Swan, C., & Christou, M. (2022). A new wave height distribution for intermediate and shallow water depths. *Coastal Engineering*, 175, 104130. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104130>
- Kirwan, M. L., & Murray, A. B. (2007). A coupled geomorphic and ecological model of tidal marsh evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(15), 6118-6122. [10.1073/pnas.0700958104](https://doi.org/10.1073/pnas.0700958104).
- Kirwan, M. L., Guntenspergen, G. R., d'Alpaos, A., Morris, J. T., Mudd, S. M., & Temmerman, S. (2010). Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level. *Geophysical research letters*, 37(23).
- Kirwan, M. L., Temmerman, S., Skeeahan, E. E., Guntenspergen, G. R., & Fagherazzi, S. (2016). Overestimation of marsh vulnerability to sea level rise. *Nature Climate Change*, 6(3), 253-260.
- Klein Breteler, M. (2018). Maximale significante golfhoogte op ondiep water. Deltares, memo 11202105-000-GEO-0001, 12 maart 2018
- Klein Breteler, M., G.C. Mourik en D. Kaste (2022). Documentatie Steentoets. Deltares, rapport 11208059-002, juni 2022
- Klopman, G., & Meer, J. W. V. D. (1999). Random wave measurements in front of reflective structures. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 125(1), 39-45.
- Koch, E. W., Barbier, E. B., Silliman, B. R., Reed, D. J., Perillo, G. M., Hacker, S. D., ... & Wolanski, E. (2009). Non-linearity in ecosystem services: temporal and spatial variability in coastal protection. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 29-37.
- Lashley, C. H., Jonkman, S. N., van der Meer, J., Bricker, J. D., and Vuik, V. (2022). The influence of infragravity waves on the safety of coastal defences: a case study of the Dutch Wadden Sea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, 1–22, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1-2022>.
- Leonardi, N., & Fagherazzi, S. (2014). How waves shape salt marshes. *Geology*, 42(10), 887-890. [10.1130/g35751.1](https://doi.org/10.1130/g35751.1).
- 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(1), 64-68. [10.1073/pnas.1510095112](https://doi.org/10.1073/pnas.1510095112).
- Madsen, O., Y.-K. Poon and H. Graber, 1988. "Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory." In *Proceedings 21th International Conference Coastal Engineering*, ASCE, pages 492-504
- Marani, M., D'Alpaos, A., Lanzoni, S., & Santalucia, M. (2011). Understanding and predicting wave erosion of marsh edges. *Geophysical Research Letters*, 38(21). [10.1029/2011gl048995](https://doi.org/10.1029/2011gl048995).

- Marin-Diaz, B., van der Wal, D., Kaptein, L., Martinez-Garcia, P., Lashley, C. H., de Jong, K., ... & Bouma, T. J. (2023). Using salt marshes for coastal protection: Effective but hard to get where needed most. *Journal of Applied Ecology*.
- Mariotti, G. (2020). Beyond marsh drowning: The many faces of marsh loss (and gain). *Advances in Water Resources*, 144, 103710. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103710>.
- Mariotti, G., & Canestrelli, A. (2017). Long-term morphodynamics of muddy backbarrier basins: Fill in or empty out? *Water Resources Research*, 53(8), 7029-7054. [10.1002/2017wr020461](https://doi.org/10.1002/2017wr020461).
- Mariotti, G., & Fagherazzi, S. (2010). A numerical model for the coupled long-term evolution of salt marshes and tidal flats. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F1). [10.1029/2009JF001326](https://doi.org/10.1029/2009JF001326).
- Mariotti, G., & Fagherazzi, S. (2013). Critical width of tidal flats triggers marsh collapse in the absence of sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(14), 5353. [10.1073/pnas.1219600110](https://doi.org/10.1073/pnas.1219600110).
- McLoughlin, S. M., Wiberg, P. L., Safak, I., & McGlathery, K. J. (2015). Rates and Forcing of Marsh Edge Erosion in a Shallow Coastal Bay. *Estuaries and Coasts*, 38(2), 620-638. [10.1007/s12237-014-9841-2](https://doi.org/10.1007/s12237-014-9841-2).
- Méndez, F.J., Losada, I.J., Losada, M.A. (1999). Hydrodynamics induced by wind waves in a vegetation field. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978--2012), 104, 18383–18396.
- Mendez, F.J., Losada, I.J. (2004). An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal Engineering*, 51, 103–118.
- MER (2022). Dijkversterking Koehool-Lauwersmeer, Tussentijds toetsingsadvies over het milieueffectrapport. Commissie voor de milieueffectrapportage, rapport 3481, 23 maart 2022
- Möller, I., Spencer, T., French, J.R., Leggett, D.J., Dixon, M. (1999). Wave Transformation Over Salt Marshes: A Field and Numerical Modelling Study from North Norfolk, England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49, 411–426.
- Möller, I. (2006). Quantifying saltmarsh vegetation and its effect on wave height dissipation: Results from a UK East coast saltmarsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 69(3-4), 337-351.
- Möller, I., Kudella, M., Rupprecht, F., Spencer, T., Paul, M., Van Wesenbeeck, B. K., ... & Schimmels, S. (2014). Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. *Nature Geoscience*, 7(10), 727-731.
- Mourik, G.C. (2012). Locatie maximale belasting op steenzettingen bij ondiepe voorlanden. *Deltares*, rapport 1202551-008-HYE-0002, 13 februari 2012
- Plouvier, N. (2022). The influence of infra-gravity waves on dike overtopping for shallow foreshores. *RWS en Aix-Marseille Université*, augustus 2022
- Reents, Möller, Evans, Schouters, Jensen, Paul, Bouma en anderen (2022). Species-specific and seasonal differences in the resistance of salt-marsh vegetation to wave impact. *Frontiers in Marine Science*, 14 december 2022

- Reijden, I.M.H. van der (2019). Effectiviteit van vegetatie op voorlanden, Een studie naar de golfdempende werking van het voorland Noorderleece. TU-Delft, Wetterskip Fryslân, april 2019
- Rupprecht, F., Möller, I., Evans, B., Spencer, T., & Jensen, K. (2015). Biophysical properties of salt marsh canopies—Quantifying plant stem flexibility and above ground biomass. *Coastal Engineering*, 100, 48-57.
- Rupprecht, F., Möller, I., Paul, M., Kudella, M., Spencer, T., Van Wesenbeeck, B. K., ... & Schimmels, S. (2017). Vegetation-wave interactions in salt marshes under storm surge conditions. *Ecological Engineering*, 100, 301-315.
- Schuerch, M., Vafeidis, A., Slawig, T., & Temmerman, S. (2013). Modeling the influence of changing storm patterns on the ability of a salt marsh to keep pace with sea level rise. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(1), 84-96.
- Schulze, D., Rupprecht, F., Nolte, S., & Jensen, K. (2019). Seasonal and spatial within-marsh differences of biophysical plant properties: implications for wave attenuation capacity of salt marshes. *Aquatic Sciences*, 81(4), 65.
- Schwarz, C., Gourgue, O., van Belzen, J., Zhu, Z., Bouma, T. J., van de Koppel, J., . . . Temmerman, S. (2018). Self-organization of a biogeomorphic landscape controlled by plant life-history traits. *Nature Geoscience*, 11(9), 672-677.10.1038/s41561-018-0180-y.
- Schwarz, C., Ye, Q. H., van der Wal, D., Zhang, L. Q., Bouma, T., Ysebaert, T., & Herman, P. M. J. (2014). Impacts of salt marsh plants on tidal channel initiation and inheritance. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(2), 385-400.10.1002/2013jf002900.
- Siegersma, T. R. (2022). Modelling pioneer vegetation establishment at constructed salt marshes from seasons to decades (Master's thesis, University of Twente).
- Silliman, B. R., van de Koppel, J., McCoy, M. W., Diller, J., Kasozi, G. N., Earl, K., ... & Zimmerman, A. R. (2012). Degradation and resilience in Louisiana salt marshes after the BP–Deepwater Horizon oil spill. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(28), 11234-11239.
- Steezel, H., J. Groeneweg en V. Vuijk (2020). Effectiviteit Voorlanden HR, Samenvattende rapportage. POV-Waddenzeedijken, rapport OW.11503/L / C03011.000544,10 februari 2020
- Stoorvogel (unpublished data), shear strength measurements of natural salt marshes and Nature-based Solutions.
- Suzuki, T., & Arikawa, T. (2010). Numerical analysis of bulk drag coefficient in dense vegetation by immersed boundary method. In *Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering, ICCE 2010, June/July, Shanghai*.
- Suzuki, T., Zijlema, M., Burger, B., Meijer, M. C., & Narayan, S. (2012). Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN. *Coastal Engineering*, 59(1), 64-71.
- Swart, D.H., 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Delft Hydraulics Lab., Publ. 131.
- Tambroni, N., & Seminara, G. (2012). A one-dimensional eco-geomorphic model of marsh response to sea level rise: Wind effects, dynamics of the marsh border and equilibrium. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).10.1029/2012jf002363.

- TAW (2002). Technical Report Wave Run-Up and Wave Overtopping At Dikes. Technical Advisory Committee on Flood Defences, Delft, The Netherlands
- Temmerman, S., Bouma, T. J., Van de Koppel, J., Van der Wal, D., De Vries, M. B., & Herman, P. M. J. (2007). Vegetation causes channel erosion in a tidal landscape. *Geology*, 35(7), 631-634. [10.1130/g23502a.1](https://doi.org/10.1130/g23502a.1).
- Teunis, M., & Didden, K. (2018). Blue Carbon in Nederlandse kwelders. Resultaten van vier kwelders in beheergebieden van Natuurmonumenten. Bureau Waardenburg Rapportnr, 18-301.
- Tonelli, M., Fagherazzi, S., & Petti, M. (2010). Modeling wave impact on salt marsh boundaries. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C9).
- van den Berg, M. (2021). Processes and parameters underlying the failure of salt marsh vegetation in different sediments.
- van der Reijden, I. (2019). Effectiviteit van vegetatie op voorlanden: Een studie naar de golfdempende werking van het voorland'Noorderleech'-Stagerapport.
- Van Loon-Steensma, J. M., Schelfhout, H. A., van Hattum, T., Smale, A., Gözüberk, I., & van Dijken, M. (2014). Innovatieve dijken als strategie voor een veilig en aantrekkelijk Waddengebied: Samenvatting van het Deltaprogramma Waddengebied onderzoek naar innovatieve dijken (No. 2535). Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Van Rijn, L. C. (1990). Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans (Vol. 12). Amsterdam, The Netherlands: Aqua Publications.
- Van Rijn, L. C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.
- Van Steeg, P., de Ridder, M., Capel, A. en M. Bottema. (2020) Influence of water depth on wave overtopping  
Proceeding FLOODrisk 2020. DOI [10.3311/FloodRisk2020.1.25](https://doi.org/10.3311/FloodRisk2020.1.25)
- Vos, R. (2022). Golfoploopmodellering voor de Waddenzee met toevoeging van Infragravity waves. Rijkswaterstaat, 6 januari 2022
- Vuik, V., S. N. Jonkman, B. W. Borsje, T. Suzuki (2016). Nature-based flood protection: The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes. *Elsevier, Coastal Engineering* 116 (2016) 42–56, juni 2016
- Vuik, V. (2017), POV Waddenzeedijken; effectiviteit voorlanden HR. Memorandum Stabiliteit van vegetatie.
- 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.
- 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 Coast Management* 171, 1 april 2019, pagina 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.01.010>

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.

Wang, H., van der Wal, D., Li, X., van Belzen, J., Herman, P. M. J., Hu, Z., . . . Bouma, T. J. (2017). Zooming in and out: Scale dependence of extrinsic and intrinsic factors affecting salt marsh erosion. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(7), 1455-1470.10.1002/2016JF004193.

Willemsen, P. W., Borsje, B. W., Vuik, V., Bouma, T. J., & Hulscher, S. J. (2020). Field-based decadal wave attenuating capacity of combined tidal flats and salt marshes. *Coastal engineering*, 156, 103628.

Willemsen, P. W., Horstman, E. M., Bouma, T. J., Baptist, M. J., Van Puijenbroek, M. E., & Borsje, B. W. (2022). Facilitating salt marsh restoration: the importance of event-based bed level dynamics and seasonal trends in bed level change. *Frontiers in Marine Science*, 8, 2100.

Winterwerp, J. C., de Boer, G. J., Greeuw, G., & van Maren, D. S. (2012). Mud-induced wave damping and wave-induced liquefaction. *Coastal engineering*, 64, 102-112.

Zhu et al. (2020). Biomechanical properties of marsh vegetation in space and time: effects of salinity, inundation and seasonality. *Annals of Botany* 125: pp277-289, 2020

Zhu, Z., Vuik, V., Visser, P. J., Soens, T., van Wesenbeeck, B., van de Koppel, J., ... & Bouma, T. J. (2020). Historic storms and the hidden value of coastal wetlands for nature-based flood defence. *Nature Sustainability*, 3(10), 853-862.

## A Adviesteam dijkontwerp

Het Adviesteam Dijkontwerp heeft op 17 maart een reactie gegeven op het onderzoeksplan van januari. Samengevat zijn in dat advies de volgende vragen gesteld:

1. Hoe verhoudt de reductie door vegetatie zich tot de onzekerheid die er is ten aanzien van de dieptelimitering die wordt gekenmerkt door de verhouding  $H_{m0}/d$ ?
2. Hoe representatief is de Deltagootproef voor de bepalende condities, gegeven dat alleen dissipatie in de proef kan worden meegenomen en windgroei niet (en studie zeespiegelstijging laat zien dat het effect van vegetatie modelmatig fors minder is als windgroei meegenomen wordt)?
3. In de proef worden golven opgewekt op grotere waterdiepte (3 meter dieper dan op kwelder) en dan na een helling op de kwelder losgelaten. Dit roept de vraag op hoe representatief de proef hiermee is voor de werkelijke situatie buiten. De afstand waarover de golven zich kunnen aanpassen is relatief kort, waardoor het gevaar bestaat dat processen en de bijbehorende onzekerheden gemixt worden.
4. Er al veel verschillende beschrijvingen van de golfhoogteverdeling beschikbaar. Wat denken we hier te gaan leren en hoe kunnen we het resultaat in relatie tot de sterktemodellering gebruiken?
5. Specifiek voor de Waddenzee geldt dat de hydraulische belastingen in de Waddenzee complex en derhalve onzeker zijn. Denk aan het doordringen van deining en de bijdrage van infra-gravity waves aan de golfoploop. Wat is de invloed van deze (en mogelijk andere) projectspecifieke elementen en in hoeverre is dit van invloed op de representativiteit van de uitkomsten (voor project en generiek)?
6. De Deltagootproef is nu vooral gericht op het kwantificeren van het effect van de aanwezige vegetatie. De resultaten moeten vervolgens naar de praktijk gebracht worden. Dit kan middels een aanpassing van de voorlandmodule, maar er zijn ook andere opties. Aanbevolen wordt om duidelijk op te nemen hoe de resultaten naar de praktijk worden gebracht.
7. Aanbevolen wordt de impact op de waterveiligheid voor bijvoorbeeld de casus Koehool-Lauwersmeer expliciet te bepalen.
8. Maak duidelijk waarom een Deltagootproef de geëigende methode is om de geconstateerde kennisleemtes weg te nemen. Maak hierin onderscheid tussen generieke en projectspecifieke kennisleemtes. Besteed ook aandacht aan alternatieve beproevingsmethoden en/of waarnemingen in de praktijk. Erosie van de dijkteen zou bijvoorbeeld ook al waargenomen moeten zijn onder stormcondities van historische stormen. De vraag is dan wat daarvan geleerd kan worden en wat de toegevoegde waarde van de waarnemingen in de Deltagootproef is. Ditzelfde geldt in basis ook voor erosie van het kwelderoppervlak.
9. Bij een proef in de Deltagoot is de wind afwezig, waardoor de gemeten reductie groter zal zijn dan in werkelijkheid op zal treden. Aangegeven wordt dat de invloed van de wind via numerieke berekeningen kan worden toegevoegd aan de proefresultaten. Aanbevolen wordt de invloed van wind vroegtijdig te verkennen, omdat recente inzichten laten zien dat dit mogelijk van grote invloed kan zijn op de verwachte reductiepercentages en hiermee op de 'baten' van het onderzoek.
10. Wellicht kan de voorgestelde proefopstelling ook benut worden om op andere thema's aanvullende data te verwerven. Aanbevolen wordt om na te gaan of er meekoppelingen liggen met onderzoeksvragen op andere kennisvelden.

In onderstaande paragrafen zijn deze vragen en opmerkingen behandeld.



## A.1 Vraag 1

In hoofdstuk 5 van deze rapportage zijn voorbeeldberekeningen gegeven van de invloed van het hoge voorland enerzijds en de invloed van de vegetatie anderzijds. Afhankelijk van de wijze van rekenen is de invloed groot of klein. Dit geeft aan dat er een aanzienlijke onzekerheid is, maar ook al is de invloed beperkt tot bijvoorbeeld 10%, dan nog is het relevant om hiermee rekening te houden in het ontwerp en de beoordeling van dijken. Er is weliswaar een grote onzekerheid omtrent de invloed van de waterdiepte-golfhoogte verhouding in de huidige rekenmethodes, waardoor er een brede range is waarbinnen de werkelijke golfhoogte zou kunnen liggen. Maar het effect van de vegetatie zorgt ervoor dat zowel de bovengrens als ondergrens van deze range omlaag gaat. Zo kan dit effect los gezien worden van alle andere onzekerheden in de trein van de rekenmodellen die gebruikt worden voor het ontwerpen en de beoordeling van dijken.

## A.2 Vraag 2

In hoofdstuk 5 zijn berekeningen met Swan met vegetatiemodule gegeven, waarbij het verschil is getoond tussen het rekenen met en zonder wind. Dit laat inderdaad een groot verschil zien. Het doel is om het rekenmodel te ijken op de Deltagootproeven zonder wind. Vervolgens zal in een bureaustudie en met numerieke berekeningen worden onderzocht wat de invloed is van wind, omdat dit aspect niet onderzocht kan worden in de Deltagoot. In dat verband zal ook gekeken worden naar het verschil tussen de rekenwijze uit hoofdstuk 5 (in een geschematiseerde case met wind en zonder wind rekenen) en het berekenen van de potentiële golfgroei die überhaupt mogelijk is over een strijklengte gelijk aan de kwelderbreedte.

## A.3 Vraag 3

De golven in de Deltagoot worden weliswaar opgewekt in een deel van de goot dat een stuk dieper is dan boven de kwelder, maar dat is simpelweg omdat de golven van deze hoogte anders niet met een golfschot gegenereerd kunnen worden. Deze golven zijn veel lager dan de maximale golfhoogte die mogelijk is bij deze waterdiepte in de natuur. Dat betekent dat de golven zich maar een klein beetje hoeven aan te passen zodra ze op het ondiepe water van de onbegroeide vooroever komen. De ruim 40 m lange onbegroeide vooroever (een halve tot anderhalve golflengte, afhankelijk van de proef) met flauwe helling van 1:45 geeft in de meeste proeven een voldoende aanpassing van de golven aan de lokale waterdiepte. In de proeven waarbij dit wat aan de korte kant is, worden golven opgewekt die nauwelijks breken op deze vooroever.

Een veel langere onbegroeide vooroever is helaas niet haalbaar in de Deltagoot.

## A.4 Vraag 4

De golfhoogteverdeling wordt gemeten omdat dit bijdraagt aan het begrijpen van de eventuele invloed van de vegetatie op de golfoploop en de golfdruk op het talud.

## A.5 Vraag 5

Er zijn inderdaad vele onzekerheden in de rekenmethodes voor het ontwerpen en beoordelen van dijken. Door deze onzekerheden is er een bepaalde range van golfhoogtes mogelijk bij de teen van de dijk. Het huidige onderzoek zal het meenemen van de invloed van de vegetatie met voldoende vertrouwen mogelijk maken. Deze invloed zal zowel de bovengrens als de ondergrens van de range van golfhoogtes verlagen, en daardoor bijdrage aan het kosten-

effectief ontwerpen en beoordelen van waterkeringen. Dit staat los van de breedte van de range als gevolg van de huidige onzekerheden.

## A.6 Vraag 6

Zoals het er nu naar uitziet gaan we de resultaten van het onderzoek gebruiken voor het volgende:

- Het rekenmodel van Vuik voor het bepalen van de schade aan de vegetatie ijken. Deze lijkt geschikt te zijn voor 9 verschillende vegetatiesoorten.
- Aanbevelingen opstellen voor de input voor de vegetatiemodule van Swan waarmee met vertrouwen kan worden gerekend, rekening houdend met de geschatte schade aan de vegetatie (en eventueel suggesties geven voor het verbeteren van de vegetatiemodule)
- Aanbevelingen opstellen over de invloed van de vegetatie op de golfoploop en golfdruk. Het is daarbij denkbaar dat het al voldoende is om de invloed van de vegetatie op de golfcondities in de golfoploop- en golfdrukberendingen mee te nemen.
- Vaststellen of er significant erosie bij de teen van de dijk ontstaat en op basis hiervan aanbevelingen voor de praktijk geven.

## A.7 Vraag 7

De mogelijke impact van het verdisconteren van de vegetatie in het ontwerp van de dijk Koehool-Lauwersmeer is berekend in de "Samenvatting innovatievoorstel kweldervegetatie en voorlanden" van 10 maart 2023. Op basis van een verwachting van de invloed van de vegetatie is in die samenvatting het volgende geconcludeerd:

Voor alleen het project Koehool – Lauwersmeer lijkt een potentiële kostenbesparing van 5-10 miljoen euro binnen de mogelijkheden te liggen, wanneer de golfreducerende werking van vegetatie en de stabiliteit van het voorland in de dijkteen kan worden aangetoond met Deltagootproeven. De besparing is als volgt onderverdeeld:

- Potentiële besparing door 24 cm dunnere kleilaag in golfklapzone groene dijk = 6 miljoen euro;
- Potentiële besparing door 75% goedkeuring 3,8 km laaggelegen steenzettingen = 2,7 miljoen euro.

Daarnaast geldt dat bij dit soort dijken er een potentiële besparing is van 18 cm op de kruinhoogte, dat voor een dijk van 16 km een waarde vertegenwoordigt van 7,3 miljoen euro. Dat is nu nog niet meegeteld in de businesscase, maar in het licht van de zeespiegelstijging heeft dit in de toekomst wel een zekere waarde.

## A.8 Vraag 8

Er is geconstateerd dat er al veel kennis aanwezig is over schade aan de vegetatie en de invloed van vegetatie op de golfcondities. Deze kennis is vastgelegd in vele academische publicaties en rapporten. Het is echter nog onvoldoende overtuigend voor een waterschap om deze invloed mee te nemen bij het ontwerp of de beoordeling van een waterkering. De Deltagoot is bij uitstek geschikt om met voldoende overtuiging aan te tonen dat deze invloed daadwerkelijk meegenomen kan worden in de berekeningen. Door de hoge golven die in de Deltagoot kunnen worden opgewekt, in combinatie met de natuurgetrouwe vegetatie, kunnen de huidige rekenmethodes op ware grootte geïjkt worden bij golven zoals deze optreden langs de Nederlandse waterkeringen.

Dit doel kan niet bereikt worden met numerieke berekeningen, veldonderzoek of kleinschalig modelonderzoek.

Veldmetingen uit het verleden aan de erosie bij de teen ondervinden twee belangrijke beperkingen:

- de golfhoogtes waren vrij beperkt ( $H_{m0} < 1$  m)
- er is alleen gekeken naar de erosie na afloop van de storm, terwijl op het hoogtepunt van de storm de erosie het grootste is en daarna in de staart van de storm er weer sedimentatie plaatsvindt.

## A.9 Vraag 9

De invloed van de wind is met een aantal berekeningen met Swan met de vegetatiemodule verkend. Dit is te zien in hoofdstuk 5. Zie verder bij de beantwoording van vraag 2.

## A.10 Vraag 10

In het onderzoek wordt reeds een groot aantal onderwerpen meegenomen. Een korte verkenning heeft echter niet opgeleverd dat er andere onderwerpen in dit onderzoek meegenomen kunnen worden (zoals GEBU, GEKB en zettingsvloeiing van het voorland), zonder dat de kosten van het onderzoek substantieel hoger worden en/of de hoofddoelstelling in gevaar komt.

## B Golfdruk in de bodem

Bij lopende golven over een bodem van zand of silb/klei zal de variërende druk onder de golven voor een deel doordringen in de bodem. De grond van de bodem zal daarbij ook een beetje vervormen. Samen met de eventuele luchtbellens in de bodem geeft dit een faseverschil tussen de druk vlak boven de bodem en in de bodem. Dit geeft een verticaal verhang in de bodem.

Voor het berekenen van het verticale verhang zijn in deze bijlage formules gebruikt uit de volgende publicatie:

Verruijt, A.  
Offshore soil mechanics  
Delft University of Technology, 2006

De grootte van het verticale verhang kan berekend worden als de eigenschappen van de grond bekend zijn. Gezien het grote aantal eigenschappen dat in dergelijke formules zit, waarvan de grootte van vele helaas onbekend is, maakt dat het praktischer is om uit te gaan van een vereenvoudigde situatie.

Er wordt gerekend met de stijghoogte, die als volgt is gedefinieerd:

$$\phi = \frac{p}{\rho_w g} + z \quad (0.9)$$

Met:

- $\phi$  = stijghoogte (m)
- $p$  = druk (Pa)
- $\rho_w$  = dichtheid water (kg/m<sup>3</sup>)
- $g$  = versnelling van zwaartekracht (9,8 m/s<sup>2</sup>)
- $z$  = verticale coördinaat (positief naar boven, met  $z = 0$  op de bodem) (m)

Door uit te gaan van relatief lange golven wordt de formule als volgt:

$$\phi = \phi_a \frac{e^{\lambda z} + m\theta e^{\alpha z}}{1 + m\theta} \cos(\omega t - \lambda x) \quad (0.10)$$

Met:

- $\lambda$  = golfgetal (=  $2\pi/L$ ) (m<sup>-1</sup>)
- $\omega$  = frequentie van de golven (=  $2\pi/T$ ) (s<sup>-1</sup>)
- $m, \theta, \alpha$  = grondeigenschappen
- $\phi_a$  = amplitude van de stijghoogte op de bodem (m)

Deze formule geeft een goede benadering als:

$$\psi = \frac{L^2}{2\pi c_c T} > 1 \quad (0.11)$$

In de Deltagoot (en op kwelders tijdens extreme condities) gelden de volgende waarden:

- Golflengte:  $L = 20$  à  $50$  m
- Golfperiode:  $T = 4$  à  $6$  s
- Consolidatiecoëfficiënt:  $c_c = 0,01$  à  $0,1$  m<sup>2</sup>/s (zie Verruijt 2006)

De waarde van  $\psi$  wordt hierdoor  $100$  à  $10000$ . Omdat  $\psi > 1$ , voldoet bovenstaande benadering.

Om de gradiënt een te kunnen berekenen met bovenstaande formules, zijn de grondeigenschappen nodig. Omdat deze niet goed bekend zijn, wordt in eerste instantie gerekend met onsamendrukbaar water, hoewel dit strikt genomen niet correct is omdat er lucht in het water zit. Met onsamendrukbaar water geldt dat  $\theta = 0$  en wordt de formule:

$$\phi = \phi_a e^{\lambda z} \cos(\omega t - \lambda x) \quad (0.12)$$

Voor bijvoorbeeld  $t = 0$  en  $x = 0$  geeft dit de grootste gradiënt in de bodem:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \phi_a \lambda e^{\lambda z} \quad (0.13)$$

In de Deltagoot gelden de volgende waarden:

- Amplitude van de stijghoogte (vooral het golfdal is relevant):  $\phi_a \approx 1$  m
- Golfgetal  $\lambda = 2\pi/L = 0,1$  à  $0,3$  m<sup>-1</sup>.

De grootste gradiënt treedt op als  $z = 0$  (bodempoppervlak). Dit geeft als maximale gradiënt  $\partial\phi/\partial z = 0,1$  à  $0,3$ .

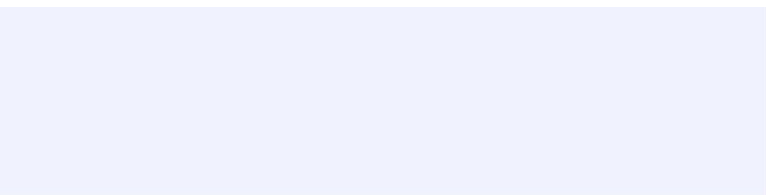
Fluidisatie kan optreden als de verticale gradient groter is dan ongeveer 1. Dat betekent dat de bovenstaand berekende gradiënt nog 3 à 10 maal groter moet worden voordat er een risico op fluidisatie van de bodem ontstaat. Als het water wel samendrukbaar is, zal er een groter verhang optreden, maar het is de vraag of dit dominant zal zijn over het bovenstaand gekwantificeerde effect met onsamendrukbaar water.

Vooraf boven het grondwaterpeil zou het water samendrukbaar kunnen zijn, want het grondwater bevat normaal gesproken geen lucht. De laag grond met samendrukbaar water is daardoor hooguit orde een halve meter dik. Hierin zou water met enkele procenten lucht kunnen zitten tijdens een extreem hoog water, dat samendrukbaar is.

In de Deltagoot is ook zo'n laag grond uit de kwelder aanwezig van orde 0,5 m dikte. De eventuele vergroting van het verticale verhang door het luchtgehalte in de bodem zal dus ook in de Deltagoot ontstaan. Dat betekent dat het model in de Deltagoot een reëel beeld van de werkelijkheid gaat geven.

Wel is het raadzaam om op orde een halve meter onder het kwelderoppervlak een ondoorlatende laag aan te brengen, zodat het luchtgehalte daaronder niet gaat bijdragen aan het verticale verhang. Eventueel kunnen er wat gaatjes in deze ondoorlatende laag gemaakt worden, zodat de klei wel kan draineren.

Voorgesteld wordt om bij het nader uitwerken van de modelopstelling van de Deltagoot een schatting te maken van de grondeigenschappen en met formule (1.10) de te verwachten gradiënten nog iets beter te schatten.



**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)