

Ontwerp groene golfremmende dijk Fort Steurgat bij Werkendam

Verkennde studie



Ontwerp groene golfremmende dijk Fort Steurgat bij Werkendam

Verkennde studie

Mindert de Vries (Deltares)
Frank Dekker (Deltares)

Opdrachtgever:

WINN, RWS, Ruimte voor de Rivier en Projectbureau
Ontpoldering Noordwaard

Ontwerp groene golfremmende dijk Fort Steurgat bij Werkendam

Verkennde studie

Mindert de Vries (Deltares)
Frank Dekker (Deltares)

Rapport

april 2009

Opdrachtgever	WINN en Projectbureau Ontpoldering Noordwaard							
Titel	Ontwerp groene golfremmende dijk Fort Steurgat Werkendam							
Samenvatting								
<p>In dit rapport worden de mogelijkheden verkend om te komen tot alternatieve ontwerpen van een waterkerende dijk, waarbij de inzet van vegetatie als onderdeel van de waterkering een rol speelt. Op basis van een verkennende modelanalyse van de golfremmende werking van een griend (wilgenbeplanting) is een geïntegreerd dijkontwerp vastgesteld, waarbij de vegetatie 80% van de golfremming veroorzaakt, zodat de achterliggende dijk met een aanzienlijk lagere kruinhoogte en dezelfde wettelijke veiligheid kan worden ontworpen. Combinatie van vegetatie en dijkontwerp levert daardoor een besparing op in de aanlegkosten, een verhoogde natuurwaarde door toevoeging van waardevolle habitats en een betere inpassing in het polderlandschap door de verminderde massieve uitstraling van de dijk. Met het laatste wordt tegemoet gekomen aan de wensen van bewoners van het Fort Steurgat.</p> <p>De concepten die worden uitgewerkt in dit rapport zijn in de afgelopen jaren ontwikkeld in het kader van Deltares Strategisch Onderzoek Biogeomorfologie, Delft Cluster, WINN en BWN/Ecoshape. Het toegepaste SWAN golfmodel werd in deze kaders uitgebreid met een 'vegetatiemodule'.</p>								
Referenties								
Ver	Auteur	Datum	Opmerk.	Review	Goedkeuring			
	Mindert de Vries Frank Dekker	27 maart 2009	Concept	Frans Klijn				
	Mindert de Vries Frank Dekker	<u>MDV</u> 24 April 2009	Definitief	Frans Klijn	<u>FK</u>	<u>S. Tiedman</u>	<u>S</u>	
Projectnummer	Z4832.00							
Trefwoorden	Noordwaard, dijkontwerp, golfuitdoving, vegetatie, SWAN							
Aantal bladzijden	47							
Classificatie	Geen							
Status	Definitief							

Inhoud

1	Inleiding.....	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Inzet biobouwers voor ‘groene’ dijk bij Fort Steurgat	2
1.3	Doelstelling verkennende studie.....	3
1.4	Betrokken expertgroep	4
1.5	Overzicht rapportage	4
2	Beschrijving locatie en huidig ontwerp.....	5
2.1	Inleiding.....	5
2.2	Ontpoldering en herinrichting Noordwaard.....	5
2.3	Fort Steurgat, huidige en toekomstige situatie.....	6
2.4	Ontwerp dijk rondom Fort Steurgat	7
2.4.1	Nieuwe dijkring	7
2.4.2	Toekomstige fysische randvoorwaarden	7
2.4.3	Profiel ontwerp	8
2.5	Conclusie	9
3	Conceptuele ontwerpen groene golfremmende dijk.....	10
3.1	Inleiding.....	10
3.2	Golfremmende begroeiing	10
3.2.1	Uitgangspunten voor remmende begroeiing.....	10
3.2.2	Keuze voor griend	10
3.3	Drie ruimtelijke schetsontwerpen.....	11
3.3.1	Griend voor de dijk	11
3.3.2	Griend langs de kreek	12
3.3.3	Golfremmende kaden.....	12
3.4	Voorkeursontwerp: griend voor de dijk met kreek.....	13
3.4.1	Globaal ontwerp	13
3.4.2	Nieuw dwarsprofiel.....	14
3.4.3	Hybride ontwerp Noordhoek	14
3.5	Conclusie	18
4	Golfremmende werking en effect op de dijkhoogte	19
4.1	Inleiding.....	19
4.2	Golfuitdoving door vegetatie: literatuuronderzoek.....	19
4.2.1	Mendez en Losada (2004)	19
4.2.2	Augustin et al. (2008)	20
4.2.3	Vo-Luong and Massel (2006).....	20
4.2.4	Conclusies.....	21

4.3	Golfuitdoving door vegetatie: modelonderzoek.....	21
4.3.1	Modelopzet.....	21
4.3.2	Resultaten	24
4.3.3	Discussie	24
4.3.4	Conclusies.....	28
4.4	Golfuitdoving door kades	28
4.5	Effect van golfuitdoving op de dijkhoogte.....	29
4.6	Verificatie voorkeursontwerp	30
4.7	Conclusie	31
5	Analyse van ontwerpen	32
5.1	Inleiding.....	32
5.2	Natuur	32
5.2.1	Klassiek ontwerp	32
5.2.2	Voorkeursontwerp	32
5.3	Landschap	33
5.3.1	Klassiek ontwerp	33
5.3.2	Voorkeurs ontwerp	33
5.4	Beheer	34
5.4.1	Klassiek ontwerp	34
5.4.2	Voorkeursontwerp	34
5.5	Veiligheid	35
5.5.1	Klassiek ontwerp	35
5.5.2	Voorkeursontwerp	35
5.6	Conclusie: vergelijking voorkeursontwerp met klassiek ontwerp	35
6	Conclusies en aanbevelingen	37
6.1	Doelstelling / Aanleiding	37
6.2	Conclusies	37
6.3	Aanbevelingen	37
7	Referenties	39
8	Bijlagen.....	40
	Beplantingsmogelijkheden griend Noordwaard	40
	Tentatieve kostenschatting aanleg en onderhoud griend, Van Schaik BV (prijspeil 2008)	41
	Implementation of wave dissipation in SWAN	42

1 Inleiding

Een bijzondere dag in november

Henk Schenk (operationeel manager Programmabureau Noordwaard) kwam begin november 2008 voor overleg langs bij Deltares en ontmoette daar in de lift een oude bekende uit zijn RWS-DWW periode. Het nieuwe instituut Deltares zou hem kunnen helpen om te innoveren in het Ruimte voor de Rivieren Noordwaard project was de boodschap. Deze ontmoeting werd enkele dagen later voortgezet in een busje tijdens een zeer geïnspireerde 'fact finding mission' in het Noordwaard gebied samen met een delegatie van experts uit de Waterdienst, Dienst Infrastructuur en Deltarianen, gefaciliteerd door het WINN programma.

Sinds die dag is letterlijk onze blik op de Noordwaard verandert. Door biologen en civielers samen te laten kijken komen werkelijk andere oplossingen in beeld. Dit rapport is daarvan een weerslag.

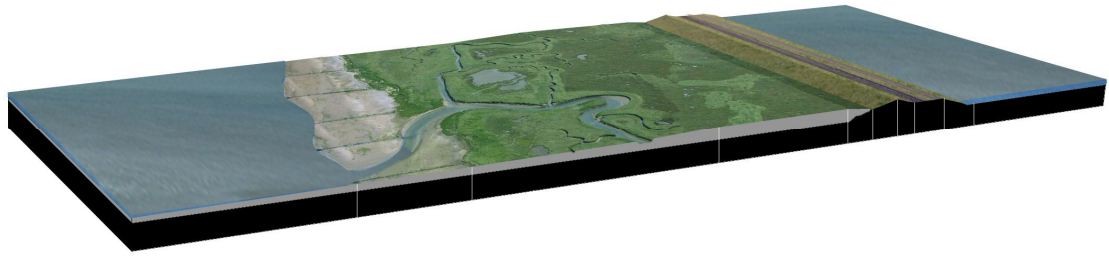
1.1 Achtergrond

In het Nederlandse beleid van kustbescherming wordt waar mogelijk gekozen voor zachte oplossingen. Deze oplossingen blijken vaak goedkoper dan harde oplossingen en kunnen op termijn tegen relatief lage kosten weer worden aangepast aan nieuwe eisen. In het voorland van de zeekeringen in de Delta en in het Waddengebied treft men vaak een zone aan met vegetatie die bodem stabiliseert, stroming afremt en golven uitdooft. Het gevolg hiervan is dat op veel locaties grassdijken niet hoeven te worden vervangen door harde dijkbekleding. Dit effect wordt veroorzaakt door de interactie van schorvegetatie, golven, stroming en sedimenttransport. De studie naar de onderliggende processen wordt biogeomorfologie genoemd, de soorten die dit soort effecten kunnen veroorzaken noemen we ecosysteem-ingenieurs of ook wel biobouwers.

Naar aanleiding van orkaan Katrina heeft een consortium van Nederlandse bedrijven (georganiseerd via NCK, Partners voor Water) onder leiding van WL | Delft Hydraulics gewerkt aan oplossingen om de veiligheid tegen overstroming van New Orléans te vergroten. Hierbij kreeg de insteek om natuurherstel te combineren met verhoogde veiligheidsniveaus een centrale plaats. Ingezet werd op herstel van moerasvegetatie in het voorland van waterkeringen om zoveel als mogelijk golfremmend te werken tijdens superstorm-omstandigheden. Op dit moment worden samen met de staat Louisiana en US Army Corps of Engineers pilots gestart.

Deze concepten werden in 2008 ook toegepast bij een ontwerp van een niet verder verhoogde maar wel verbrede, voornamelijk zachte, Afsluitdijk. De nieuwe brede zachte superdijk wordt ingepakt in zand en vegetatie die golfremmend werkt en die als vanzelf meegroeit met zeespiegelrijzing door invangen van sediment.

Onderbouwing van deze ontwerpen wordt al enige jaren intensief ondersteund door veldonderzoek, experimentele bij Deltares (voorheen WL | Delft Hydraulics) en modelontwikkeling.



Figuur 1-1 Voorbeeld van biobouwertoeepassing: Waddenwerkenproject resulteert in een breed, zacht en kosteneffectief ontwerp van een veilige Afsluitdijk (artist impression: 'Waddenwerken', DHV-Imares-Alle Hesper- de Vries – De Ronde).

Zoals hierboven beschreven is in de afgelopen jaren door Deltares en partners in verschillende projecten (samen met het innovatie programma WINN van Rijkswaterstaat) gewerkt aan het concept om met inzet van biobouwers zeeweringen klimaatbestendig te maken en tegelijkertijd natuurwaarde te vergroten. Deze concepten zijn wellicht ook bruikbaar langs zoete wateren. In dit project 'Ontwerp van een groene golfremmende dijk' wordt een globaal ontwerp van een groene golfremmende en doorbraakvrije dijk voor een zoet watergebied voorgesteld.

1.2 Inzet biobouwers voor 'groene' dijk bij Fort Steurgat

In het programma Ruimte voor de Rivieren wordt ontpoldering en herinrichting van de Noordwaard voorbereid om bij hoge rivierafvoer voldoende waterstands-verlaging op de Boven-Merwede te realiseren. In Figuur 1.2 is een bovenaanzicht van de Noordwaard gegeven.

In het herinrichtingsplan voor de Noordwaard is voorzien in een nieuwe waterkering rond het Fort Steurgat bij Werkendam. Deze waterkering moet voldoende stabiel zijn om de 1:2000 per jaar maatgevende condities te weerstaan met zodanig geringe golfoverslag dat dijkkring 23 voldoende droog blijft. Deze randvoorwaarden maken een dijk met een kruinhoogte van 5,0 – 5,5 m +NAP nodig, indien uitgegaan wordt van een standaardontwerp. In overleg met Projectbureau Ontpoldering Noordwaard en WINN is vastgesteld dat nader moet worden gestudeerd op een mogelijk kansrijk ontwerp van de kering met een lagere kruinhoogte, door inzet van innovatieve concepten en technieken.

In opdracht van Projectbureau Ontpoldering Noordwaard en WINN is een studie uitgevoerd waarin de mogelijkheden worden verkend om met biobouwers (inzet van biota) het dijkontwerp zo aan te passen dat met een lagere dijk kan worden volstaan, binnen de randvoorwaarden van landschappelijke en maatschappelijke inpasbaarheid, betrouwbaarheid en constructieve haalbaarheid. Het streven is om door de inzet van biobouwers de dijkhoogte te verlagen van 5.0 tot 5,5 m +NAP naar 4,5 m +NAP. Uitgangspunt hierbij is dat de wettelijke (binnendijkse) veiligheid wordt gegarandeerd.

Het product van deze verkennende studie is een globale visualisatie van een groene doorbraakvrije dijk voor Fort Steurgat, en een bondige rapportage. Dit product berust op basis van een aantal discussie- en werkbijeenkomsten met een klein team van experts.



Figuur 1-2 bovenaanzicht van de Noordwaard (bron: Google Earth).

1.3 Doelstelling verkennende studie

Het hoofddoel van deze verkennende studie is:

- Het globaal aanpassen van het ontwerp van een dijkprofiel rondom Fort Steurgat bij Werkendam, dat door de inzet van biobouwers:
 - natuurwaarde creëert;
 - onderhoudsarm is;
 - landschappelijk een meerwaarde heeft;
 - voor de cultuurhistorische context verantwoord is;
 - een lagere kruinhoogte mogelijk maakt (doel is 4.5 m +NAP) in vergelijking met een klassiek ontwerp, waarmee tegemoet gekomen wordt aan wensen van bewoners van het Fort Steurgat.

Uitgangspunt is dat de dijk voldoet aan de waterbouwkundige randvoorwaarden:

- Wettelijke veiligheidsnorm met overschrijdingskans 1:2000
- Maximaal overslag debiet van 1 l/m/s

Naast dit specifieke hoofddoel is het volgende meer algemene subdoel geformuleerd:

- Aantonen dat biobouwers in staat zijn om golfkrachten te reduceren, zodat lagere kruinhoogtes kunnen worden gerealiseerd.

1.4 Betrokken expertgroep

In het team van experts nemen de volgende personen deel:

- Bas de Bruijn (Programmadirectie Ruimte voor de Rivieren, afdeling kennis)
- Frank Dekker (Deltares, waterbouwkundige en expert meten en modelleren golfuitdoving door vegetatie)
- Erik Jan Houwing (Technisch manager projectbureau Ontpoldering Noordwaard).
- Helena Hulsman (Deltares, junioradviseur, milieukundige)
- Mieke Ketelaars (Deltares, WINN-coördinator en materiaaldeskundige)
- Robbert de Koning (adviseur technisch management / landschapsarchitect projectbureau Ontpoldering Noordwaard)
- Frans Klijn (Deltares, specialist landschapsecoloog riviersystemen, lid Q-team Ruimte voor Rivieren)
- Johan van der Meulen (Waterschap Rivierenland)
- Ireen Røling (RWS Waterdienst, WINN, opdrachtgever)
- Tomohiro Suzuki (TU Delft, modelleur golfwerking)
- Theo Vulink (RWS Waterdienst, senior ecooloog en expert in ontwikkeling en beheer zoetwatermoerassen)
- Mindert de Vries (Deltares, Projectleider, senior ecooloog kustsystemen en initiator biobouwers-biogeomorfologie onderzoek)
- Erik Bijlsma (adviseur technisch management / dijkexpert projectbureau Ontpoldering Noordwaard)
- Jolande van der Meulen (manager projectbureau Ontpoldering Noordwaard, opdrachtgever)

Alle visualisaties in deze rapportage zijn verzorgd door Robbert de Koning. De golfberekeningen die in dit rapport gepresenteerd zijn, zijn uitgevoerd door Tomohiro Suzuki. De dijkhoogte berekeningen zijn uitgevoerd door Erik Bijlsma.

1.5 Overzicht rapportage

Hoofdstuk 2 beschrijft in het kort het plan voor de ontpoldering en herinrichting van de Noordwaard, de consequenties van het plan voor de dijk rondom Fort Steurgat bij Werkendam en het ontwerp (volgens klassieke rekenregels) van de nieuwe dijk.

In hoofdstuk 3 worden de drie verschillende ontwerpen voor een groene golfremmende dijk geïntroduceerd, die zijn ontwikkeld tijdens een workshop met de expertgroep. Op basis van deze drie verschillende ontwerpen wordt het voorkeursontwerp samengesteld.

In hoofdstuk 4 worden de golfuitdovende principes die gebruikt zijn in de ontwerpen van hoofdstuk 3 (vegetatie en kades) geanalyseerd. Er wordt aangetoond dat vegetatie de golfaanval op een dijk zodanig kunnen reduceren dat met een lagere dijkhoogte kan worden volstaan.

In hoofdstuk 5 wordt het voorkeursontwerp verder beschreven en vergeleken met het klassieke ontwerp van hoofdstuk 2.

In hoofdstuk 6 worden de belangrijkste conclusies van deze verkennende studie samengevat, en worden aanbevelingen gedaan voor vervolgstappen.

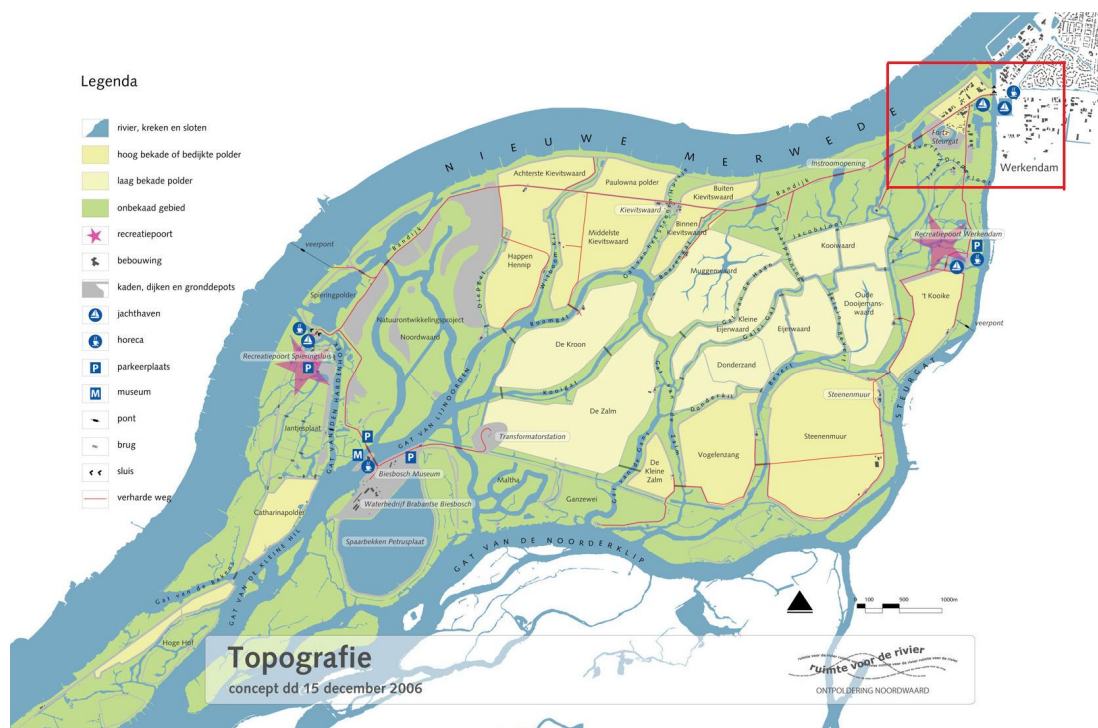
2 Beschrijving locatie en huidig ontwerp

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt in het kort het inrichtingsplan beschreven voor de ontpoldering en herinrichting van de Noordwaard, de consequenties van het plan voor de dijk rondom Fort Steurgat bij Werkendam en het ontwerp (volgens klassieke rekenregels) van de nieuwe dijk. Dit ontwerp vormt de aanleiding en het uitgangspunt om een nieuw dijkontwerp te maken waarin golfremmende vegetatie wordt toegepast om de hoogte van de dijk te verlagen.

2.2 Ontpoldering en herinrichting Noordwaard

In Figuur 2.1 is de ontwerpvisie voor de ontpoldering van de Noordwaard gegeven. De ontpoldering van de Noordwaard behelst in hoofdzaak het verlagen van de huidige kering aan de noordoost zijde (instroomopening) en zuidwest zijde (uitstroomopening). De verlaging vindt plaats over zeer grote lengte (± 2 km instroomopening en ± 3 km uitstroomopening). Als het water in de Nieuwe Merwede hoog staat (hoger dan 2.0m +NAP) kan het water door de Noordwaard stromen en wordt een verlaging van de rivierwaterstand bereikt (0.6 m lokaal en 0.3 m bij Gorinchem). De verlaagde primaire dijk wordt de 'drempel' genoemd.



Figuur 2-1 de topografie van de Noordwaard met de contouren van het ontpolderingsplan. In rood de uitsnede bij Fort Steurgat.

In de Noordwaard worden veel hoge en lage kaden aangelegd om landbouw mogelijk te maken. Ook wordt er een patroon van kreken aangelegd om natuur te creëren en

recreatiemogelijkheden te vergroten. De historische topografische kaart van omstreeks 1900 heeft hiervoor als inspiratiebron gediend. Ondanks dat de maatregel nieuw is komen er weer veel oude karakteristieken van de Noordwaard terug. Het systeem van vaarpolders (landbouwpolders ontsloten met watergangen in plaats van met wegen) wordt bijvoorbeeld weer zichtbaar. Om de bereikbaarheid optimaal te houden worden er bruggen aangelegd. In de Bandijk (de huidige doorgaande weg ten noorden van het Fort) is gepland om vier grote bruggen aan te leggen om de doorstroom van water mogelijk te maken zonder dat concessies aan de ontsluiting hoeven te worden gedaan.

In Figuur 2.2 is ingezoomd op het gebied rondom Fort Steurgat. Na verlaging van de dijk langs de Nieuwe Merwede tot een niveau van 2,0m +NAP overstroomt het buitengebied langs Fort Steurgat meerdere keren per jaar. Vanuit de geulen in het zuidwesten komt dagelijks de getijdenbeweging het gebied binnen. Het gemiddelde laagwaterpeil is 0,4m +NAP, het gemiddelde hoogwaterpeil is 0,7m +NAP. Dit is ook de gemiddelde bodemhoogte in het doorstroomgebied langs de primaire waterkering rond het fort. Grote delen van het maaiveld in het doorstroomgebied komen dus dagelijks onder water te staan.



Figuur 2-2 uitsnede Fort Steurgat met toponiemen

2.3 Fort Steurgat, huidige en toekomstige situatie

Fort Steurgat (zie Figuur 2.3) was het zuidelijke sluitstuk van de 19^{de} eeuwse Nieuwe Hollandse Waterlinie. Het ligt nabij de instroomopening en aan de rand van het doorstroomgebied. Voor de Nieuwe Hollandse Waterlinie is een zorgvuldige inpassing belangrijk. Het fort Steurgat is benoemd als element met grote historisch stedenbouwkundige waarde. Het fort wordt sinds circa 10 jaar permanent bewoond. Er zijn onder andere woningen in de wal gerealiseerd waardoor het fort niet meer waterdicht is.

Omdat de waterstand in het doorstroomgebied net zo hoog zal zijn als die op de rivier zullen er maatregelen moeten worden genomen om het fort te beschermen tegen hoogwater. Om de woningen op het fort te kunnen handhaven is een dijk tussen fort en doorstroomgebied onvermijdelijk.



Figuur 2-3 Fort Steurgat gezien richting het oosten. Foto E. Notenboom

Voorgesteld is om de dijk om het fort een afwijkende vorm te geven. De binnendijkse zijde van de dijk krijgt een zeer flauw oplopend talud. De dijk zal voor een kijker daardoor niet als een steile wand ogen, maar veel meer als een 'opgetild maaiveld'. Aan de buitendijkse zijde zal er wel regulier steil talud worden aangelegd, voorzien van een berm.

2.4 Ontwerp dijk rondom Fort Steurgat

2.4.1 Nieuwe dijkkring

Door een nieuwe dijk aan te leggen tussen de huidige primaire keringen langs de Nieuwe Merwede en het Steurgat wordt de bestaande dijkkring 23 (Biesbosch) gereduceerd tot een kleine dijkkring. Deze houdt dezelfde veiligheidsnorm als de huidige dijkkring (overschrijdingskans van 1/2000 jaar). Binnen deze toekomstige dijkkring bevindt zich een bestaande woonwijk (circa 2.8 ha groot). De wijk bestaat uit betrekkelijk eenvoudige laagbouw met tuinen. Tussen de Merwededijk en de Bandijk bevindt zich een bedrijventerrein van ongeveer 10 ha. Tenslotte is er een driehoekige zone met bebouwing waar de Steurgatdijk aansluit op de Bandijk. Hier bevinden zich bedrijven en woningen. In Figuur 2.4 is een afbeelding van de nieuwe dijkkring gegeven.

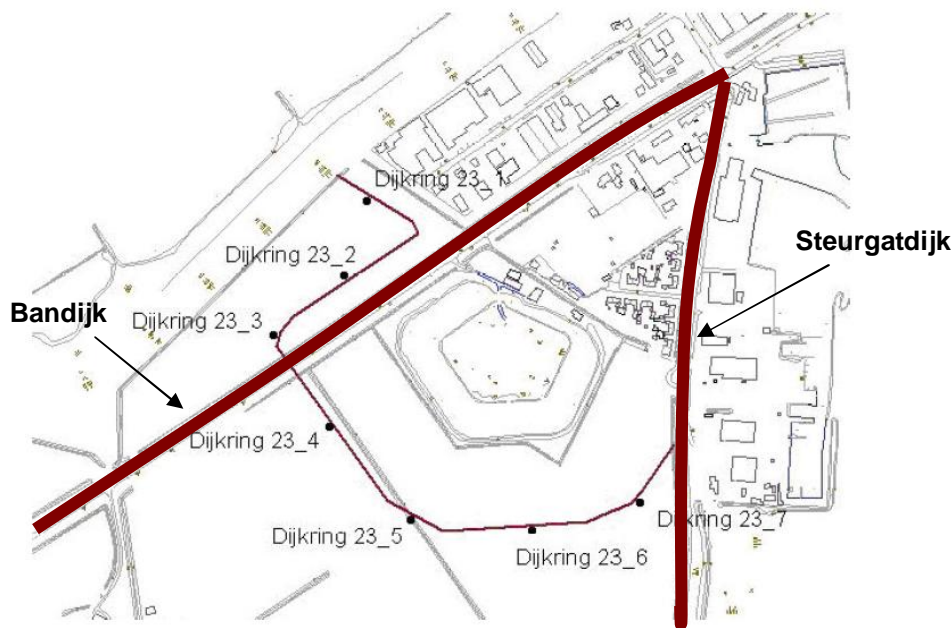
2.4.2 Toekomstige fysische randvoorwaarden

In de rapportage van Bureau Noordwaard (2008) zijn dijkhoogten berekend op basis van in de toekomst verwachte waterstanden en golfhoogtes (H_s). De resultaten staan vermeld in Tabel 2.1. De genoemde hydraulische belastingen zijn die voor de

normfrequentie (1/2000^e). De locaties van de rekenpunten zijn weergegeven in Figuur 2.4.

Tabel 2-1 Maatgevende kentallen voor dijkkring 23

Rekenpunt	Richting dijknormaal t.o.v. Noord	Windrichting	Toetspeilen (1/2000e) in rekenpunten rond de kering (m+NAP)	H _s (m) (2050)	T _p (s) (2050)	Hydraulische belastingniveaus (m+NAP) = kruinhoogten	
						2050	2100
1	225	WNW	3,2	1,3	4,8	5,0	5,2
2	315	W	3,4	1,1	4,4	4,9	5,2
3	270	WNW	3,0	1,3	4,9	5,2	5,2
4	240	WNW	3,1 ⁵	1,2	4,8	4,7	4,7
5	225	WNW	3,1 ⁶	1,2	4,6	4,5	4,6
6	180	W	3,4	1,0	3,9	4,1	4,4
7	135	WZW	3,4	0,9	3,9	3,5	4,4 ⁷



Figuur 2-4 Nieuwe dijkkring 23 inclusief rekenpunten

2.4.3 Profiel ontwerp

Op basis van de hydraulische randvoorwaarden is een profiel ontworpen voor de waterkering rondom Fort Steurgat. In Tabel 2.2 is het profiel beschreven. Het profiel ten noorden van de Bandijk (rekenpunten 1, 2 en 3) heeft een kruinhoogte van 5,5m +NAP. De rest van de dijk heeft een kruinhoogte van 5,0m +NAP. Naast de fysieke randvoorwaarden zoals genoemd in Tabel 2.1 is het ontwerp gebaseerd op een maximaal overslag debiet van 1 l/m/s.

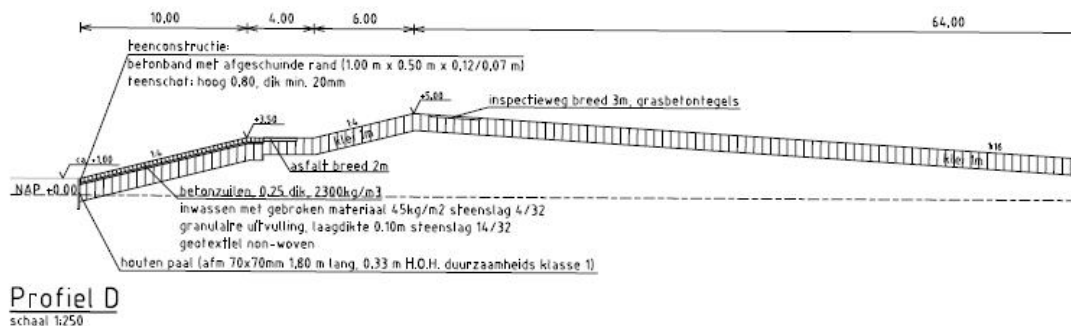
Tabel 2-2 Dijkprofiel

Hoogte [m+NAP]	Dijkonderdeel	Bekleding
<i>Ten Noorden van Bandijk</i>		
maaiveld tot 3,5	buitentalud 1:4	harde bekleding
3,5	berm, 4 m breed	deels asfaltweg
3,5 tot 5,5	buitentalud 1:4	grasbekleding
5,5	Bovenkant, 4.5 m breed	deels asfaltweg
5,5 tot maaiveld	binnentalud 1:4	grasbekleding
<i>Ten zuiden van Bandijk</i>		
maaiveld tot 3,5	buitentalud 1:4	harde bekleding
3,5	berm, 4 m breed	deels asfaltweg
3,5 tot 5	buitentalud 1:4	grasbekleding
5 tot maaiveld	binnentalud 1:16	grasbekleding met asfaltweg van 3m breed

Overige relevante gegevens van dit profielontwerp zijn:

- De dijk is opgebouwd uit een zandkern met daarop een laag klei. De kleilaagdikte bedraagt 1m. De gebruikte klei is zeer erosiebestendig.
- De harde bekleding kan bestaan uit een steenbekleding.
- De geschatte kosten voor dit profiel bedragen 2,5 Miljoen Euro.

In Figuur 2.5 is een karakteristieke doorsnede van de nieuwe dijk rondom Fort Steurgat ten zuiden van de Bandijk weergegeven.



Figuur 2-5 Karakteristiek dwarsprofiel van de nieuwe dijk rondom Fort Steurgat, ten zuiden van de Bandijk.

2.5 Conclusie

Door ontpoldering en herinrichting van de Noordwaard veranderen de hydraulische omstandigheden rondom Fort Steurgat. Dit betekent dat er een nieuwe dijk rondom Fort Steurgat ontworpen moet worden om voldoende bescherming tegen hoogwater te bieden. Het nieuwe ontwerp is gepresenteerd in dit hoofdstuk (zie Figuur 2.5 en Tabel 2.2). Dit ontwerp is gebaseerd op klassieke rekenregels en wordt daarom verder aangeduid als 'klassiek ontwerp'.

3 Conceptuele ontwerpen groene golfremmende dijk

3.1 Inleiding

Tijdens een bijeenkomst met experts zijn een aantal mogelijke ideeën geschetst voor een groene golfremmende dijk ter bescherming van Fort Steurgat bij Werkendam. Uit deze ideeën is een drietal ruimtelijke concepten voor een golfremmende constructie geformuleerd en vertaald in een ruimtelijk schetsontwerp.

Op hoofdlijnen bestaan de drie ontwerpen uit:

- 1) 'platform' met golfremmende begroeiing aanliggend aan de dijk
- 2) begroeide platformen in gebied langs de toekomstige kreek
- 3) golfremmende kaden in buitengebied

De doelstelling van deze ontwerpen is om door de golfremmende werking de primaire kering met ongeveer 0,5 tot 1 meter te verlagen (ten opzichte van het 'klassieke ontwerp'). Dit houdt tevens een versmalling in van de dijk van ± 15 tot 20 meter.

In dit hoofdstuk worden de schetsontwerpen toegelicht. Op basis van de schetsontwerpen is een voorkeursontwerp samengesteld. In het volgende hoofdstuk wordt nader ingegaan op de golfremmende werking.

3.2 Golfremmende begroeiing

3.2.1 Uitgangspunten voor remmende begroeiing

De ruimtelijke concepten zijn geïnspireerd op aanwezige landschappelijke elementen in de Noordwaard, namelijk de primaire dijk, de kreken en de kaden. In twee van de drie schetsontwerpen is beplanting gebruikt. Verschillende soorten beplanting zijn in beschouwing genomen om voor golfremming in aanmerking te komen.

Randvoorwaarden zijn:

- De beplanting moet in ieder geval houtig zijn (voor voldoende stijve takken).
- De beplanting moet tegen frequente of langdurige inundatie kunnen ($\pm 1-10$ keer per jaar, tot 50 dagen).
- De beplanting moet in kleigrond kunnen groeien.
- De beplanting moet minimaal 3 m hoog zijn, maar niet veel hoger dan 4 om het zicht vanaf de dijk rond het fort niet te belemmeren.
- De beplanting moet er staan indien er hoog water komt.
- Beheer en onderhoud van de beplanting moet minimaal zijn.

3.2.2 Keuze voor griend

Beplanting die nu al in een uiterwaard voorkomt, komt in principe in aanmerking.

Uiteindelijk is gekozen voor griend. Een griend van wilgen voldoet aan de bovenstaande randvoorwaarden en andere pluspunten zijn:

- dat de griendcultuur van oorsprong in de Noordwaard thuis hoort;
- dat er een vrij brede zone beplant moet worden en dat griendcultuur hiervoor geschikt is;
- dat beheer en onderhoud machinaal en dus snel en goedkoop plaats kan vinden;

- dat de kwaliteit en kwantiteit van de griend goed gemonitord kan worden;
- dat het een mooi, een rustig landschapsbeeld kan opleveren.

Meer informatie over griend als golfremmende begroeiing is te vinden in Bijlage A.

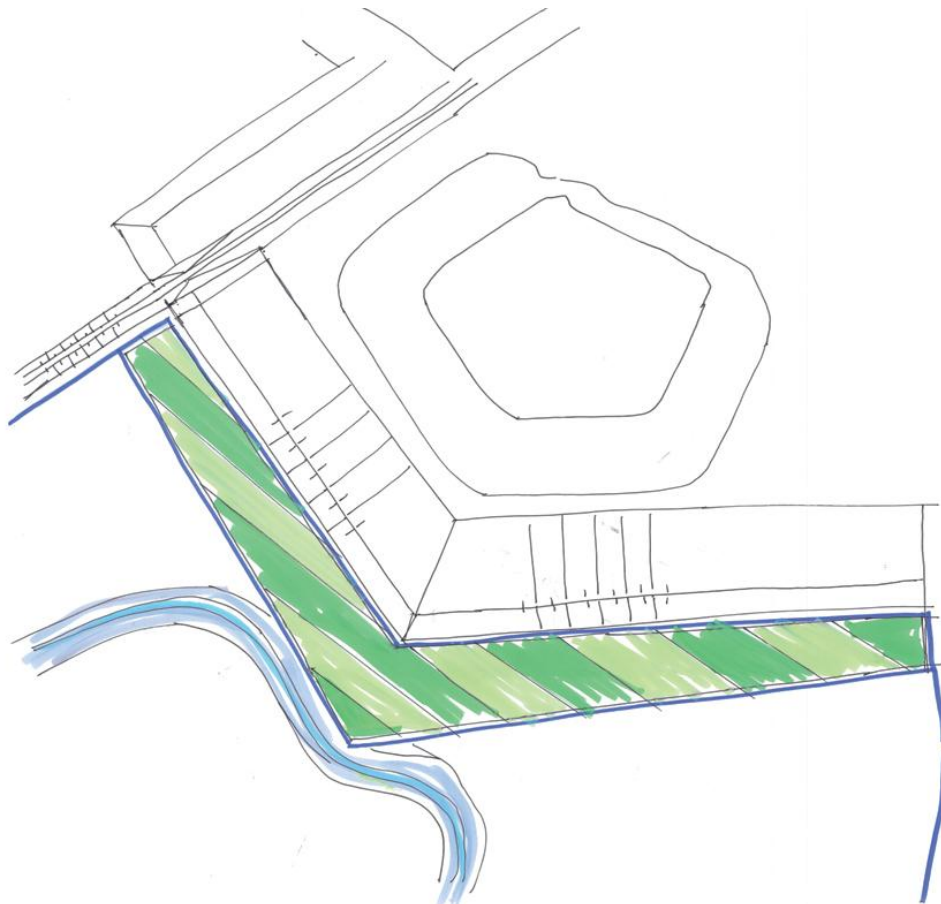
3.3 Drie ruimtelijke schetsontwerpen

Tijdens een workshop met het projectteam werden drie hoofdlijnen voor mogelijke ontwerpen geïdentificeerd.

3.3.1 Griend voor de dijk

In dit schetsontwerp (zie Figuur 3.1) wordt de golfremmende constructie gezien als onderdeel van de primaire dijk. Voor de gehele dijk (buitenzijde) wordt een verhoogde berm aangelegd die vervolgens beplant wordt. Om de berm te kunnen beplanten is de hoogte van de berm een kleine meter boven lokaal maaiveld (1,5m +NAP). Voor de beplanting wordt wilgengriend (*Salix alba*, *Salix viminalis*) gekozen. De breedte van de berm is afhankelijk van de golfhoogte: hoe hoger de golf hoe breder de griend om de noodzakelijke reductie van golfhoogte te realiseren.

De kreek Bevertstaart wordt in dit schetsontwerp enkele tientallen meters verlegd in westelijke richting om voldoende breedte voor de berm te krijgen.

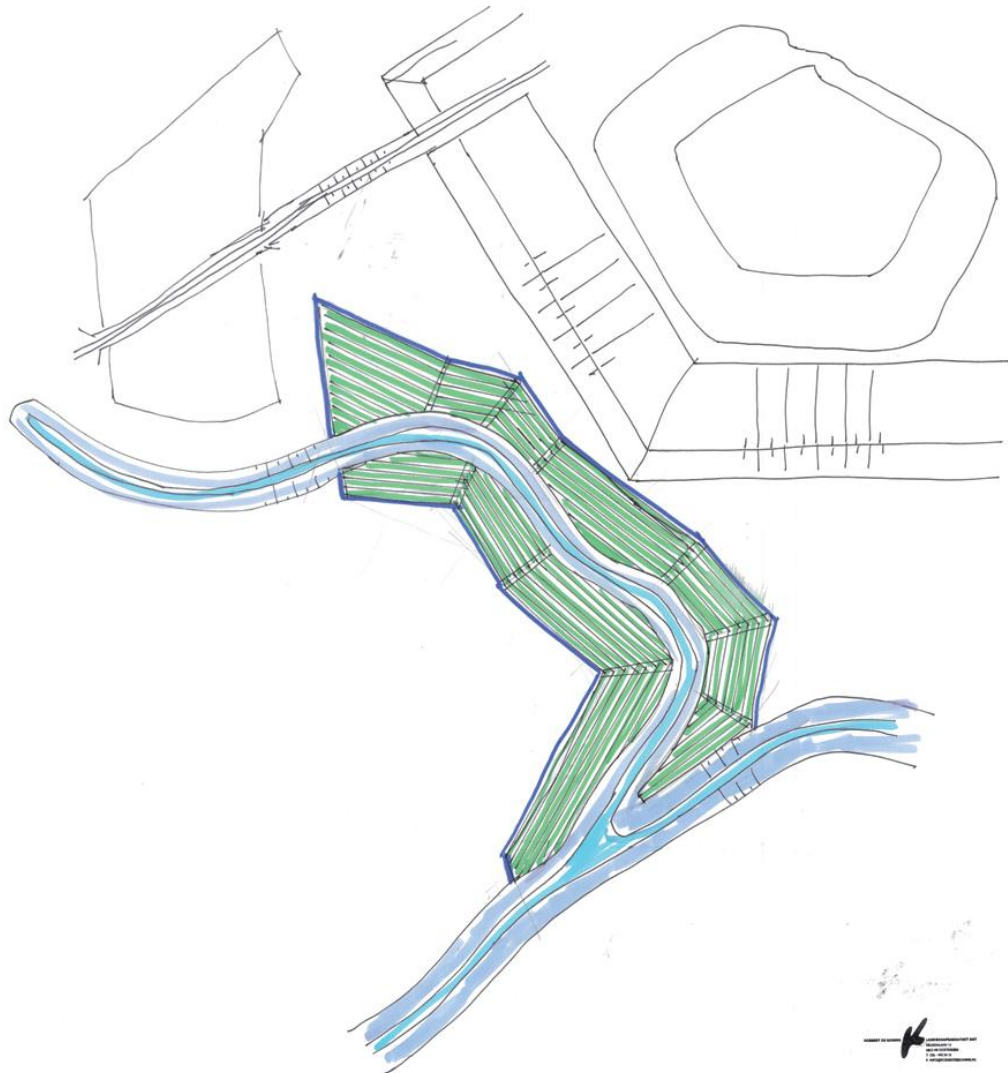


Figuur 3-1 Schetsontwerp 'Griend voor de dijk'

3.3.2 Griend langs de kreek

De kreek Bevertstaart krult zich in de richting van de waterkering. In dit schetsontwerp (zie Figuur 3.2) wordt er een breed griend langs de kreek aangelegd om golven te dempen richting de primaire dijk. Ook hier wordt de griend op een iets verhoogde berm gelegd en hij zal dezelfde breedte hebben. De griend blijft net buiten de stroomlijnen van het water dat bij hoogwater onder de brug in de Bandijk vandaan komt.

De nieuwe griend zal niet meteen herkend worden als een golfdemper, maar gaat een ruimtelijke relatie aan met de bospartijen in de recreatiepoort Werkendam. In de recreatiepoort zou ook meer griend gemaakt kunnen worden waardoor er een sterkere ruimtelijke samenhang kan komen in deze hoek van de Noordwaard.



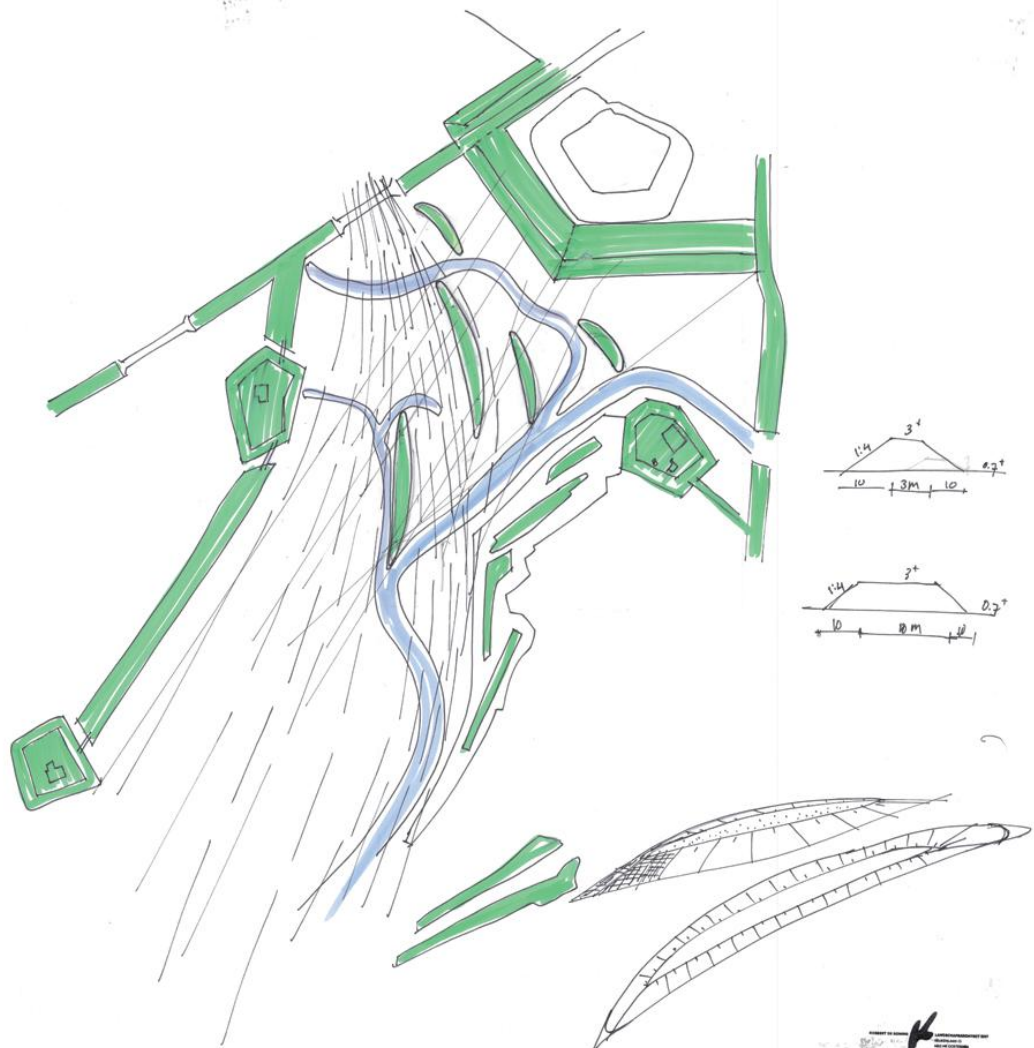
Figuur 3-2 Schetsontwerp 'Griend langs de kreek'

3.3.3 Golfremmende kaden

In de Noordwaard worden in het ontpolderingsplan op veel plekken nieuwe kaden aangelegd. Deze hebben de functies waterkering of verbindingroute, soms in

combinatie met hoogwatervluchtplaats voor vee. In dit schetsontwerp (zie Figuur 3.3) wordt een nieuw type kade geïntroduceerd, de golfremmende kade.

De positie van kaden voor golfdemping is lastig te bepalen. Het is niet wenselijk om de kade(n) te dicht op de dijk te leggen omdat die daardoor teveel gaat concurreren met de dijk zelf. Een kade verder weg zal de hoogwaterafvoer van het doorstroomgebied belemmeren. Dit kan geminimaliseerd worden door de kade zo gestroomlijnd mogelijk te maken ten opzichte van de stroombanen. De kaden moeten in elkaars golfschaduw liggen om voldoende golfdemping te krijgen. De kaden kunnen tevens als hoogwatervluchtplaats voor vee gebruikt worden.



Figuur 3-3 Schetsontwerp 'golfremmende kades'

3.4 Voorkeursontwerp: griend voor de dijk met kreek

3.4.1 Globaal ontwerp

Op bovenstaande schetsontwerpen zijn varianten mogelijk, bijvoorbeeld een combinatie van kaden met grienden langs een kreek. Maar een combinatie van een griend voor de dijk, die deels verweven is met de kreek Bevertstaart lijkt het beste en mooiste ruimtelijk

inpasbaar in de Noordwaard. Dit is weergegeven in Figuur 3.5, in combinatie met het hybride-ontwerp voor de noordhoek (zie paragraaf 3.4.3). In Figuur 3.6 is een dwarsprofiel weergegeven.

Drie belangrijke argumenten liggen ten grondslag aan dit voorkeursontwerp:

- Stroomtechnisch → griend tegen de dijk aan levert de minste obstructie voor de waterstroom langs de dijk. Het is de verwachting dat bij de zuidwestelijke punt het griendbos onvoldoende golfuitdoving oplevert, waardoor een uitbreiding van griend aan de overzijde van de kreek Bevertstaart noodzakelijk is. De griend aan de overzijde van de kreek kan echter zo worden geplaatst dat deze weinig tot geen obstructie geeft voor de doorstroom.
- Beheersmatig → wanneer de griend aan de dijk ligt is deze makkelijk bereikbaar voor onderhoud.
- Landschappelijk → dit ontwerp sluit het beste aan bij de al aanwezige landschapselementen in de Noordwaard.

Vormgeving griend

De griend wordt in banen aangelegd die loodrecht op de golfrichting (zuidwesten) staan. De banen bestaan uit twee soorten griend (*S. alba* en *S. viminalis*) om de kans op sterfte door ziekte van de gehele griend te minimaliseren. De banen worden om het jaar in maart gemaaid (einde hoogwaterseizoen, begin groeiseizoen) zodat er altijd in oktober (begin hoogwaterseizoen, eind groeiseizoen) een deel 1 jarig en een deel 2 jarig griend voor de dijk staat. In de griend worden verschillende maaipaden aangelegd die zichten markeren vanaf het hart van het fort naar markante objecten in de Noordwaard geven, zoals boerderijen. Deze zichtlijnen zijn de moderne 'kijkgaten' van het fort.

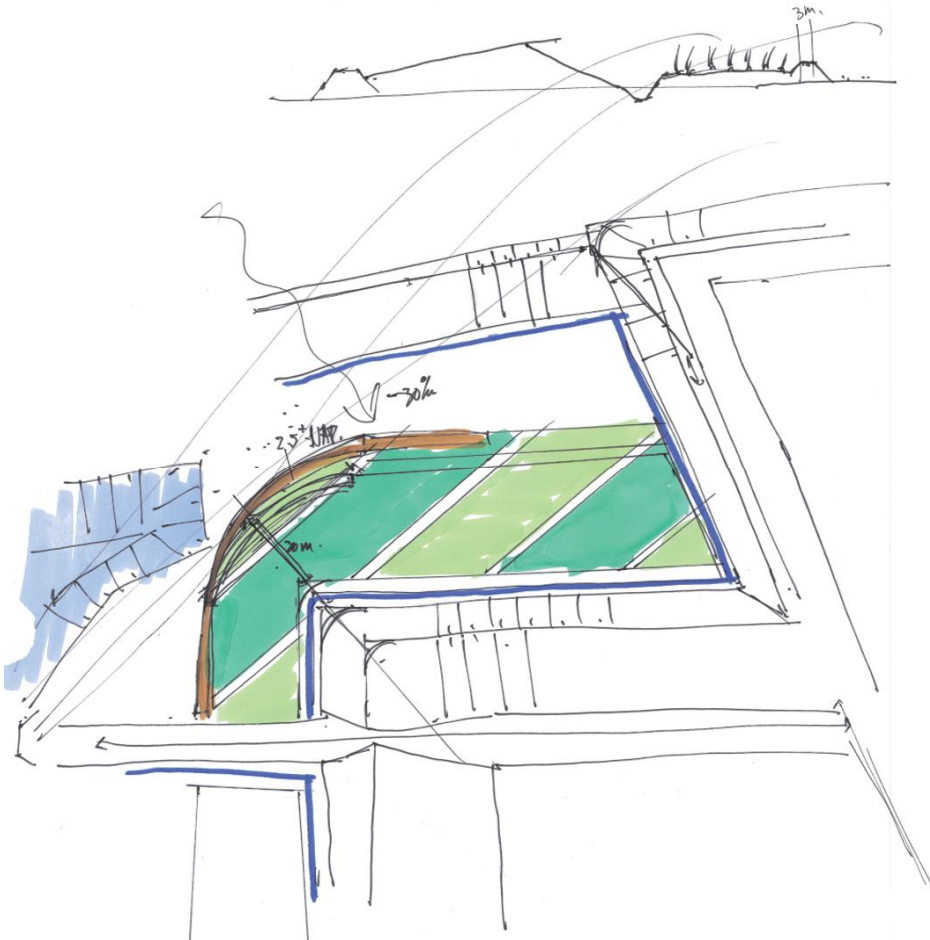
3.4.2 Nieuw dwarsprofiel

Het dwarsprofiel van de primaire dijk wordt aangepast om een mooie overgang van griend naar dijk te maken. Het nieuwe dwarsprofiel kan als volgt worden beschreven:

- Griend (60-80m breed) op een verhoogde berm voor het dijklichaam (1,50 m +NAP)
- een talud van 1:5 vanaf maaiveld tot 3,5 m +NAP, met een gras bekleding;
- een berm van 2 m;
- een talud van 1:3 tot de bovenkant van de dijk (hoogte afhankelijk van golfremming van vegetatie), met een grasbekleding;
- een binnentalud van 1:16 vanaf de bovenkant van de dijk tot aan maaiveld.

3.4.3 Hybride ontwerp Noordhoek

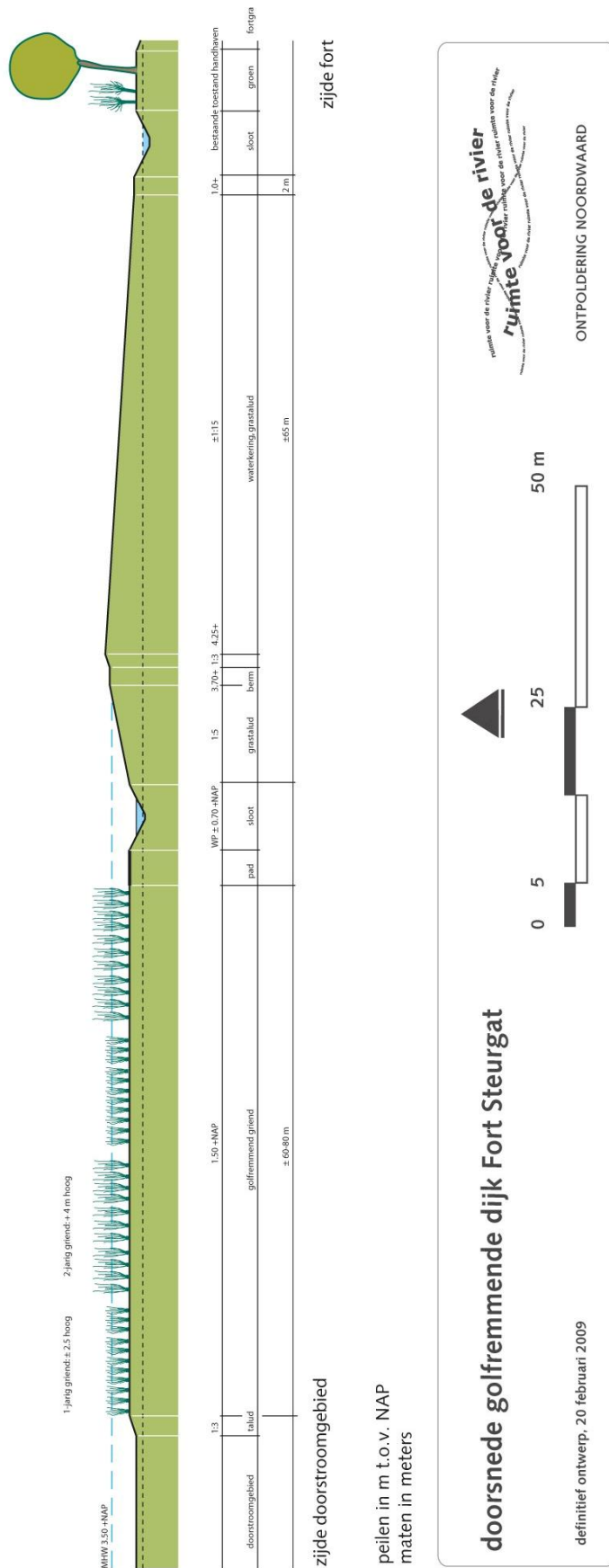
De zone ten noorden van de Bandijk neemt een bijzondere positie in. Ook hier kan golfaanval op de dijk plaatsvinden, maar dan uit noordwestelijke richting. Een griend gecombineerd met een kade is hier een mogelijke oplossing (zie Figuur 3.4). Deze sluit aan op de hoogte en lijnvoering van de griend ten zuiden van de Bandijk. De kade (hoogte 3.0m +NAP) is bekleed en ligt net buiten de stroomlijn van water dat vanaf de hoek van het bedrijventerrein naar de eerste brug stroomt. Zo vormt de griend met kade geen barrière voor de doorstroom.



Figuur 3-4 Schets hybride-ontwerp Noordhoek: griend in combinatie met kades



Figuur 3-5 Schets van voorkeursontwerp: griend langs de kreek en de dijk in combinatie met het hybride-ontwerp voor de noord hoek



Figuur 3-6 dwarsdoorsnede van het voorkeursontwerp van de golfremmende dijk

3.5 Conclusie

In dit hoofdstuk is de totstandkoming van het voorkeursontwerp beschreven. Het voorkeursontwerp bestaat uit griend langs de kreek en vóór de dijk in combinatie met een hybride-ontwerp voor de noordhoek (griend en golfremmende kades). Er is gekozen voor griend omdat griend het beste voldoet aan de gestelde randvoorwaarden. In Figuur 3.5 en Figuur 3.6 is dit ontwerp gevisualiseerd.

In Hoofdstuk 4 zal de golfremmende werking van dit ontwerp worden geanalyseerd.

4 Golfremmende werking en effect op de dijkhoogte

4.1 Inleiding

Om een golfremmende werking voor de dijk te verkrijgen zijn in Hoofdstuk 3 twee golfuitdovende principes gebruikt in de verschillende ontwerpen:

- 1) Golfuitdoving door vegetatie (grienden)
- 2) Golfuitdoving door kades

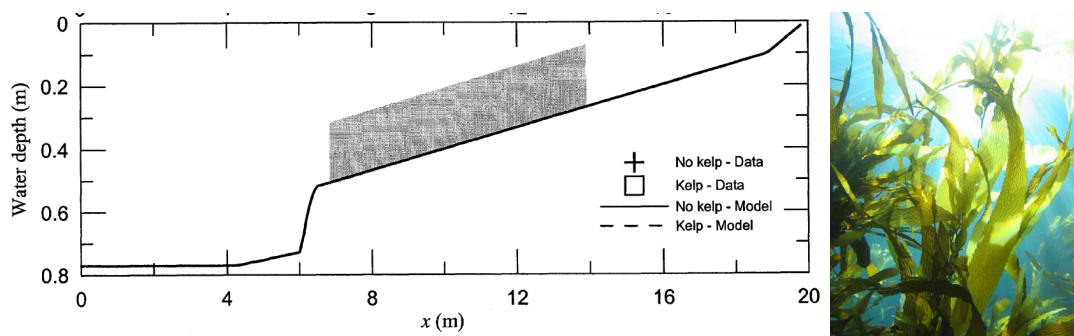
In dit hoofdstuk wordt onderzocht wat de te verwachten reductie in golfhoogte is van deze twee golfuitdovende principes. Om golfuitdoving door vegetatie te kwantificeren zijn een literatuurstudie en een modelstudie uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn beschreven in paragraaf 4.2 en 4.3. De golfuitdoving door kades is onderzocht met behulp van beschikbare rekenregels; de resultaten hiervan zijn beschreven in paragraaf 4.4. In hoeverre de golfuitdoving effect heeft op de hoogte van de dijk is beschreven in paragraaf 4.5. In paragraaf 4.6 wordt het voorkeursontwerp 'getoetst' op haar golfreducerende werking.

4.2 Golfuitdoving door vegetatie: literatuuronderzoek

Om een gevoel te krijgen voor mogelijke golfuitdoving door vegetatie is gezocht naar de resultaten van metingen die gepubliceerd zijn in de wetenschappelijke literatuur. Hieronder zijn de resultaten van 3 verschillende onderzoeken samengevat. Dit geeft een indruk van de typische reductie in golfhoogte door vegetatie.

4.2.1 Mendez en Losada (2004)

Mendez en Losada hebben de uitdoving van golven door vegetatie gemeten in een laboratorium opstelling. Het vegetatieveld had een lengte van 7 m en bestond uit kelp (flexibele vegetatie) onder water ('submerged'). De vegetatie stond op een helling van 1:30 (Figuur 4.1). Het effect van vegetatie op de golven was gemeten voor verschillende golfhoogtes en periode. In Tabel 4.1 zijn de resultaten weergegeven van de golfuitdoving over het vegetatieveld (dus over 7 m). De golfuitdoving is een combinatie van golfuitdoving door vegetatie en golfuitdoving door breken. De conclusie is dat over het vegetatieveld significante golfuitdoving plaats vindt.



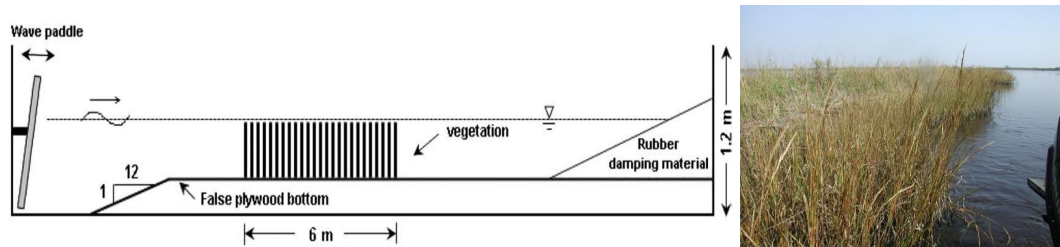
Figuur 4-1 Modelopzet van de Metingen door Mendez en Losada (2004) en een foto van kelp in de natuur.

Tabel 4-1 Golfuitdoving door vegetatie ($H_{rms\ in}$ = inkomende golfhoogte, T_p = golfpiekperiode, h = waterdiepte, $H_{rms\ uit}$ = golfhoogte na het vegetatieveld

H_{m0} in (m)	T_p (s)	h (m)	$H_{rms\ uit}$ (m)	Uitdoving 7m (%)
0.18	3.5	0.69	0.11	38.9
0.22	2.5	0.77	0.12	45.5
0.125	3.5	0.77	0.09	28.0
0.20	3.5	0.77	0.14	30.0

4.2.2 Augustin et al. (2008)

In Figuur 4.2 is de modelopzet van Augustin et al. (2008) weergegeven. Augustin et al. gebruiken kunstmatige vegetatie met dezelfde eigenschappen als *Spartina alterniflora*. In tegenstelling tot kelp is *Spartina* een stijve vegetatiesoort, vergelijkbaar met riet. Door Augustin et al. worden met name het effect van golfuitdoving door vegetatie die boven het water uitsteekt onderzocht ('emerged'). De resultaten van de metingen van Augustin et al. zijn weergegeven in Tabel 4.2.



Figuur 4-2 Modelopzet in het onderzoek van Augustin et al. (2008) en een foto van *Spartina alterniflora* in de natuur.

Tabel 4-2 Reductie van golfhoogte over een vegetatieveld van 6 m, voor verschillende golfhoogtes (H_{rms}), golfperiodes (T_p) waterdiepte (h) en het aantal stelen per m^2 (N)

H_{m0} (cm)	T_p (s)	h (m)	N (stems/ m^2)	Reductie 6 m (%)
12	2.0	0.3	97	29.6
12	2.0	0.3	194/97*	32.8
12	2.0	0.4	97	20.3
12	2.0	0.4	194/97*	24.1
12	1.5	0.3	97	32.2
12	1.5	0.3	194/97*	41.2
12	1.5	0.4	97	27.5
12	1.5	0.4	194/97*	21.3

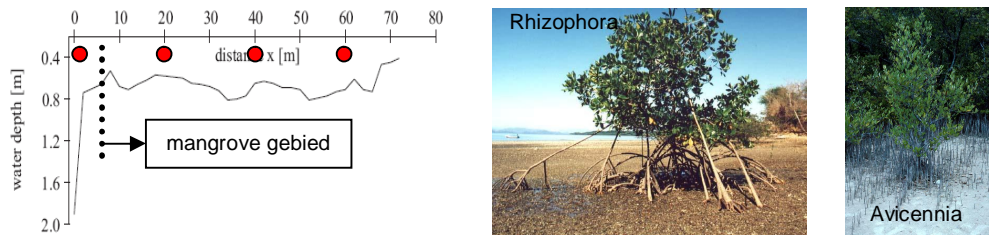
*hogere dichtheid van vegetatie in de eerste 3 m van het vegetatieveld en lagere dichtheid in de laatste 3 m.

Hoewel de vegetatie onderzocht door Augustin et al. stijver is dan die onderzocht door Mendez en Losada (2004) en de proefopstelling ook verschillend is in beide onderzoeken, is de reductie in golfhoogte vergelijkbaar.

4.2.3 Vo-Luong and Massel (2006)

Vo-Luong and Massel (2006) hebben veldmetingen uitgevoerd in het Can Gio mangrovebos, bij Nang Hai, Zuid-Vietnam. Het bos bestaat uit een mix tussen *Avicennia* en *Rhizophora* mangroves (zie Figuur 4.3). Het reliëf onder de mangroves is weergegeven in Figuur 4.3. Voor verschillende waterstanden zijn golfmetingen uitgevoerd. De resultaten zijn samengevat in Tabel 4.3. Opvallend is dat de reductie

van de golfhoogte met name in de eerste 20 m plaatsvindt. De uitdoving ligt rond de 50%-70%.



Figuur 4-3 Reliëf van het mangrove gebied en voorbeelden van *Rhizophora* en *Avicennia* mangroves. De rode punten geven de posities van de metingen weer (zie Tabel 4.3)

Tabel 4-3 Gemeten golfuitdoving (H_s) voor verschillende waterdieptes en locaties (zie Figuur 4.3) in het Can Gio mangrovebos bij Nang Hai, Zuid-Vietnam

h (m)	H_s (m) in	H_s (m) at 20m	H_s (m) at 40m	H_s (m) at 60m
1.9	0.38	0.14	0.12	0.14
2.1	0.39	0.17	0.17	0.10
2.5	0.39	-	0.22	0.22

4.2.4 Conclusies

Uit de bovenstaande resultaten van de laboratoriummetingen en veldmetingen van golfuitdoving over vegetatie kan het volgende worden geconcludeerd:

- Vegetatie is in staat golven significant uit te doven.
- Golfuitdoving hangt af van de breedte van het vegetatieveld. Meestal vindt de grootste golfuitdoving in de eerste meters van het vegetatieveld plaats.
- Golfuitdoving hangt af van vegetatiekenmerken (flexibiliteit, dichtheid, hoogte).
- Golfuitdoving hangt af van fysische grootheden (H_s , T_p , h).

4.3 Golfuitdoving door vegetatie: modelonderzoek

Om specifiek voor de Noordwaard inzicht te krijgen in de mogelijke golfuitdoving door vegetatie is een modelonderzoek uitgevoerd. Hier worden achtereenvolgens de modelopzet, de resultaten en een discussie van de resultaten van het modelonderzoek beschreven.

4.3.1 Modelopzet

Het golfmodel SWAN is toegepast om het effect van vegetatie op golven te analyseren. In SWAN versie 40.55 is hiertoe de energiedissipatieformulering van Dalrymple (Dalrymple et al. 1984 en uitgewerkt door Mendez en Losada (2004)) geïmplementeerd SWAN-MOD. Door deze formulering kan zowel de horizontale als verticale verdeling van vegetatie worden meegenomen in de berekening van golfuitdoving. Hiertoe wordt de vegetatie beschreven als een verzameling stammen/takken per oppervlakte-eenheid, waarbij per laag diameter, aantal en weerstand van de stammen/takken kan worden gevarieerd. De mate van energiedissipatie per vierkante meter vegetatie bepaalt de berekende golfhoogte.

In de Dalrympleformulering wordt vegetatie beschreven met drie parameters, diameter (D), aantal takken per m^2 (N) en de weerstandscoefficiënt C_D . De C_D heeft de waarde 1 voor stijve ronde cilinders. De drie parameters kunnen worden vermenigvuldigd en leveren dan de zogenaamde vegetatiefactor V_f , als volgt:

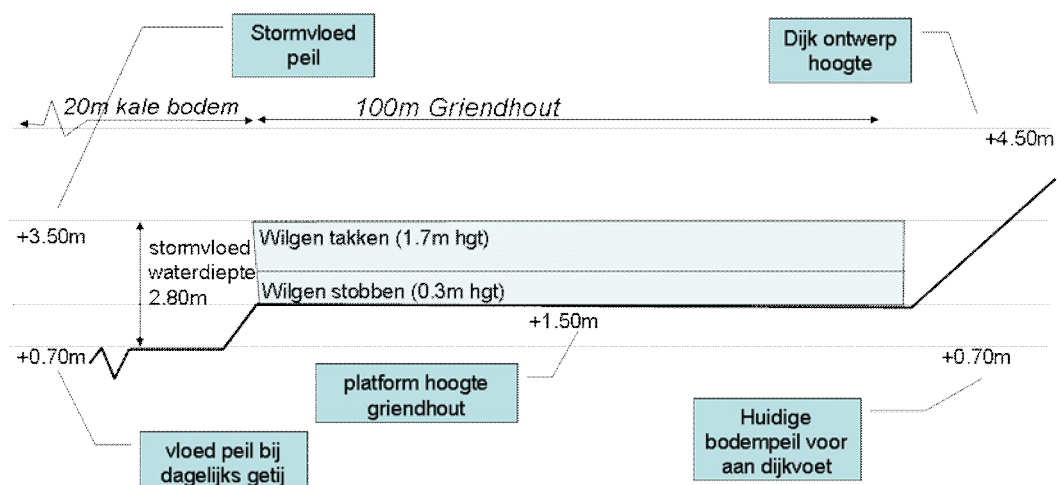
$$V_f = C_D * D * N$$

Meer informatie over vegetatie in SWAN is te vinden in Bijlage C.

Configuratie

In Figuur 4.4 is een dwarsprofiel weergegeven, dat een schematische weergave is van het nieuwe ontwerp (voorkeursontwerp, zie Hoofdstuk 3) van de dijk rondom Fort Steurgat. Het dwarsprofiel bestaat uit een kale bodem van 20 m breed, gevolgd door een 'griendstrook' van 100 m breed tot aan de dijk. De dijk zelf is niet gemodelleerd met SWAN. De strook griendhout staat op een berm die 80 cm hoger ligt dan de omgeving. Hoewel verwacht kan worden dat het model SWAN-MOD onnauwkeurige resultaten geeft bij het begin van de berm (zie Figuur 4.6) wordt deze toch meegenomen, aangezien de onnauwkeurigheid beperkt is tot deze plek en niet de overige modelresultaten beïnvloedt.

Omdat de vegetatie bestaat uit griendhout, wordt deze ingedeeld in twee lagen, namelijk een onderste laag van 0,3m bestaande uit stobben met een onderlinge afstand van 0,7m (tussen rijen) en een afstand van 0,3m tussen stobben (per rij) en daarboven een laag over de rest van de waterdiepte met takken¹. In Figuur 4.5 is een schets van een mogelijk ontwerp van een met griend begroeide berm getoond. Hierbij groeit het griendhout niet boven de kruin van de dijk uit. Verder is aangenomen dat het stormvloedniveau van 3,50 m+NAP niet uitstijgt boven de toppen van de vegetatie. Dit garandeert een maximale golfreductie.



Figuur 4-4 Een schematische weergave van het dwarsprofiel van het nieuwe ontwerp van de dijk bij Fort Steurgat. Dit profiel is gemodelleerd met SWAN-MOD

Vegetatiekenmerken

In Hoofdstuk 3 is de keuze voor toepassing van een wilgengriend gemotiveerd. Door te kiezen voor een beplanting in 'plantage'-vorm, zoals die op enkele plekken in Nederland wordt toegepast, is informatie beschikbaar over dikte en hoogte van stammen en takken en over jaarlijkse aangroei en mogelijk beheer. Dit is dan ook de basisvorm die gebruikt is in de model analyse in dit hoofdstuk. In Tabel 4-4 zijn de eigenschappen van griend samengevat.

¹ Meest realistische schatting voor hoge dichtheid van stoven op basis van informatie van van Schaik BV.

Tabel 4-4 Eigenschappen van griend zoals gemeten tijdens veldmeting Rhoonse Grienden: D = diameter, N /stoof = aantal stammen per stoof, N/m^2 = aantal stammen per vierkante meter, C_D = ruwheids coëfficiënt en V_f = vegetatiefactor. Per eigenschap is een hoge (H), lage (L) en gemiddelde (gem) schatting gegeven

	D (mm)			N/stoof			N / m ²			C _D *	V _f		
	H	L	gem	H	L	gem	H	L	gem		H	L	gem
Griend takken 1 jr	13	9	11	100	30	60	430	129	258	0.7	3.9	0.8	2.0
Gemiddelde van 1 jr en 3 jr	15	11	13	100	30	60	430	129	258	0.8	5.2	1.1	2.7
Griend takken 3 jr	16	14	15	100	30	60	430	129	258	0.8	5.5	1.4	3.1
Griend stoven	300	100	200				4.3			1.0	1.3	0.4	0.9

* C_D (Ruwheid coëfficiënt) kan niet makkelijk worden gemeten en is dus geschat op basis van literatuur en expertise. Een C_D waarde 1.0 hoort bij rigide ronde gladde cilinders.

Merk op dat de groei van griendtakken zich uit door gemiddeld dikkere takken en niet door een grotere dichtheid. Verder wordt duidelijk dat met name in de dichtheid nog een grote marge zit in de schattingen. Dit resulteert in verschillende schattingen van vegetatiefactor V_f.

De schatting van de vegetatiefactor V_f is gesplitst in een schatting voor takken en een schatting voor stoven. Beide vegetatiefactoren moeten worden gecombineerd tot 1 vegetatiefactor voor griend. In Tabel 4.5 zijn beide vegetatiefactoren gemiddeld over de hoogte, tot 1 vegetatiefactor voor griend. Om de verschillen in mogelijke dichtheden mee te nemen in de analyse is een lage, gemiddelde en hoge schatting van de gecombineerde vegetatiefactor gemaakt. Deze schattingen combineren de lage, gemiddelde en hoge schattingen van vegetatiefactoren voor takken en stoven (zie Tabel 4.4).

Tabel 4-5 Schatting van gecombineerde vegetatiefactoren V_f voor griend op basis van vegetatiefactoren van griend takken en griend stoven

Laag	0-alternatief	Laag	Gemiddeld	Hoog
Takken (1.7 m)	0.0	0.8	2.7	5.5
Stoven (0.3 m)	0.0	0.4	0.9	1.3
Schatting	0.0	0.7	2.4	4.9
Naam model Case	AD00	AD01	AD02	AD03

Randvoorwaarden

De golfrandvoorwaarden voor het model zijn overgenomen uit Tabel 2.1. Uit Tabel 2.1 blijkt dat de maatgevende golfhoogtes langs de westelijke en zuidelijke kant van de dijkkring iets lager zijn dan de golfhoogtes langs de noordelijke kant. Voor de Noordhoek van de dijkkring is een hybride-ontwerp gemaakt (grienden in combinatie met kades, zie Hoofdstuk 3). Voor het griendontwerp zoals hierboven beschreven zijn de golfcondities langs de westelijke en zuidelijke kant maatgevend. De golfcondities van rekenpunt 4 zijn gekozen voor deze modelstudie:

- Golfhoogte H_s = 1,2 m (golfhoogte bij begin van vegetatieveld, hogere golfhoogte op modelrand)
- Golf piekperiode T_p = 4,8 s

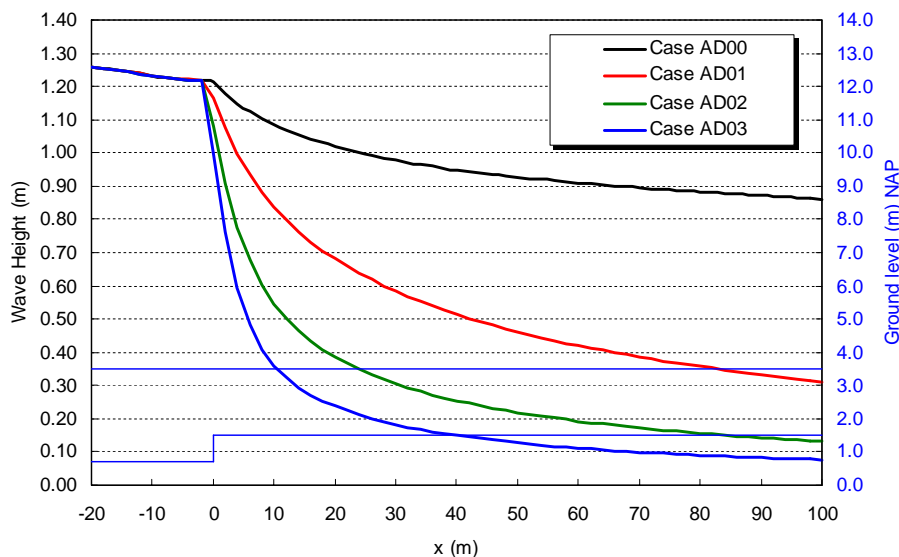
Het effect van aangroei van golven door wind is niet meegenomen in de modellering.

4.3.2 Resultaten

In Figuur 4.5 is de golfuitdoving door vegetatie voor verschillende vegetatiefactoren, berekend met SWAN-MOD, weergegeven. Hierin valt het volgende op:

- 1) Zonder griend op de berm wordt de golfhoogte gereduceerd met ongeveer 25%-30% ten opzichte van de inkomende golf.
- 2) Met griend op de berm is de reductie van de golfhoogtes significant meer dan in het geval zonder griend. De grootste reductie treedt op in de eerste tien meter van het vegetatieveld.
- 3) De afname van de golfhoogtes hangt af van de vegetatiefactor V_f (combinatie van verschillende vegetatiekenmerken). Bij een vegetatiefactor van 0,7 is de afname over 100 m griendhoutbos ongeveer 75%, bij $V_f = 2.4$ is de afname ongeveer 85% en bij $V_f = 4.9$ is de afname ongeveer 93%.

Op basis van deze berekeningen kan worden geconcludeerd dat een volgroeid griendhoutbos van 100 m breed de golfhoogtes met 75%-93% kan reduceren.



Figuur 4-5 Golfhoogte (linker-as) in het vegetatieveld berekend met SWAN-MOD. De bodemhoogte is aangegeven met de dunne blauwe lijn (rechter-as). Het vegetatieveld start bij de berm (0 m) en is 100 m breed.

4.3.3 Discussie

De berekeningen kunnen verschillende vragen oproepen. In deze paragraaf worden de volgende discussiepunten besproken:

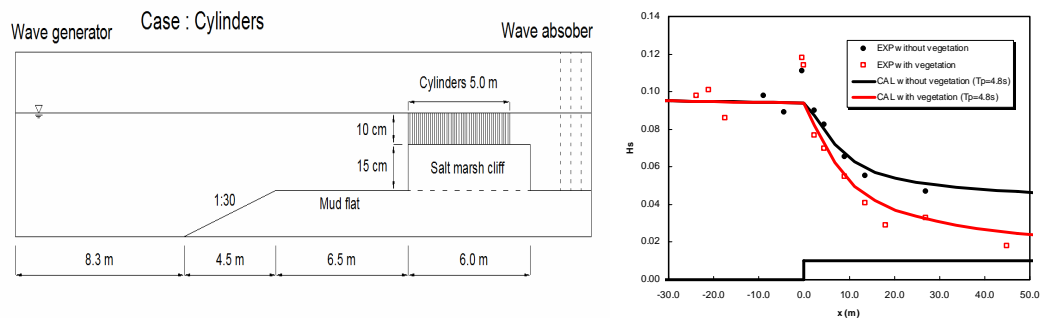
- a) betrouwbaarheid van het model;
- b) schaaffecten;
- c) invloed van maaien en aangroei.

Betrouwbaarheid van het model

Het model SWAN is in vele studies een betrouwbaar en nauwkeurig model gebleken om golven ('sea states') te berekenen. Het model is uitgebreid gevalideerd voor verschillende situaties.

De onderzoeksversie van SWAN (SWAN versie 40.55 + implementatie Dalrymple et al, 1984 = SWAN-MOD) waarmee hier gerekend is, is gevalideerd met de experimenten van Suzuki (2008). In Figuur 4.6 is een vergelijking gemaakt tussen de metingen en het

modelresultaat (waarbij het modelresultaat is opgeschaald). Te zien is dat de uitdoving van de golven goed kan worden nagerekend met het model.



Figuur 4-6 Modelopzet (links) van het experiment om golfuitdoving over vegetatie (gerepresenteerd door cilinders) te meten. Rechts de meetresultaten (met en zonder vegetatie) in vergelijking met de modelresultaten berekend met SWAN-MOD (SWAN met vegetatie)

Omdat de uitdoving van de golven over de vegetatie goed kan worden benaderd met SWAN-MOD wordt dit model ook voldoende betrouwbaar geacht om het effect van grienden op golven te bepalen voor de Noordwaard.

De invloed van vegetatie wordt bepaald aan de hand van verschillende parameters. Aangenomen is dat de vegetatie kan worden beschreven als een verzameling (stijve) cilinders met een bepaalde hoogte, diameter en dichtheid per eenheid van oppervlak (zie paragraaf 4.2.1). Dit is een vereenvoudiging van de complexe vegetatiestructuur die griend kan hebben. Daarnaast wordt het effect van flexibele, meebewegende takken niet meegenomen in het model. De verwachting is dat meebewegende takken de golfhoogtes minder zullen reduceren. In het geval van griend zal dit een kleine rol spelen door de relatief stijve takken van wilg.

Een andere beperking van de schematisatie van vegetatie is dat griend moet worden samengevat in 1 vegetatiefactor, terwijl griend duidelijk uit twee lagen bestaat (stoven en takken). De invloed van stoven is kleiner dan die van de takken (lagere vegetatiefactor, zie Tabel 4.4 en 4.5), waardoor de gemiddelde vegetatiefactor een onderschatting is van de vegetatiefactor voor takken. Bij maatgevend hoogwater (MHW) zullen de golven vooral beïnvloed worden door de takken en nauwelijks door de stoven. De verwachting is dat de gecombineerde vegetatiefactor, zoals toegepast in de berekeningen, leidt tot een onderschatting van het reducerende effect. Zonder metingen kan dit niet worden onderbouwd.

Schaaleffecten

Het vegetatiemodel zoals geïmplementeerd in SWAN-MOD is gebaseerd op laboratoriumexperimenten en gevalideerd met zowel laboratorium- als veldexperimenten voor verschillende combinaties tussen golfhoogtes, periodes, waterdieptes en vegetatiekenmerken. In de uitgevoerde berekening is de model randvoorwaarde veel groter (hogere golfhoogtes, periodes, waterdieptes) dan in het laboratorium- en veldonderzoek waarop het geïmplementeerde vegetatiemodel is gebaseerd. Kenmerken van de vegetatie gebruikt in de onderzoeken en de griend zijn wel vergelijkbaar. Het is moeilijk om dit soort schaafeffecten te bepalen. De vragen die hierin richtinggevend zijn, zijn:

- Vinden dezelfde processen plaats als de ruimtelijke schaal groter wordt?
- Vinden dezelfde processen plaats als de forcering hoger wordt?

Wanneer de processen niet veranderen als de schaal groter wordt (niet alleen ruimtelijk, maar ook grotere forcering) kunnen de relaties tussen golfuitdoving en vegetatiekenmerken zonder probleem worden geëxtrapoleerd naar grotere schaal.

Wat betreft de ruimtelijke schaal is een vergelijking tussen de geteste biovolumes een goede indicator. Als de biovolumes vergelijkbaar zijn kan naar verwachting zonder probleem de resultaten worden geëxtrapoleerd naar een grotere schaal.

Om dit te verifiëren is het experiment van Suzuki 2008 gebruikt. In Tabel 4.6 zijn de verschillende biovolumes bepaald volgens de volgende vergelijking:

$$\text{biovolume} = N * \pi * r^2$$

Waarin:

Biovolume= vegetatie in m³ per eenheid van hoogte

N = aantal stammetjes per m²

r = straal van de stammetjes

Omdat in beide gevallen de vegetatie door de waterkolom steekt hoeft de hoogte van de vegetatie niet worden meegenomen in de berekening van de biomassa.

Tabel 4-6 Vergelijking in biovolume tussen Suzuki (2008) en gebruikt in model berekeningen

Schaal	N	r	Biovolume
Suzuki (exp. schaal)	1000	0,003	0,028
Griend (stoof, ware schaal)	4,3	0,1	0,135
Griend (takken, ware schaal)	258	0,006	0,029

Hieruit volgt dat voor de onderste 15% van de waterdiepte (de stoven) de model benadering met een groter biovolume werkt dan gebruikt in Suzuki (2008). Voor de takken (85% van de waterdiepte) is het biovolume nagenoeg gelijk. Hieruit wordt geconcludeerd dat de huidige modelbenadering voor de takken (en daarmee het grootste deel van de golfdempende werking) goed aansluit bij de validatie van het model op experimentele schaal. De berekende golfuitdoving is hierdoor eveneens goed vergelijkbaar met het experiment. De verwachting is dus dat de resultaten zonder problemen kunnen worden geëxtrapoleerd naar de grotere ruimtelijke schaal van de Noordwaard.

Hierboven is het effect van een grotere ruimtelijke schaal besproken. De tweede vraag gaat over een grotere forcering: vinden er andere processen plaats als de golfhoogtes of de golfperiodes groter worden? Bij een grotere forcering kan worden verwacht dat de takken van griend meer gaan bewegen, waardoor golven minder worden uitgedoofd. Deze flexibiliteit zit niet in het model en kan zorgen voor een overschatting van het uitdovende effect van grienden. Echter, in het geval van griend zal dit effect een kleine rol spelen door de relatief stijve takken. Een tweede effect bij grotere forcering is een vergroting van de turbulentie tussen de takken. Hierdoor zal meer energieverlies optreden waardoor het golfuitdovende effect groter zal zijn.

De verwachting is dat het netto golfuitdovende effect voor griend niet veel afwijkt bij een grotere forcering (voor meer flexibele vegetatie of minder sterke vegetatie zoals riet is dit anders).

Invloed van maaien en aangroei

Griend moet onderhouden worden en is daarom niet het hele jaar door volledig begroeid. Hierdoor varieert het reducerend effect van grienden gedurende het jaar. Om af te tasten wat de invloed is van beheer op de reductie in golfhoogte aan de voet van de dijk zijn enkele testberekeningen gemaakt. In Tabel 4.7 zijn verschillende gecombineerde vegetatiefactoren bepaald die corresponderen met verschillende groeistadia van griend. In de testsommen is de leeftijd van griendtakken afhankelijk gemaakt van het type beheer.

Tabel 4-7 Berekening van vegetatiefactoren op basis van de leeftijd van griendtakken

Age	2y	1.5y	1y	0.5y	0y
bv	0.013	0.012	0.011	0.008	0
N	258	258	258	258	0
Cd	0.8	0.75	0.7	0.5	0
1.7	2.7	2.3	2.0	1.0	0.0
0.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Ave Vf	2.4	2.1	1.8	1.0	0.1

Twee verschillende beheers strategieën zijn getest:

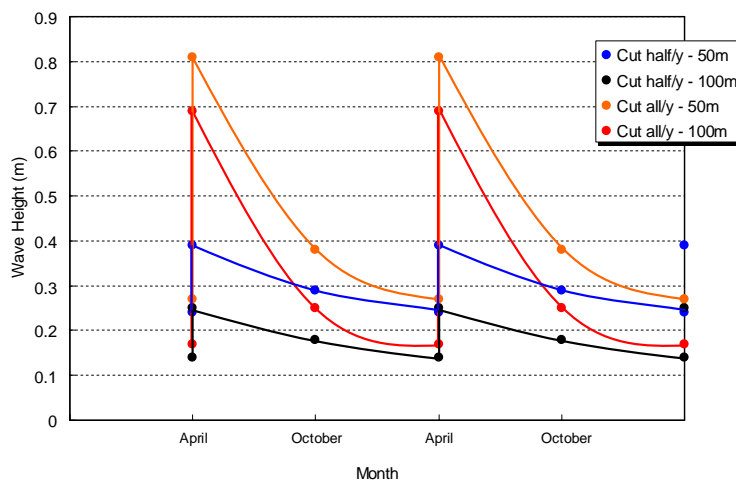
- strategie A: 1x per jaar halve oppervlak maaien
- strategie B: 1x per jaar hele oppervlak maaien.

Maaien gebeurt in de laatste week van maart. Hierna is de griend half kaal (A) of geheel kaal (B). Tussen april en november zullen de wilgentenen weer hergroeien.

De testberekeningen zijn uitgevoerd voor dezelfde randvoorwaarden als de eerdere berekeningen (zie paragraaf 4.2.1). In Figuur 4.7 zijn de golfhoogtes op 50 m en 100 m gepresenteerd voor zowel strategie A als strategie B, afhankelijk van de tijd in het jaar.

Te zien is dat door hergroei van de wilgentenen tussen maart en november (begin van stormseizoen) de golfreductie na een minimum op 1 april geleidelijk weer toe neemt. De breedte van de griend bepaalt de totaal gerealiseerde golfuitdoving. Een duidelijk verschil tussen beide cases is de hoge voortdurend aanwezige 'rest'-waarde van de golfreductie in strategie A. Er staat immers altijd een halve oppervlakte aan wilgentenen die, door de hogere leeftijd, ook nog wat dikker zijn.

Wat hieruit geconcludeerd kan worden is dat de beheersstrategie veel invloed heeft op de reductie van golfhoogte bij de teen van de dijk op verschillende tijdstippen in het jaar. Door middel van goed beheer kan er op ieder tijdstip in het jaar een minimale reductie van 80% van de golfhoogte worden behaald. Het is dus van belang om de beheersstrategie mee te nemen in de ontwikkeling van het uiteindelijke ontwerp, en het griend onderdeel te maken van de primaire waterkering.



Figuur 4-7 Tijdsree van resterende golfhoogte in beheerd griend.

4.3.4 Conclusies

Op basis van het modelonderzoek kan worden geconcludeerd dat een griendhoutbos van 100m breed in staat is om golfhoogtes met 75%-93% te reduceren. De beheersstrategie heeft invloed op de reductie van golfhoogtes.

De modelresultaten zijn vergelijkbaar met wat in veldmetingen is waargenomen. Het SWAN model is succesvol getest op een test met vegetatie op laboratoriumschaal. De validiteit van opschaling naar de werkelijke situatie is onderbouwd. Onze conclusie is dat de resultaten betrouwbaar zijn maar dat de waarden van de fysische en biologische randvoorwaarden voor de werkelijke situatie na aanleg moeten worden geverifieerd..

4.4 Golfuitdoving door kades

In de vorige paragrafen is het principe van golfuitdoving door vegetatie geanalyseerd. In deze paragraaf zal golfuitdoving door kades worden besproken.

Voor de kades die meegenomen zijn in het ontwerp van de Noordhoek (zie Figuur 3.5) is een hoogte van 3 m +NAP voorgesteld. Dit betekent dat bij maatgevend hoogwater (3,5 m +NAP) de kruin van de kade 0,5 m onder water staat. In dit geval zal golfenergie over de kade worden getransporteerd.

Om een schatting te maken van de transmissie van golfenergie is gebruik gemaakt van de vergelijkingen in Tabel 4.8 (Van der Meer en Daemen, 1994). Hierin is:

R_c = relatieve kruinhoogte (hoogte kruin kade – maatgevende waterstand)

H_s = significante golfhoogte

C_t = transmissiecoëfficiënt

Voor de kades gebruikt in het ontwerp is R_c gelijk aan $3,0\text{m} - 3,5\text{m} = -0,5\text{m}$. De maatgevende golfhoogte voor de kades is 1.3 m. Hieruit volgt een transmissie coëfficiënt van ongeveer 0.6. Dit betekent dat 60% van de golfhoogte resteert na passage van de kade. Dit is geverifieerd met andere vergelijkingen (beschikbaar in de rekenmodules CRESS).

Tabel 4-8 vergelijking voor transmissiecoëfficiënt van kades met een lage kruinhoogte

Geldigheidsbereik	Vergelijking
$-2.00 < \frac{R_c}{H_s} < -1.13$	$C_t = 0.80$
$-1.13 < \frac{R_c}{H_s} < 1.2$	$C_t = 0.46 - 0.3 \frac{R_c}{H_s}$
$1.2 < \frac{R_c}{H_s} < 2.0$	$C_t = 0.10$

De breedte van de kade heeft een beperkte invloed op de transmissie bij breedtes kleiner dan een golflengte. Wanneer de kade breder is dan 1 golflengte kan extra golfuitdoving door bodemwrijving en/of breking worden verwacht. Onder maatgevende omstandigheden ($T_p = 4,8$ s) is de golflengte ongeveer 23 m (berekend op basis van lineaire golftheorie). In het ontwerp voor de Noordwaard is die breedte nergens voorzien.

4.5 Effect van golfuitdoving op de dijkhoogte

In hoofdstuk 3 is het voorkeursontwerp voor Fort Steurgat beschreven. Hierbij is aangegeven dat de hoogte van het dijkprofiel afhankelijk is van het golfremmende effect van griend. Op basis van het profiel zoals beschreven in hoofdstuk 3 en de fysische randvoorwaarden gegeven in Tabel 2.1 kan voor verschillende reducties in golfhoogtes een bijbehorende kruinhoogte worden berekend. In Tabel 4.9 is het resultaat gegeven.

De benodigde kruinhoogte van het dijkprofiel berust op de volgende elementen:

- Maatgevend hoogwater (zie Tabel 2.1)
- Golfoploop met een maximaal overslagdebiet van 2 l/m/s op basis van golfparameters.
- Een minimale waakhoogte (verschil tussen MHW en kruinhoogte) van 0.5 m
- Robuustheidtoeslag van 0.3 m
- Toeslag voor zeespiegelstijging van 0.15 m

In Tabel 4.9 is in de bepaling van de kruinhoogte alleen een reductie van de golfhoogte meegenomen en geen reductie van de golfperiode.

De vereiste kruinhoogtes die in Tabel 4.9 zijn gepresenteerd moeten worden gezien als een indicatie en kunnen door veranderingen in het talud verder worden geoptimaliseerd.

Tabel 4-9 Effect van een reductie in golfhoogte op de vereiste kruinhoogte van de dijk (uitgaande van het aangepaste dijkprofiel, zie hoofdstuk 3)

Reductie in golfhoogte	Kruinhoogte
20%	5,35 m +NAP
40%	5,00 m +NAP
60%	4,55 m +NAP
80%	4,35 m +NAP*

* Bij een golfreductie van 80% wordt de kruinhoogte bepaald door de minimaal vereiste waakhoogte van 0,5m

Een belangrijke aanvullende opmerking is dat de golfaanval is berekend op basis van strijklengtes in combinatie met een maatgevende wind. Deze benadering leidt vaak tot een overschatting van de maatgevende golfhoogte. Een gedetailleerd golfmodel kan meer inzicht geven in de werkelijk te verwachten golfaanval op de dijk. Met dit resultaat kan het ontwerp verder worden geoptimaliseerd. Echter, als de golfhoogte met meer dan 80% wordt gereduceerd is er vanwege de minimale waakhoogte van 0,5 m geen verdere verlaging van de vereiste dijkhoogte mogelijk.

4.6 Verificatie voorkeursontwerp

In de voorgaande paragrafen zijn de twee golfuitdovende principes besproken die worden toegepast in het voorkeursontwerp van de groene golfremmende dijk. Hieruit kan het volgende worden geconcludeerd:

- Een griend levert circa 70-90% golfremmende werking als deze de vorm heeft van een plantage met tweejaarlijks beheer bij een breedte van circa 100m.
- Kades met een hoogte van 3,0m +NAP leveren een reductie van 40% in golfhoogte.

Het voorkeursontwerp (zie Hoofdstuk 3) is een griend, aanliggend aan en uitwiggend langs de dijk, met de grootste breedte op de zuidwesthoek van het fort (zie Hoofdstuk 3). Dit maakt een uitbreiding over de geplande kreek Bevertstaart noodzakelijk om voldoende breedte (ca. 100 m) te halen.

Ten noorden van de Bandijk is te weinig ruimte beschikbaar voor een griend van voldoende breedte. Een smalle strook griend (circa 30 m) achter een kade (3,0m +NAP, 3m brede kruin) levert voldoende golfreductie op.

De aanleg van een dergelijke wilgenplantage is niet gecompliceerd en er is elders al ervaring mee. De griend kan door regelmatig onderhoud decennia lang worden gehandhaafd en blijft door overstroming met slibrijk water zeer lang productief. Massale sterfte door ziekte wordt bij gebruik van resistente soorten niet verwacht. Herplant levert in enkele jaren weer een voldoende golfremmende werking. Kosten van aanleg zijn circa 7000 euro/ha. Onderhoudskosten circa 1100 euro/ha per twee jaar (zie bijlage B voor details).

Onderhoudskosten hangen sterk af van de bereikbaarheid van de griend voor machines (7 ton) en afvoer van biomassa. Extra aanleg kosten komen voort uit de noodzaak een voldoende sterke brug aan te leggen om materieel voor onderhoud van grienden over de geul te kunnen transporteren.

Ten noorden van de Bandijk is het onderhoud van griend relatief duur door de kleine schaal. Dit levert, in combinatie met onderhoud van de kade, iets hogere kosten (per km dijk) op.

Mogelijk is de invloed op stroming tijdens maatgevende condities door de aanwezigheid van grienden iets verder vanaf de dijk richting de hoofdstroom problematisch. Dicht bij de dijk worden lage stroomsnelheden verwacht in het huidige ontwerp van de stroomopeningen en geulen. Verwacht wordt dat de griend en de kade samen weinig effect zullen hebben op doorstroming onder maatgevende omstandigheden. Dit moet nader worden onderzocht.

4.7 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn de twee golfremmende principes van het voorkeursontwerp onderzocht:

- Golfremming door vegetatie
- Golfremming door kades

Uit het onderzoek blijkt dat vegetatie de golfaanval op de dijk kan reduceren. Op basis van modelonderzoek blijkt dat bij een vegetatieveld van 100 m een reductie van circa 70-90% kan worden behaald. Deze bevindingen worden ondersteund door de literatuur. Uit een analyse blijkt dat de berekeningen als betrouwbaar en ongevoelig voor schaaleffecten kunnen worden beschouwd.

Golfuitdoving door kades is met beschikbare vergelijkingen uit de literatuur verkend. Het ontwerp zoals voorzien levert een reductie van circa 40% in golfhoogte. In combinatie met vegetatie kan dit effectief zijn om golfaanval op de dijk te reduceren.

Beide golfuitdovende principes, in combinatie met het aangepaste profiel van de dijk kunnen resulteren in lagere vereiste kruinhoogtes ten opzichte van het 'klassieke ontwerp'. Bij een reductie van 80% van de inkomende golfhoogte kan de vereiste kruinhoogte van de dijk worden beperkt tot 4,35m +NAP.

Een belangrijke aanvullende opmerking is dat de golfaanval is berekend op basis van strijklengtes in combinatie met een maatgevende wind. Deze benadering leidt vaak tot een overschatting van de werkelijke maatgevende golfhoogte. Een gedetailleerd 2-dimensionaal golfmodel kan meer inzicht geven in de golfaanval op de dijk. Met dit resultaat kan het ontwerp verder worden geoptimaliseerd. Echter, als de golfhoogte met meer dan 80% wordt gereduceerd is er vanwege de minimale waakhoogte van 0,5 m geen verdere verlaging van de vereiste dijkhoogte mogelijk.

Uitgaande van een minimale reductie in golfhoogte van 80% lijkt het voorkeursontwerp mogelijk als er voldoende breedte griend wordt geplant en de griend op een juiste manier beheerd wordt.

5 Analyse van ontwerpen

5.1 Inleiding

In Hoofdstuk 2 en 3 zijn twee verschillende ontwerpen besproken:

1. Het klassieke ontwerp
2. De groene golfremmende dijk (het voorkeursontwerp)

In dit hoofdstuk wordt een vergelijking gemaakt worden tussen beide ontwerpen op basis van de volgende criteria:

- Natuur
- Landschap
- Beheer
- Veiligheid

Deze criteria zullen achtereenvolgens worden besproken (paragraaf 5.2 – 5.5). In paragraaf 5.6 zal dit worden samengevat.

5.2 Natuur

5.2.1 Klassiek ontwerp

In het klassiek ontwerp treffen we in de toekomst buitendijks Fort Steurgat een begraasd landschap aan, met grassen en in nattere zones riet- en biezenvegetaties. Op de grasdijk van Fort Steurgat zou hooilandbeheer of begrazing door schapen voor een waardevol ecotoop kunnen zorgen.

5.2.2 Voorkeursontwerp

Grienden

De nieuwe grienden worden met sloten beschermd tegen grote grazers. De griendplantages zijn zeer dicht begroeid. Binnen de dichtbegroeide griend is door lichtlimitatie nauwelijks ondergroei mogelijk. De griend dient als schuilplek voor vogels en kleine zoogdieren. Door regelmatig maaibeheer wordt geen hoge dichtheid aan in bomen broedende soorten verwacht.

Kades

De golfremmende kades zijn met gras begroeid en worden begraasd door vee, dat vanuit de omgeving de kades kan oplopen. Delen van de kades moeten waarschijnlijk worden verhard om erosie te voorkomen. De kades kunnen mogelijk door vogels en vee worden benut als broedlocaties en hoogwatervluchtplaatsen.

Aangepast talud

Het aangepaste talud heeft in tegenstelling tot het klassieke ontwerp een grasbekleding in het onderste gedeelte van het talud. Hierdoor wordt de natuur waarde van het voorkeursontwerp verder vergroot.

5.3 Landschap

5.3.1 Klassiek ontwerp

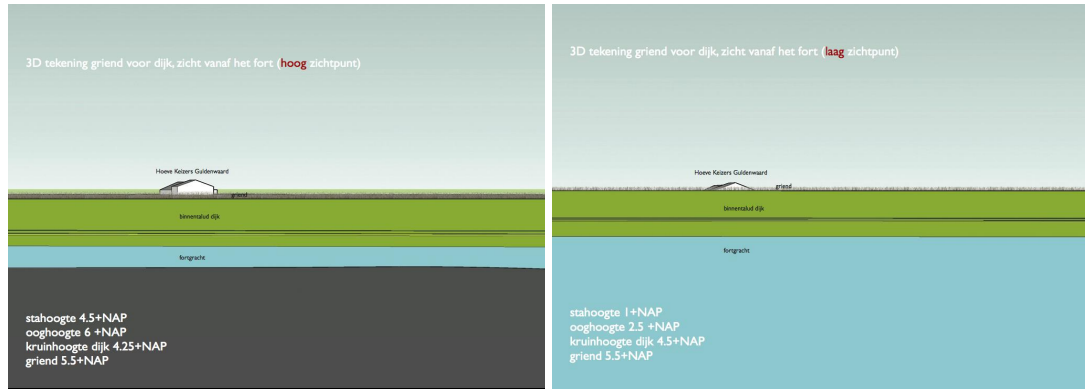
In het klassieke ontwerp is de dijk strak voorlangs de fortgracht getraceerd en heet een autonome vormgeving. Het flauwe talud aan de binnenzijde van de dijk vermindert het gevoel van een opgesloten zitten achter een hoge dijk. De hoogte van de dijk is fors, ongeveer een meter hoger dan de aansluitende dijken Bandijk en Steurgatdijk.

5.3.2 Voorkeurs ontwerp

De bouwstenen van de nieuwe ontwerpen (grienden, kades) sluiten aan bij nu al aanwezige structuren in de Noordwaard en kunnen het bestaande landschap verder versterken. Ook de recreatiewaarde van het gebied kan daardoor worden versterkt. De keuze van het voorkeursontwerp maakt een serie interessante en verrassende doorkijkjes mogelijk, vanaf een wandelpad op de dijk naar elementen in het buitengebied. De bewoners van het fort krijgen door een circa 0,5 - 1,0 m lagere kruinhoogte een beter zicht op landschap- en cultuurelementen die verder weg gelegen zijn in vergelijking met het klassieke ontwerp. Hun blik wordt door dit ontwerp als het ware ruimer. De griend en wandelaars zijn voor de bewoners van het fort beperkt zichtbaar. In Figuur 5.1 en 5.2 is het zicht vanaf verschillende zichtpunten uit het fort gevisualiseerd.



Figuur 5-1 Zicht vanaf het fort richting de Noordwaard voor de huidige situatie (boven) en de toekomstige situatie (onder, een impressie)



Figuur 5-2 Zicht vanaf het fort naar de nieuwe dijk voor een laag en een hoog zichtpunt bij twee verschillende kruinhoogtes

5.4 Beheer

5.4.1 Klassiek ontwerp

Het beheer en onderhoud van de nieuwe dijk is betrekkelijk eenvoudig. De nieuwe dijk valt onder het reguliere inspectieregime van het waterschap rivierenland en wordt "meegenomen" in het beheer van alle primaire waterkeringen van het waterschap.

Toegang tot de dijk is mogelijk via de berm waar een voldoende breed voetpad in asfalt op is geprojecteerd. Bovendien is het binnentalud dermate flauw (ca 1:16) dat een inspectieweg kan worden aangelegd onder de kruin zonder daar speciaal een berm voor te ontwerpen.

Om de erosiebestendigheid van de grasmat in stand te houden dient het grastalud regelmatig te worden gemaaid of te worden beweide. Naar verwachting zal de Noordwaard enkele keren per jaar doorstromen. Op de bekleding van de dijk zal zich waarschijnlijk een veeklaag afzetten die na droogval eventueel moet worden verwijderd. Mocht de veeklaag op de grasvegetatie terecht komen (bij hogere waterstanden) dan is dit niet anders dan in uiterwaarden. De grasmat ondervindt hier geen blijvende hinder van, maar dikke lagen moeten worden verwijderd.

5.4.2 Voorkeursontwerp

Het beheer van de griend heeft invloed op de golfremmende werking van het ontwerp (zie hoofdstuk 4).

Een volledig golfremmende griend is noodzakelijk om de waterkerende dijk langs de Nieuwe Merwede lager te kunnen maken. Dit houdt in dat aanleg van de griend op tijd moet starten. Voorlopig wordt geschat dat dit niet later dan 2013 moet aanvangen om in 2015, het jaar van de realisatie van het Noordwaard project, voldoende dichtheid in de plantage te realiseren.

Toegankelijkheid tot de grienden voor machines en voor efficiënte afvoer van biomassa moet worden gerealiseerd. In het voorkeursontwerp worden hierbij geen problemen verwacht omdat de griend tegen de dijk staat. Voor de griend aan de andere kant van de kreek dient een brug te worden gebouwd.

Omdat griend onlosmakelijk onderdeel uitmaakt van de waterkering zal het waterschap Rivierland de beheerstaken en onderhoud op zich nemen. Dit wordt verder uitgewerkt in een beheers- en onderhoudsplan

5.5 Veiligheid

5.5.1 Klassiek ontwerp

Het dijkontwerp is gebaseerd op standaardontwerpen volgens vigerende protocollen; de betrouwbaarheid van de dijk is daarmee gegarandeerd. Graslandbeheer kan de erosiebestendigheid van de dijk verder vergroten. Bij een gelijkmatige gesloten grasmat met hoge worteldichtheid kan de dijk langdurig golfaanval doorstaan mits golven niet veel hoger worden dan circa 75 centimeter. Bij flauwe taluds (1:5 of meer) wordt de weerstand groter. Het binnentalud van een grasdijk kan bij goed onderhoud minstens 10 liter per meter per seconde afstromend water doorstaan. Hiervoor is wel een erosiebestendige ondergrond van klei noodzakelijk. Het huidige zeer flauwe binnentalud zal zeker tegen een dergelijke overslag bestand zijn. Na inzaai op kale grond is de dijk na circa 3-5 jaar op sterkte (TAW, 1995).

5.5.2 Voorkeursontwerp

Modeltoepassing

In hoofdstuk 4 is aangetoond dat de model benadering op basis van resultaten uit experimenten voldoende betrouwbaar is om golfwerking op ware schaal te kunnen voorspellen. De Voorspelkracht kan nog verder worden vergroot door verdieping van proceskennis en het uitvoeren van metingen in veld of laboratorium (op ware schaal kan dat in de Deltagoot van Deltares).

Stabiliteit griend

De stabiliteit van de griend (=voortdurende aanwezigheid van voldoende biomassa) kan worden gegarandeerd door regelmatig onderhoud. Langs tropische kusten worden ook mangroves onder dit soort regelmatig voorkomende inundatie en golfwerking niet uitgerukt.

Obstructie van stroming en verleggen kreek Bevertstaart

De grienden in het ontwerp zijn voor het grootste deel gelokaliseerd buiten de voorziene hoofdstroom tijdens maatgevende condities. Het verwachte effect is daardoor gering. In een nadere analyse moet het effect van de buitendijkse grienden op het stroombeeld worden geanalyseerd, evenals het effect van een kleine verlegging van de kreek. Eventueel zijn compenserende maatregelen nodig (bijv. iets verdiepen van instroomopening en stroomgeul). Uitgangspunt in het ontwerp is dat er geen verhoging is van de waterstand bovenstreams, bij maatgevende condities.

5.6 Conclusie: vergelijking voorkeursontwerp met klassiek ontwerp

Het voorkeursontwerp onderscheidt zich op drie verschillende manieren van het klassieke ontwerp (zie paragraaf 3.4):

- 1) verlaagt en versmald dijkprofiel met een hoogte van 4,35 m +NAP (uitgaande van een reductie in golfhoogte van 80%, zie hoofdstuk 4)
- 2) griend langs de dijk
- 3) kade in combinatie met griend langs de dijk ten noorden van de Bandijk

In Tabel 5.1 is een vergelijking gemaakt tussen het klassieke ontwerp en de verschillende elementen in het voorkeursontwerp, op basis van kwalitatieve scores ten opzichte van huidig ontwerp:

- 2 = grote verslechtering
- 1 = kleine verslechtering
- 0 = geen verschil
- 1 = verbetering
- 2 = grote verbetering

Tabel 5-1 Vergelijking tussen de verschillende elementen in het voorkeursontwerp en het klassieke ontwerp

Ontwerp	Veiligheid/ Obstructie stroming	Kosten aanleg	Kosten beheer	Beheerders	Ecologische waarde	Landschap en wonen
Verlaagd en versmald dijkontwerp	0 geen obstructie	+1 minder hoge dijk en smaller talud	0	Waterschap	0	+2
Grienden langs de dijk	0	-1 extra: ophoging van platform en aanplant	-1 Gereduceerd onderhoud v.d. dijk Extra: Beheer griend	Waterschap	+2	+2 hoogte van griend beperken
Griend en kade ten noorden van Bandijk	0 ligt in luwte van bestaande dijk	-1	-1	Waterschap	+1	+1

Op basis van de vergelijking in Tabel 5.1 kan worden geconcludeerd dat met name de natuur- en landschapswaarden van het voorkeursontwerp groter zijn dan die van het klassieke ontwerp. Met betrekking tot de kosten en obstructie van de stroming leidt het voorkeursontwerp mogelijk tot een kleine verslechtering ten opzichte van het klassieke ontwerp. De gerealiseerde besparing op kosten van dijkaanleg en onderhoud is mogelijk voldoende compensatie voor de extra kosten van aanleg en beheer van de griend en de kade benoorden de Bandijk. Modelberekeningen kunnen aantonen of invloed op de stroming significant is in relatie tot de doelstelling van het Noordwaardproject.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Doelstelling / Aanleiding

In opdracht van het projectbureau Ontpoldering Noordwaard en WINN is een verkennende studie uitgevoerd met als doelen:

- Het globaal ontwerpen van een dijkprofiel rondom Fort Steurgat bij Werkendam dat door inzet van biobouwers natuurwaarde creëert, onderhoudsarm is, landschappelijk inpasbaar is en een lagere kruinhoogte nodig heeft in vergelijking met een klassiek ontwerp.
- Aantonen dat biobouwers in staat zijn om golfkrachten voor de dijk te reduceren, zodat lagere kruinhoogtes kunnen worden gerealiseerd.

6.2 Conclusies

Op basis van de uitgevoerde studie zijn de volgende conclusies getrokken:

- Bij een vegetatieveld van 100m kan met griend een golfreductie van 70%-90% worden behaald.
- Golfuitdoving door een kade levert een reductie van circa 40% in golfhoogte. In combinatie met vegetatie is dit een effectieve manier om golfaanval op de dijk te reduceren.
- Grienden en kades maken een lagere dijkhoogte mogelijk. Bij een reductie van 80% van de inkomende golfhoogte kan de kruinhoogte van de dijk met 65 centimeter worden gereduceerd worden tot 4,35 m +NAP (de vereiste waakhoogte).
- Uitgaande van een minimale reductie in golfhoogte van 80% is het voorkeursontwerp mogelijk als er voldoende breedte griend wordt geplant (circa 60 – 80 m) en de griend op een juiste manier beheerd wordt.
- Uit een vergelijking tussen het voorkeursontwerp en het klassieke ontwerp kan worden geconcludeerd dat de natuur- en landschapswaarde van het van het voorkeursontwerp groter is dan in het klassieke ontwerp.
- Met betrekking tot de kosten van beheer leidt het voorkeursontwerp mogelijk tot een kleine verslechtering ten opzichte van het klassieke ontwerp, afhankelijk van het netto resultaat van de combinatie van een wat minder massieve dijk met als extra kostenpost het op een platform aan te leggen griend.

Schetsen van het voorkeursontwerp zijn gepresenteerd in Figuur 3.5 en 3.6.

6.3 Aanbevelingen

Op basis van deze verkennende studie worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Onderzoek naar de in de praktijk gerealiseerde golfreducerende werking van griend door veldmetingen en experimenten om de resultaten van de uitgevoerde berekeningen te verifiëren. Dit kan:
 - Na aanleg van de griend voor Fort Steurgat. Biologische en fysische parameters kunnen nauwkeurig in het veld worden vastgesteld. Enkele keren per jaar overstroomt de griend. Tijdens verschillende storm-events kan de golfuitdoving uit verschillende windrichtingen worden gemeten. De condities waaronder gemeten kan worden zijn dan nog iets minder extreem dan de maatgevende situatie maar leveren zeer

- bruikbare informatie op. Op deze wijze kan ook inzicht worden verkregen in de effecten van griendbeheer op golfuitdoving.
- In de Deltagoot van Deltares, met vegetatie op ware schaal, onder ongeschaalde maatgevende condities.
 - Gedetailleerd 2D golfmodel onderzoek naar de golfaanval op de dijk rondom Fort Steurgat en het effect van het voorkeursontwerp om:
 - Een betere inschatting te krijgen van de te verwachten golfaanval op de dijk bij maatgevende situaties.
 - Het ontwerp verder te optimaliseren (breedte griend aanpassen, in relatie tot golfexpositie).
 - Het resultaat te gebruiken als input voor de toetsing van de waterkering
 - Vaststellen van de invloed van aan te leggen griend op stroming tijdens maatgevende afvoer en zonodig ontwerp optimaliseren, zodanig dat er geen effect is bij MHW.
 - Opstellen van gedetailleerd ontwerp en bestek van voorkeursontwerp om kosten en baten preciezer vast te stellen.
 - Opstellen van effectief beheerplan.

7 Referenties

Bureau Noordwaard, 2008, *Planstudie ontpoldering Noordwaard; dijkverleggingsplan*, Bureau Noordwaard, Rijkswaterstaat Zuid-Holland, 16 december 2008, 9R8354.A0

Lauren N. Augustin, Jennifer L. Irish, Patrick Lynett, 2008, Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation, *Coastal Engineering* (2008), doi10.1016/j.coastaleng.2008.09.004

Dalrymple, R.A., J.T. Kirby, and P.A. Hwang, 1984. Wave diffraction due to areas of energy dissipation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 10, 67-79.

Fernando J. Mendez and Inigo J. Losada, 2004, An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields, *Coastal Engineering* 51, pp. 103-118

Tomohiro Suzuki, Jasper Dijkstra and Marcel J.F. Stive, Wave dissipation on a vegetated salt marsh, ICCE conference paper, 2008

Vo Luong Hong Phuoc and Stanislaw R. Massel, 2006, Experiments on wave motion and suspended sediment concentration at Nang Hai, Can Gio Mangroven Forest, Southern Vietnam, *Oceanologia* 48, pp. 23-40, 2006

8 Bijlagen

Bepantingsmogelijkheden griend Noordwaard

Bepantingsmogelijkheden van perceel griend langs de dijk in de Noordwaard nabij Werkendam

In grote lijnen dient men een keuze te maken in welke vorm de griend geëxploiteerd gaat worden.

Men kan een keuze maken uit een traditionele griend met hogere en grotere stoven of een griend welke machinaal geëxploiteerd gaat worden.

Traditionele griend: (beplant met Salix alba)

Hierbij worden ca. 12.500 stuks stekken per ha geplant met een afstand van ca. 1,20 meter in de rij en een rijen afstand van ca. 80 cm.

De stekken worden geplant met een hoogte van ca. 50 cm boven het maaiveld.

Na enkele jaren zullen hier per stoof tot ca. 30 stuks takken groeien.

Het voordeel hiervan is dat men grotere en dus sterkere stoven krijgt, welke beter bestand zijn tegen eventueel drijvend vuil op de rivier en ijsgang, waarbij dat laatste misschien niet zo'n groot risico meer is. Daarnaast geeft een traditionele griend een grotere natuurwaarde aan plantengroei enz.

Het nadeel van de traditionele griend zijn met name de exploitatiekosten welke hoger zijn en een geringer bedrag aan restopbrengst product

Moderne griend (beplant met Salix alba/Salix viminalis of gemengd)

Hierbij worden ca. 42.000 stekken per ha geplant met een afstand van ca. 35 cm. in de rij en de rijen op een afstand van 70 cm.

De stekken worden geplant met een hoogte van ca. 5 cm. boven het maaiveld.

Na enkele jaren zullen hier per stoof tot ca. 10 stuks takken groeien.

Het voordeel hiervan is dat men machinaal kan oogsten en dat door de dichte plantafstand een mooier en rechter product groeit waarvoor een betere afzet kan worden gevonden en dat er door de dichte beplanting minder last is van onkruid.

Een overzicht aan beheerskosten en een beheersschema vind u op de bijlage.

Tentatieve kostenschatting aanleg en onderhoud griend, Van Schaik BV (prijspeil 2008)

Overzicht beheerskosten/ beheersschema traditionele en moderne griend.

Traditionele griend.(beplant met Salixalba)

Plantmateriaal 12.500 stuks à €0,50	€ 6.250,-
Plantkosten 12.500 stuks à €0,20	- 2.500,-
2 keer maaien/wieden 1 ^e groei-jaar à €250,-	- 500,-
Oogstkosten na 2 jaar 1.500 bos à €2,-	- 3.000,-
Uitrijden bossen naar de harde weg	- 300,-
Totaal aan kosten gedurende eerste twee jaar	€ 12.550,- (per ha.)

Kosten na twee jaar per oogst met een kapcyclus van twee jaar:

Enmalig maaien /wieden	€ 250,-
Oogstkosten 2.000 bos à €2,-	- 4.000,-
Uitrijden bossen naar de harde weg	- 400,-

Totaal aan kosten per 2 jaar aan onderhoud € 4.650,- (per ha.)

Moderne griend(beplant met Salix viminalis).

Plantmateriaal 42.000 stuks à €0,08	€ 3.360,-
Plantkosten 42.000 st.à €0,05	- 2.500,-
2 keer met rijenfrees opschonen 1 ^e groei-jaar à €200,-	- 400,-
Oogstkosten machinaal na 2 jaar 1.500 bos à €0,66	- 1.000,-
Uitrijden bossen naar de harde weg	- 300,-
	€ 7.560,-
Opbrengst product 1.500 bos à €0,40	-/- 600,-

Totaal aan kosten gedurende eerste twee jaar € 6.960,- (per ha.)

Kosten na twee jaar per oogst met een oogstcyclus van twee jaar:

Enmalig rijenfrees 1 ^e groei-jaar à €200,-	€ 200,-
Oogstkosten machinaal na 2 jaar 2.000 bos à €0,66	- 1.320,-
Uitrijden bossen naar de harde weg	- 400,-
	€ 1.920,-
Opbrengst product 2.000 bos à €0,40	-/- 800,-

Kosten per twee jaar aan onderhoud € 1.120,- (per ha.)

Implementation of wave dissipation in SWAN

Implementation of wave dissipation by vegetation into SWAN

SWAN version 40.55 is a current vegetation module in SWAN. We improved the current version, named it SWAN version 40.55MOD, and checked the performance.

SWAN version 40.55

Wave dissipation term in SWAN version 40.55 is described as follows.

$$S_{veg} = \langle \varepsilon_v \rangle = \int_0^T \int_0^\infty \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \tilde{C}_D b_v N \left(\frac{gk}{2\sigma} \right)^3 \frac{\sinh^3 k\alpha h + 3 \sinh k\alpha h}{3k \cosh^3 kh} E(\sigma, \theta) \sqrt{E(\sigma, \theta)} d\sigma d\theta \quad (1.1)$$

$S^n \cong \Phi^{n-1} E^n$ yields

$$\Phi^{n-1} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \tilde{C}_D b_v N \left(\frac{gk}{2\sigma} \right)^3 \frac{\sinh^3 k\alpha h + 3 \sinh k\alpha h}{3k \cosh^3 kh} \sqrt{E(\sigma, \theta)^{n-1}} \quad (1.2)$$

SWAN version 40.55MOD

The energy conservation equation is described as follows.

$$\frac{\partial E c_g}{\partial x} = -\varepsilon_v \quad (1.3)$$

where, E is wave energy, c_g is wave group velocity, ε_v is time-averaged rate of energy dissipation per unit horizontal area induced by vegetation.

The definition for ε_v is given by:

$$\varepsilon_v = \int_{-h}^{-h+\alpha h} F u dz \quad (1.4)$$

where, αh is vegetation height, F , the force acting on the vegetation per unit volume derived by Morison equation neglecting swaying motion and inertial force (Dalrymple et al., 1984), can be described as

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D b_v u |u| \quad (1.5)$$

where, C_D : drag coefficient, C_M ; inertia coefficient, b_v : diameter of cylinder, u : horizontal velocity due to wave motion. The solution of Eq (2.4) is

$$\varepsilon_v = \frac{2}{3\pi} \rho C_D b_v N \left(\frac{gk}{2\sigma} \right)^3 \frac{\sinh^3 k\alpha h + 3 \sinh k\alpha h}{3k \cosh^3 kh} H^3 \quad (1.6)$$

in which, b_v is plant stem diameter, N is number of plants per square meter.

According to Mendez and Losada (2004),

$$\langle \varepsilon_v \rangle = \frac{2}{3\pi} \rho \tilde{C}_D b_v N \left(\frac{gk}{2\sigma} \right)^3 \frac{\sinh^3 k\alpha h + 3 \sinh k\alpha h}{3k \cosh^3 kh} \frac{3\sqrt{\pi}}{4} H_{rms}^3 \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \left(\frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 c_g \right)}{\partial x} = - \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \rho C_D b_v N \left(\frac{gk}{2\sigma} \right)^3 \frac{\sinh^3 k\alpha h + 3 \sinh k\alpha h}{3k \cosh^3 kh} H_{rms}^3 \quad (1.8)$$

This equation was implemented into SWAN.

$$\frac{\partial \left(\frac{1}{8} H_{rms}^2 c_g \right)}{\partial x} = - \frac{1}{2g\sqrt{\pi}} \tilde{C}_D b_v N \left(\frac{gk}{2\sigma} \right)^3 \frac{\sinh^3 k\alpha h + 3 \sinh k\alpha h}{3k \cosh^3 kh} H_{rms}^3 \quad (1.9)$$

$$\text{where, } H_{rms} = 2\sqrt{2} \sqrt{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta df} \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \left(\int_0^\infty \int_0^{2\pi} E(f, \theta) c_g(f) d\theta df \right)}{\partial x} \\ &= - \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{8\sqrt{2}}{g\sqrt{\pi}} \tilde{C}_D b_v N \left(\frac{gk(f)}{2\sigma(f)} \right)^3 \frac{\sinh^3 k(f)\alpha h + 3 \sinh k(f)\alpha h}{3k \cosh^3 k(f)h} \sqrt{E(f, \theta)} E(f, \theta) d\theta df \end{aligned} \quad (1.11)$$

$$S_{veg} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{8\sqrt{2}}{g\sqrt{\pi}} \tilde{C}_D b_v N \left(\frac{gk(f)}{2\sigma(f)} \right)^3 \frac{\sinh^3 k(f)\alpha h + 3 \sinh k(f)\alpha h}{3k \cosh^3 k(f)h} \sqrt{E(f, \theta)} E(f, \theta) d\theta df \quad (1.12)$$

S_{veg} has to be solved implicit.

$$S^n \cong \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \Phi^{n-1} E(f, \theta)^n d\theta df \quad (1.13)$$

In this case:

$$\begin{aligned} \Phi^{n-1} &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{8\sqrt{2}}{g\sqrt{\pi}} \tilde{C}_D b_v N \left(\frac{gk(f)}{2\sigma(f)} \right)^3 \frac{\sinh^3 k(f)\alpha h + 3 \sinh k(f)\alpha h}{3k \cosh^3 k(f)h} \sqrt{E(f, \theta)} d\theta df \\ &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{8\sqrt{2}}{g\sqrt{\pi}} \tilde{C}_D b_v N \left(\frac{gk(f)}{2\sigma(f)} \right)^3 \frac{\sinh^3 k(f)\alpha h + 3 \sinh k(f)\alpha h}{3k \cosh^3 k(f)h} \sqrt{\sigma(f) N(f, \theta)^{n-1}} d\theta df \end{aligned} \quad (1.14)$$

where $E(\sigma, \theta)^n$ is the frequency-direction spectrum in the current iteration level and $E(\sigma, \theta)^{n-1}$ is the frequency-direction spectrum in the previous iteration level.

Verification of the model

Comparison with the theoretical model of Mendez and Losada (2004)

Calculation results of SWAN 40.55 and SWAN 40.55MOD were compared with a theoretical model of Mendez and Losada (2004).

Mendez and Losada (2004) give equations for wave dissipation as below.

$$H_{rms} = \frac{H_{rms,o}}{1 + \tilde{\beta}x} \quad (1.15)$$

where

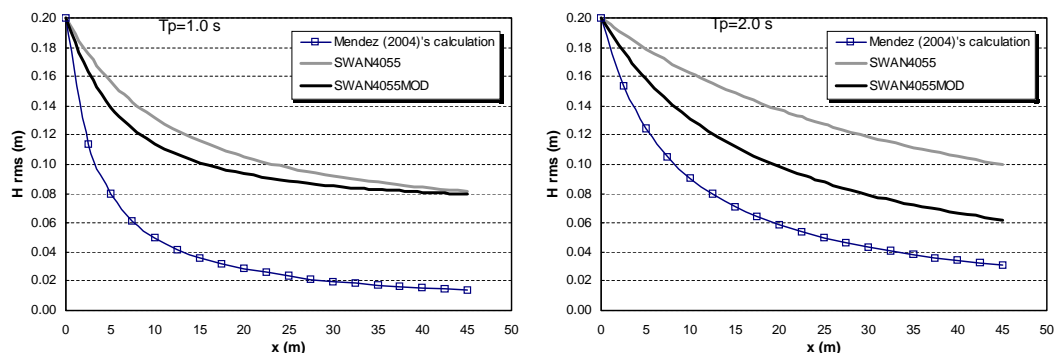
$$\tilde{\beta} = \frac{B_o H_{rms,o}}{2} = \frac{1}{3\sqrt{\pi}} C_D b_v N H H_{rms,o} k \times \frac{\sinh^3 kah + 3 \sinh kah}{(\sinh 2kh + 2kh) \sinh kh} \quad (1.16)$$

By using this theoretical wave dissipation model, we evaluated the SWAN models for the following conditions:

x=45 m
Hrms=20 cm
Tp=1.0 – 10.0 s (total 6 cases)
Cd=1.0

Figure C.1 shows wave height reduction by different wave period for each model. It can be observed that SWAN40.55MOD shows closer result to Mendez and Losada (2004) than SWAN40.55. Furthermore, the results of SWAN 40.55 MOD become closer when the period is big. When the period become Tp=10.0 s, the trend of the both results is almost the same. The reason that there are some gaps between the theoretical model of Mendez and Losada (2004) and the calculation result of SWAN 40.55 MOD would be the differences of how to deal frequency domain factors. Mendez and Losada (2004) use monochromatic wave period. On the other hand, the SWAN 40.55 MOD uses spectrum in the frequency domain.

From these results, we can conclude that SWAN 40.55MOD can get closer result with Mendez and Losada (2004).



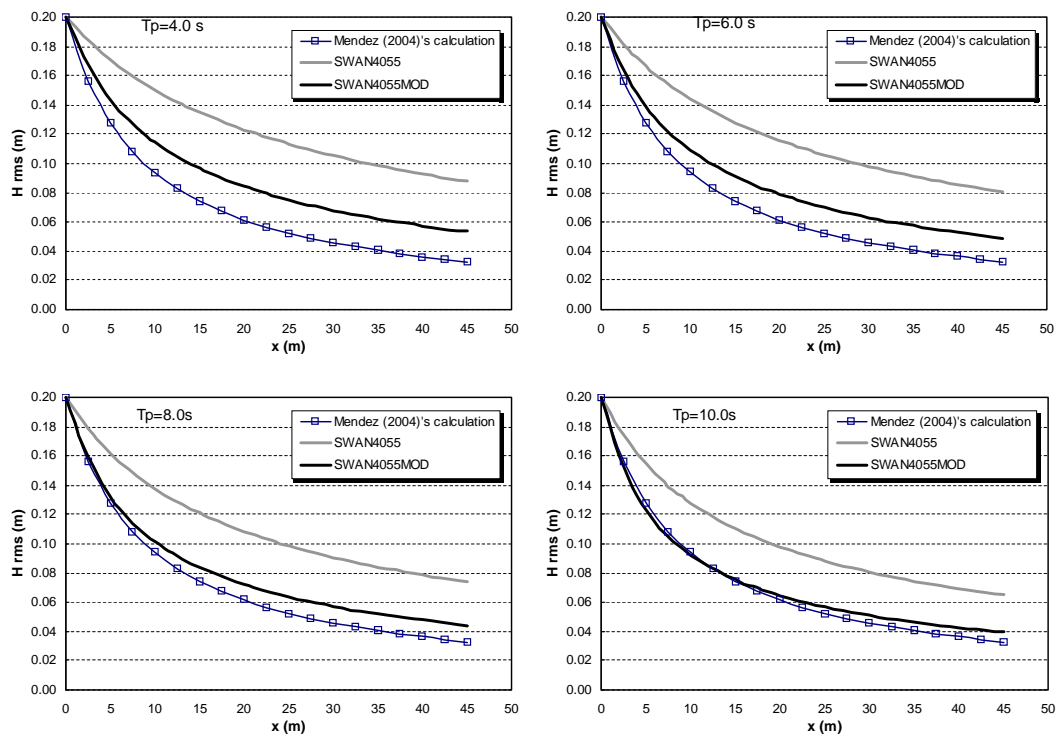


Figure C.1 Wave height by Mendez (2004) and SWAN

Comparison with the experimental result of Suzuki et al. (2008)

Calculation result of SWAN 40.55MOD was compared with experimental result of Suzuki et al (2008). In Figure C.2 the model setup of these experiments is indicated. The calculation conditions are as follows:

- Significant wave height: 0.10 m (Irregular wave)
- Wave period: 1.6 s
- Drag coefficient: 1.0

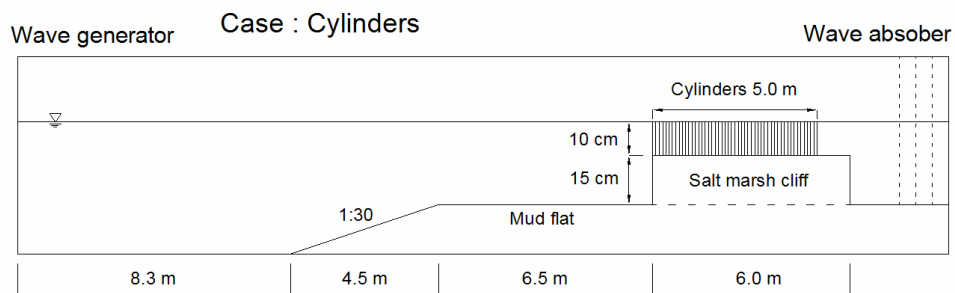


Figure C.2 Experimental setup of Suzuki et al. (2008)

Figure C.3 shows measured and modelled wave heights in the area of the salt marsh cliff. As shown in Figure C.3, SWAN40.55MOD shows good agreement with experimental results, although wave height around the cliff is not so accurate. This is because of the reflection which is not well covered in this model. From this result, we can conclude that SWAN 40.55MOD is capable to reproduce wave dissipation due to cylinders.

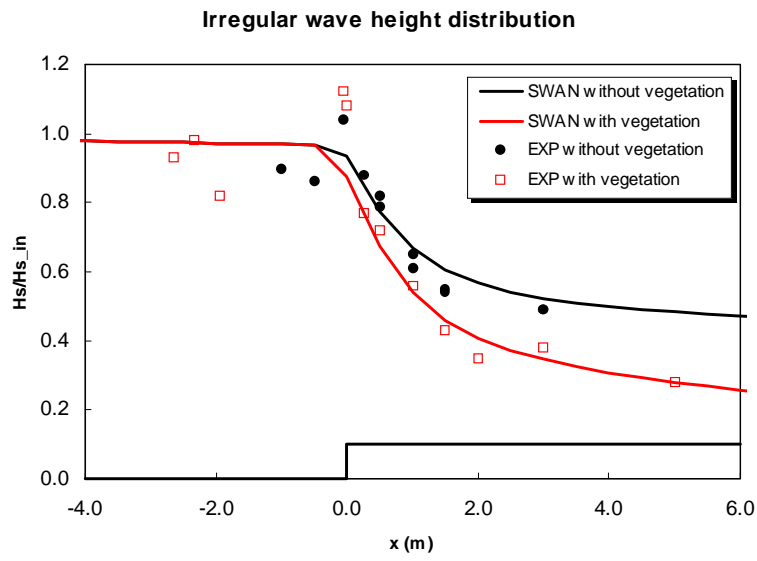


Figure C.3 Wave height (experimental result vs. calculation result)