

**Gebruik van vegetatie ten
behoefte van reductie
golfoverslag bij dijken**

KPP-2016 Versterking Onderzoek Waterveiligheid



Gebruik van vegetatie ten behoeve van reductie golfoverslag bij dijken

KPP-2016 Versterking Onderzoek Waterveiligheid (VOW)

M. Klein Breteler
P. van Steeg
R.A. Camarena Calderon

1230042-004

Titel

Gebruik van vegetatie ten behoeve van reductie golfoverslag bij dijken

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL	1230042-004	1230042-004-ZWS-0007	36

Trefwoorden

Vegetatie, golfoverslag, golfoploop, voorland, invloedsfactor ruwheid

Samenvatting

In het kader van het KPP-onderzoek "Versterking Onderzoek Waterveiligheid" is een oriënterende bureaustudie uitgevoerd naar de mogelijkheden om met behulp van vegetatie de hoeveelheid golfoverslag over dijken te verminderen wat kan leiden tot een lagere benodigde kruinhoogte. Het voorliggende rapport is een verslag van deze verkenning.

Inhoudelijk valt er onderscheid te maken in de plaatsing van vegetatie ten opzichte van een dijklichaam:

- Vegetatie vóór de dijk. Dit reduceert de golfbelasting bij de teen van de dijk
- Vegetatie op de dijk: Dit reduceert de hoeveelheid water dat over de kruin heen slaat.

Deze twee opties om vegetatie in te zetten voor het verhogen van de waterveiligheid zijn in dit rapport nader uitgewerkt.

Uit deze studie blijkt dat vegetatie op of voor de dijk mogelijk kan leiden tot enkele decimeters kruinverlaging waardoor dit vanuit waterbouwkundig oogpunt een aantrekkelijk alternatief kan zijn. Ook vanuit ecologisch en recreatief oogpunt kan dit een aantrekkelijk alternatief zijn.

Echter, er zijn nog kennisleemtes over deze toepassing waardoor vegetatie als onderdeel van het waterkerende systeem nog niet veel wordt toegepast. Deze kennisleemtes worden in dit rapport geïdentificeerd.

Referenties

KPP-2016 project "Versterking Onderzoek Waterveiligheid" (VOW)
 Contactpersoon bij RWS-WVL: Marike Olieman

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	juli 2016	M. Klein Breteler		J. Dijkstra		K.J. Bos	
2	nov. 2016	P. van Steeg		M. de Vries		Dr. M.R.A. van Gent	
3	nov. 2016	P. van Steeg		M. de Vries		Dr. M.R.A. van Gent	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel van dit rapport	1
1.3	Toelichting: golfoverslag bij dijken	1
1.4	Gebruik van vegetatie	2
2	Vegetatie vóór de dijk	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Projectervaring en onderzoekskennis	5
2.2.1	Uitgevoerd onderzoek	5
2.2.2	Opgedane projectervaring	6
2.2.3	Huidige projecten en onderzoeksprogramma's	7
2.3	Effectiviteit	8
2.4	Zout en zoet water	9
3	Vegetatie op de dijk in de golfoploopzone	11
3.1	Inleiding	11
3.2	Projectervaring en onderzoekskennis	11
3.2.1	Uitgevoerd onderzoek	11
3.2.2	Opgedane projectervaring	12
3.2.3	Huidige projecten en onderzoeksprogramma's	12
3.3	Effectiviteit	12
3.4	Zout en zoet water	12
4	Eisen met betrekking tot vegetatie	13
4.1	Wettelijke eisen	13
4.2	Eisen vanuit de primaire functie	15
4.3	Eisen vanuit de secundaire functie	15
4.4	Aspecteisen	16
5	Vegetatiesoorten	17
6	Mogelijk effect van vegetatie op benodigde kruinhoogte	23
6.1	Vegetatie vóór de dijk	23
6.1.1	Inleiding	23
6.1.2	Oriënterende berekening	23
6.1.3	Berekening met SWAN-VEG	25
6.2	Vegetatie op de dijk in de golfoploopzone	28
6.3	Synthese	30
7	Conclusies: kennisvragen en hoe deze op te pakken	31
7.1	Kennisvragen	31
7.2	Hoe kunnen de kennisvragen worden opgepakt?	32
8	Literatuur	35

Bijlage(n)

A Wave dissipation by vegetation at the foreshore of a dike	A-1
A.1 Introduction	A-1
A.2 Methology	A-1
A.3 Wave conditions behind the forest	A-2
A.4 Required crest height	A-7
A.5 Conclusions	A-12
B Influence of wave conditions on required crest height	B-1
C Projectvoorstel kwantificeren effect vegetatie in golfoploopzone	C-1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In het kader van het KPP-onderzoek "Versterking Onderzoek Waterveiligheid" is een oriënterende bureaustudie uitgevoerd naar de mogelijkheden om met vegetatie de hoeveelheid golfoverslag over dijken te verminderen wat kan leiden tot een lagere benodigde kruinhoogte. Het voorliggende rapport is een verslag van deze verkenning.

1.2 Doel van dit rapport

Het doel van dit rapport is om een oriënterende verkenning uit te voeren naar potentiële oplossingsrichtingen om golfoverslag te verminderen waarbij vegetatie wordt ingezet. Door deze verkenning worden barrières geïdentificeerd welke een eventuele implementatie verhinderen en wordt aangegeven wat er nodig is om deze barrières weg te kunnen nemen.

1.3 Toelichting: golfoverslag bij dijken

Golfoverslag kan leiden tot schade aan het binnentalud en uiteindelijk leiden tot het falen van de dijk. Een impressie van golfoverslag en het falen van een dijk als gevolg van golfoverslag is weergegeven in Figuur 1.1.



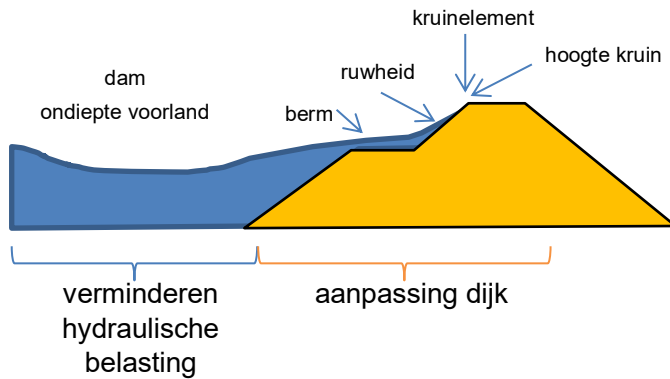
Figuur 1.1 Impressie van golfoverslag (foto: Zitscher, ontleend aan de Eurotop Manual)

Het verminderen van de golfoverslag is belangrijk voor dijken met een te lage kruin waarbij golfoverslag de bepalende factor is. Het verhogen van de dijk brengt ook met zich mee dat de dijk breder moet worden, hetgeen hoge kosten met zich mee kan brengen door grondonteigening, verleggen van kabels en leidingen en het verleggen van een weg en teensloot en wellicht zelfs het slopen van huizen. Naast de hoge kosten kan er ook een maatschappelijke weerstand door ontstaan.

Er zijn verschillende manieren om golfoverslag te reduceren. Globaal gesteld kan dit worden gedaan door:

1. Verminderen hydraulische belasting (lagere of kortere golven)
 - a. plaatsen van een dam of andere obstakels voor de dijk
 - b. verhoging van het voorland voor de dijk
2. Aanpassing dijk
 - a. verflauwen van het buitentalud
 - b. aanbrengen van ruwheid op het buitentalud
 - c. aanbrengen van bermen op het buitentalud

- d. het verhogen van de kruin
- e. het aanbrengen van kruinelementen zoals een muur



Figuur 1.2 Schematische weergave van generieke oplossingsrichtingen om golfoverslag te verminderen

De hydraulische belasting voor de dijk kan worden verlaagd door de golfkrachten te verminderen wat leidt tot lagere golven. Dit kan worden gerealiseerd door golven te laten breken op het voorland of door dammen of andere obstakels aan te leggen.

Het aanpassen van de dijk zelf kan op verschillende manieren. De basisgedachte hierbij is dat er zoveel mogelijk energie uit het water wordt onttrokken wat leidt tot minder golfoverslag. In Figuur 1.3 zijn twee voorbeelden gegeven van aanpassingen aan een dijk welke leiden tot minder golfoverslag.



Figuur 1.3 Voorbeeld van aangebrachte ruwheid op het talud (links, foto: Schüttrumpf) en dijk met verticale kruinmuur (rechts, foto: Hofstede)

1.4 Gebruik van vegetatie

Kan vegetatie worden toegepast om golfoverslag te verminderen? Om deze vraag te beantwoorden wordt de in Paragraaf 1.3 gegeven indeling gehanteerd en een analogie gemaakt met vegetatie. Deze analogie is weergegeven in Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Analogie vegetatie met generieke oplossingsrichtingen

Verlagen hydraulische belasting	Analogie met vegetatie?
plaatsen van een dam of andere obstakels voor de dijk	ja
verhoging van het voorland voor de dijk	ja
Aanpassen dijk	
verflauwen van het buitentalud	nee
aanbrengen van ruwheid op het buitentalud	ja
aanbrengen van bermen op het buitentalud	nee
het verhogen van de kruin	nee
het aanbrengen van kruinelementen zoals een muur	nee

Zoals in Tabel 1.1 valt te zien zijn er drie mogelijkheden waarbij vegetatie kan worden toegepast teneinde golfoverslag over een dijk te reduceren. Deze worden hieronder kort besproken:

Analogie vegetatie en 'plaatsen van een dam of andere obstakels voor de dijk'

Vegetatie op het voorland voor de dijk (uiterwaarden, schor/kwelder) kan een golfhoogte reducerend effect hebben omdat de golven moeite hebben om door de vegetatie heen te komen. De stammen, takken, twijgjes en/of blaadjes belemmeren de waterbeweging onder de golven en dragen bij aan reflectie van de golf of tot het opwekken van turbulentie die de golfenergie reduceert. Opgemerkt dient te worden dat ook vegetatie welke relatief ver voor de dijk ligt onder deze noemer vallen (bijvoorbeeld Mangrovebossen). Dit ligt echter buiten het kader van dit rapport.

Analogie vegetatie en verhoging voorland

Bij een verhoogd voorland zullen golven breken als gevolg van ondiepte. Door dit brekingsproces is de golfbelasting bij de teen van de dijk lager. Doorgaans bestaat het voorland uit zand met klei en is de standzekerheid van dit voorland bij de ontwerpcondities onzeker doordat dit voorland weg kan spoelen. Vegetatie kan dit voorland stabiliseren (dit is bekend bij kwelders en rietvegetatie). Dit is onder andere beschreven in het proefschrift van Hu (2015). Er wordt benadrukt dat de vegetatie in dit geval dus een indirecte werking heeft, de werkelijke golfreductie wordt veroorzaakt door de ondiepte van het voorland. (Uiteraard kan de aanwezigheid van de vegetatie zelf ook leiden tot een golfhoogtereductie). Hoewel dit een mogelijke optie is om vegetatie toe te passen wordt deze optie in dit rapport niet verder uitgewerkt. Wel wordt het vraagstuk onder andere opgepakt in het project POV Wadden, onderdeel 'Voorlanden'.

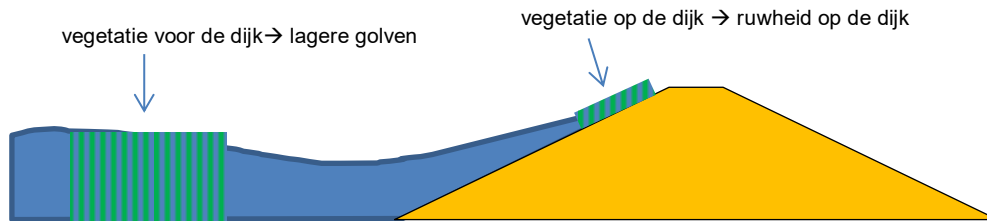
Analogie vegetatie en 'aanbrengen van ruwheid op het buitentalud'

Het is wellicht mogelijk om vegetatie op het buitentalud aan te brengen en daarmee ruwheid te creëren. Deze ruwheid leidt tot minder golfoverslag.

Door middel van de bovenstaande analyse blijven er twee opties over welke in dit rapport worden beschouwd:

1. Vegetatie voor de dijk, voornamelijk voor het reduceren van de golfhoogte voordat de golven de dijk bereiken
2. Vegetatie op de dijk in de golfploopzone, die de golfploophoogte en golfoverslag reduceert.

De twee genoemde opties zijn schematisch weergegeven in Figuur 1.4.



Figuur 1.4 Schematische weergaven van de twee oplossingsrichtingen met vegetatie teneinde golfoverslag te beperken.

Hoewel de focus van dit rapport ligt op het verlagen van de hoeveelheid golfoverslag wordt tevens opgemerkt dat vegetatie voor de dijk de golfbelasting op de dijk reduceert en daardoor als bijkomend voordeel heeft dat de bekleding minder zwaar wordt aangevallen. Dat kan in sommige gevallen betekenen dat een grasbekleding (in plaats van een asfaltbekleding of steenbekleding) toereikend is en er geen harde bekleding hoeft te worden aangelegd. Dat heeft vele voordelen, zoals mogelijk lagere kosten en hogere LNC waarden.

2 Vegetatie vóór de dijk

2.1 Inleiding

Vegetatie voor de dijk kan potentieel golven reduceren waardoor de golfbelasting bij de teen lager is dan een situatie waarbij de vegetatie niet is toegepast. Dit leidt tot een minder zware belasting op de bekleding op het buitentalud en tot een lager golfoverslagdebiet. Dit laatste heeft invloed op de benodigde kruinhoogte.

Het reduceren van golven voor de dijk is niet nieuw. Vaak ligt er voor de dijk een voorland waardoor de golven breken. In sommige gevallen ligt er ook een dam voor de dijk waardoor de golfbelasting significant wordt gereduceerd.

Een voorbeeld van mogelijke vegetatie is weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Voorbeeld van mogelijke vegetatie op het voorland voor de dijk

2.2 Projectervaring en kennis uit onderzoek

2.2.1 Uitgevoerd onderzoek

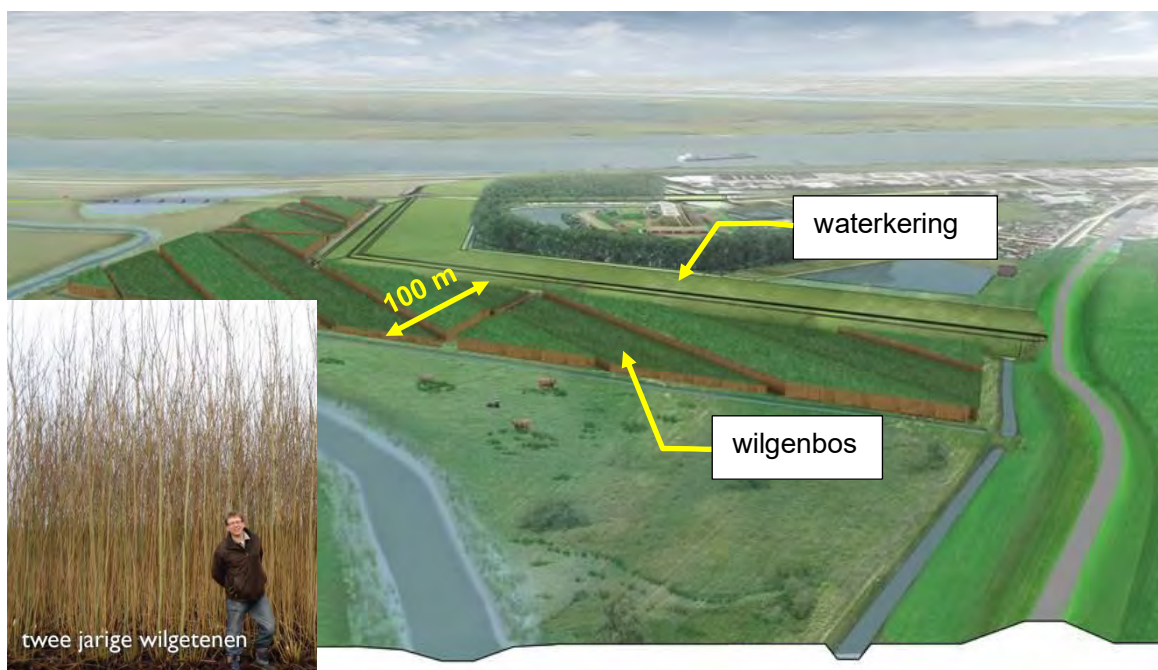
In het verleden is met wisselend succes onderzoek uitgevoerd met betrekking tot golfhoogtereductie door vegetatie (zie literatuurlijst op pagina 35). De voornaamste onderzoeksvraag daarbij was hoeveel golfreductie de vegetatie bewerkstelligd. Men heeft voornamelijk onderzoek gedaan in het veld, waar de omstandigheden vaak moeilijk zijn om concrete conclusies te trekken. Zo was bij het veldonderzoek van Iris Möller (Universiteit van Cambridge, Möller et al, 2006) bijvoorbeeld de lengte waarover de golven zich voortplanten door de vegetatie relatief kort en was de bodem zo oneffen dat conclusies trekken moeilijk was. Bij metingen bij de Hellegatspolder (Vuik et al. 2016) naar het effect van schorvegetatie waren de golven helaas zo klein (20 à 40 cm) dat de toepasbaarheid van de conclusies beperkt is.

Deze problemen waren niet aanwezig bij het onderzoek dat uitgevoerd is in GWK Hannover (Möller et al. 2014a), waar het effect van schorvegetatie op de golfhoogtereductie is onderzocht. De vegetatie was eerst 30 cm hoog en later slechts 5 cm, maar desondanks werd er een duidelijk meetbaar effect vastgesteld.

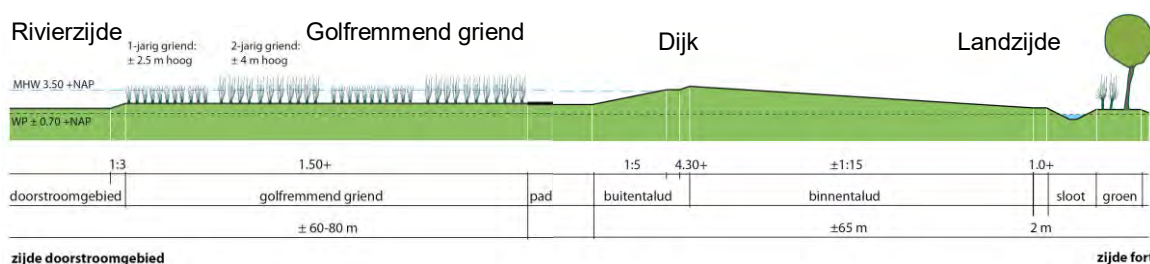
2.2.2 Opgedane projectervaring

Uiterwaard vegetatie is een natuurlijk fenomeen in ons rivierengebied. Een gedeelte van deze vegetatie wordt al eeuwen voor menselijk gebruik benut en in stand gehouden. Hiernaast is een ontwerp geïmplementeerd waarin vegetatie een rol speelt in het behalen van de veiligheidsnorm.

- Tiel - Waardenburg: In dit gebied treffen we wilgengrienden en meidoorn hagen aan. Hiernaast hier en daar ruigtes en volgroeide wilgenbossen. Deze natuurlijk voorkomende vegetatie wordt beheerd door terreinheerders zoals Gelders Landschap. In de huidige beoordelingsmethodiek wordt de invloed van de vegetatie op de golfcondities nog niet in rekening gebracht. Wel is in een verkennende studie (De Vries et al, 2015) onderzocht in hoeverre dit invloed kan hebben op de golfbelasting op de dijk. Op diverse trajecten langs dit traject lijkt de golfreductie veelbelovend. Dit is verder onderzocht in een meer gedetailleerde studie.
- Fort Steurgat (Noordwaard): Hier is een wilgenbos van 100 x 1000 m aangelegd, waarmee voorkomen kon worden dat er een harde bekleding op de dijk moest worden aangelegd en de kruin lager kon blijven, zie Figuur 2.2 en Figuur 2.3. (De Vries et al, 2009). Dit project is opgeleverd in 2015. Deze hybride primaire kering is tot nu toe uniek in zijn soort.
- In Verheij en Sprengers (2012) zijn locaties in het Nederlandse deel van het rivierengebied geïdentificeerd waar al vegetatie buitendijks aanwezig is en waar hoge significante golfhoogtes bij maatgevende condities worden verwacht. Tegelijkertijd is beoordeeld of deze vegetatie mogelijk zou moeten worden verwijderd in het kader van de stroomlijning van de rivier. Conclusie uit deze studie was dat vegetatie op uiterwaarden mogelijk kan bijdragen aan een significante golfhoogtevermindering bij de teen van de dijk.
- De in de afgelopen jaren ontwikkelde, op stochastiek gebaseerde, methodiek van normering en het bijbehorende toetsinstrumentarium heeft voor vrijwel alle locaties in Nederland geleid tot andere maatgevende hydraulische randvoorwaarden (voornamelijk uitgedrukt in de combinatie van golfhoogte en waterstand). Hierdoor is het goed mogelijk dat de potentiële locaties waar vegetatie in uiterwaarden een bijdrage leveren aan de reductie van de hydraulische belastingen is gewijzigd.



Figuur 2.2 Een 100 m breed wilgenbos bij Fort Steurgat voor de waterkering (Noordwaard).



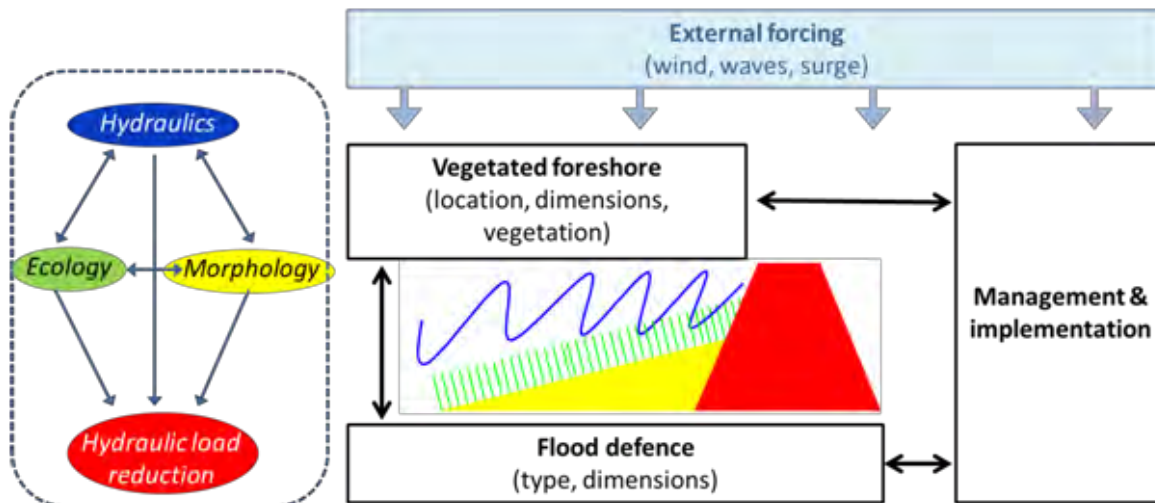
Figuur 2.3 Dwarsprofiel van waterkering bij Fort Steurgat (Noordwaard) (Klijn e.a. 2015)

2.2.3 Huidige projecten en onderzoeksprogramma's

Er worden momenteel diverse projecten uitgevoerd betreffende vegetatie op het voorland, zoals:

- NWO-project BE-SAFE (2014-2017) (partners: Deltares, NIOZ, TUDelft, Utwente en HKV; zie Vuik e.a. (2016))
Dit onderzoeksproject richt zich op het dynamisch gedrag en ontwikkeling van vegetatie op voorlanden als functie van de tijd. Hierbij wordt ook gekeken naar de relatie met het onderhoud. Het doel is nieuwe methodes te ontwikkelen om te beoordelen in welke mate de vegetatie bij kan dragen aan het reduceren van het overstromingsrisico, zie Figuur 2.4. In dit kader zijn er metingen uitgevoerd langs de Westerschelde (Hellegatpolder), met als doel om de golfhoogtereductie door schorvegetatie te kwantificeren en te vergelijken met Xbeach-berekeningen.
- EU-project FAST (Foreshore Assessment using Space Technology; coördinator: Deltares; partners: universiteit van Cambridge, Geocomar, NIOZ, universiteit van Cádiz)
In dit project worden op basis van satellietbeelden de biomassa en vegetatiesoorten geïdentificeerd en de relatie gelegd naar de golfhoogtereductie over voorlanden en benodigde kruinhoogte door toepassing van Xbeach-berekeningen

- Deelprojecten in Ecoshape en Building with Nature, waarin onder andere bij de Houtribdijk ervaring wordt opgedaan met de aanleg van een hybride kering, en de invloed van ontwerp op erosie, en de relatie tussen de aangebrachte toplaag en vestiging van de vegetatie.



Figuur 2.4 Stroomschema van project BE-SAFE (2014-2017)

In het kader van POV-Waddenzeedijken is er een project (effectiviteit voorlanden HR) gestart waarbij het effect van mogelijk vegetatie langs de Waddenzee wordt bestudeerd. Ook in de POV Voorlanden worden verschillende vraagstukken opgepakt met betrekking tot het al dan niet in rekening brengen van de aanwezigheid van voorlanden.



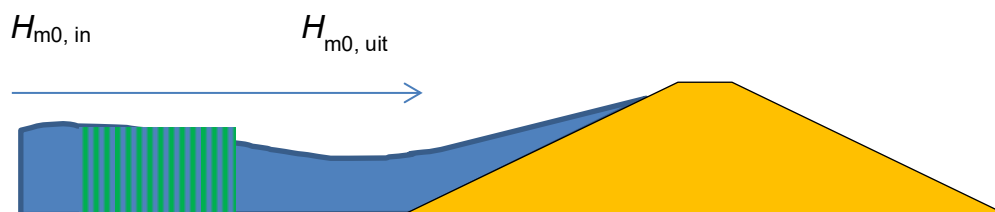
Figuur 2.5 Verhoogd voorland met vegetatie op Waddenzeedijk (uit plan voor POV-Waddenzeedijken)

2.3 Effectiviteit

Het effect van vegetatie op het voorland, in termen van golfreducerend vermogen, is afhankelijk van vele aspecten, zoals:

- de lengte waarover de golven door/over de vegetatie zich voort moeten planten alvorens bij de dijk aan te komen
- de hoogte van de vegetatie
- dichtheid van de vegetatie: hoeveelheid biomassa per vierkante meter
- dikte en stijfheid van de vegetatie
- golfcondities (golfhoogte en periode)
- waterstand

De effectiviteit wordt doorgaans uitgedrukt in het golfreducerende vermogen: hoeveel is de golfhoogte (H_{m0}) afgenomen als gevolg van de aanwezigheid van de vegetatie? Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.6. Vervolgens kan de vermindering in golfhoogte worden vertaald naar een verlaging van de benodigde kruinhoogte (gegeven een toegestaan golfoverslagdebiet).



Figuur 2.6 Schematische weergave van het golfreducerende vermogen van vegetatie voor de dijk

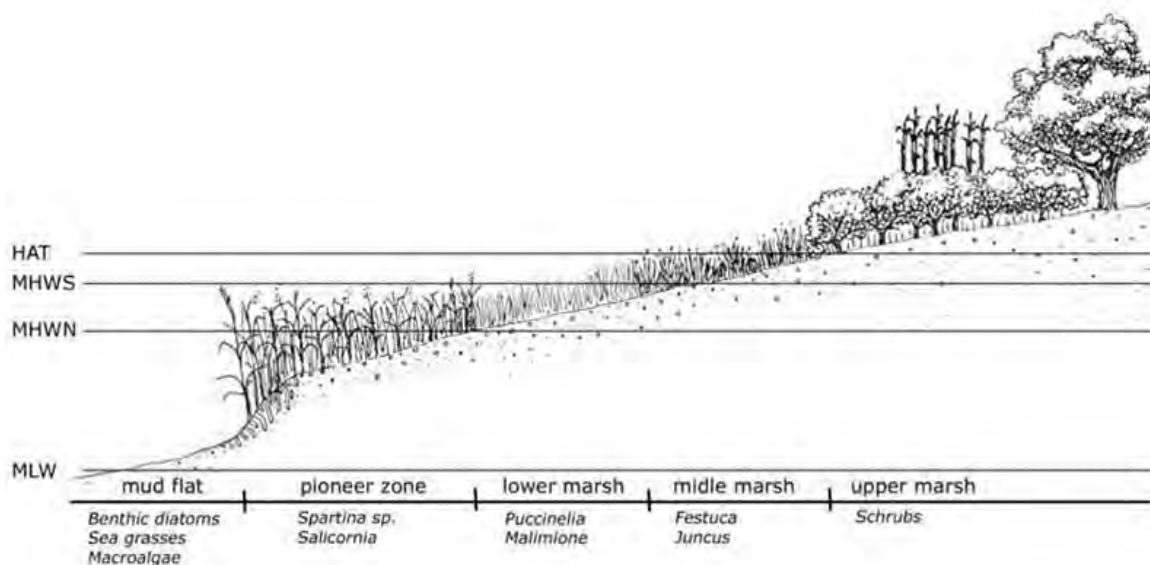
De effectiviteit van de vegetatie is gekwantificeerd in Paragraaf 6.1.

2.4 Zout en zoet water

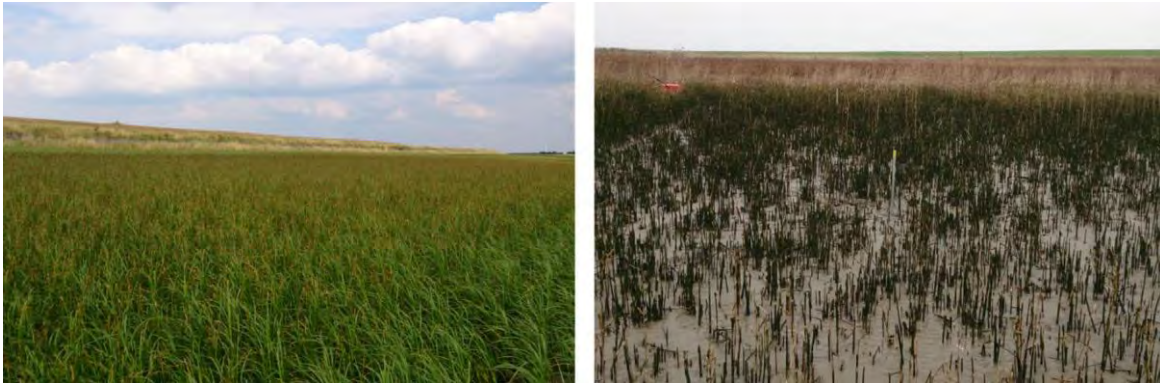
De afwezigheid of aanwezigheid van zout water is van groot belang voor de soorten die men aantreft op de voorlanden. Voorlanden langs de rivieren hebben een zoet milieu en liggen een groot deel van het jaar boven water. Langs de (grote) meren treffen we in deze zoete omstandigheden veel riet-achtige plantengemeenschappen aan. Ook langs de kust komen hoge voorlanden (ruim boven GHW) voor die een enigszins zoet milieu hebben omdat er zelden zout water op komt, zoals het voorland bij Ferwerd in Friesland. Dit zoete milieu is een gevolg van neerslag en er kunnen afhankelijk van nadere milieufactoren vele soorten kruiden, riet, struweel en bomen groeien, zie Figuur 2.7.

Onder GHW langs de zoute wateren is er een volledig zout milieu dat bepalend is voor de daar mogelijk voorkomende plantensoorten. In deze zone zijn vooral kruiden voor en is struweel en bos afwezig:

- Zeekraal (circa 10 cm hoog, niet-aaneengesloten groeiend) in de laag intertidale zone (tussen NAP en GHW). Dit trekt zich vrijwel geheel terug in de winter.
- Spartina (Slijkgras) in de intertidale zone (GLW-GHW). Dit wordt 40-60 cm hoog en raakt in de winter een deel van het blad kwijt, zie Figuur 2.8.
- Zeemelde (10 – 20 cm hoog) en Zeekweek (lijkt op gras en is circa 40 cm hoog) in de hogere intertidale zone.



Figuur 2.7 Zonering van de vegetatie op het voorland bij zoute wateren (MLW = gemiddeld laagwater; HAT = hoogste astronomische getij)



Figuur 2.8 Spartina langs de Westerschelde in de zomer (links) en de winter (rechts) (Vuik et al 2016)

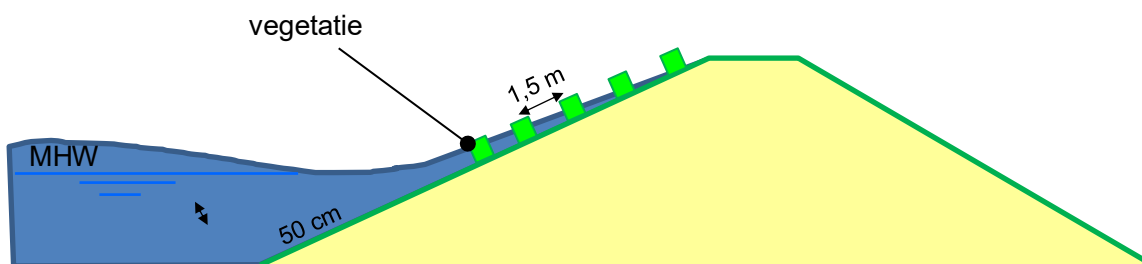
3 Vegetatie op de dijk in de golfploopzone

3.1 Inleiding

Vegetatie op de dijk leidt tot een ruwheid op de dijk. De aanwezigheid van ruwheid in de golfploopzone leidt tot een lager golfoverslagdebiet. Hierdoor is het potentieel mogelijk om de hoogte van de kruin te verlagen.

Het aanbrengen van ruwheid op dijkbekledingen wordt vaak toegepast. Vaak zijn dit harde bekledingselementen zoals steenzettingen of breuksteen.

De vegetatie dient in de golfploopzone geplaatst te worden. Aangezien de golfplooptong een dikte heeft van circa 10 a 50 cm dient de vegetatie niet hoger te zijn dan circa 50 cm. Een schematische weergave van vegetatie op de dijk is weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Schematische weergave van vegetatie op de dijk

3.2 Projectervaring en onderzoekskennis

3.2.1 Uitgevoerd onderzoek

Voor zover bekend is er nauwelijks onderzoek uitgevoerd met betrekking tot vegetatie in de golfploopzone.

Er zijn onderzoeken bekend met betrekking tot de weerstand van vegetatie bij langsstroming in rivieren maar de overeenkomsten tussen een stationaire stroming bij rivieren en een pulserende stroming bij golfploop zijn zo gering dat niet valt te verwachten dat dit een relevante bijdrage zal leveren aan de kennis met betrekking tot de effectiviteit van de vegetatie.

Er kan een voorzichtige analogie worden getrokken met de golfploopremmende werking van gras in de golfploopzone. Bij het ontwerpen en toetsen van dijken dient men aan te nemen dat gras geen ruwheid heeft en de golfploopzone dus als 'glad' beschouwd dient te worden. Een uitzondering mag worden gemaakt bij zeer kleine golven ($H_s < 0.75$ m). In dat geval mag een ruwheid in rekening worden gebracht wat rekenkundig zal leiden tot een lager golfoverslagdebiet (TAW, 1997).

Er zijn verschillende onderzoeken uitgevoerd naar de effectiviteit van verschillende 'harde' materialen zoals breuksteen, steenzettingen en betonnen ruwheidselementen. Doorgaans wordt de effectiviteit uitgedrukt in een 'invloedsfactor voor ruwheid' met symbool γ_f . Bij een

volledig glad talud is de waarde van deze invloedsfactor gelijk aan 1,0. Indien er enige ruwheid is, is de waarde lager dan 1,0. De invloedsfactor voor ruwheid wordt gebruikt in de bestaande modellen welke de hoeveelheid golfoverslag bepalen. Deze modellen zijn uitvoerig beschreven in Eurotop (2007).

3.2.2 Opgedane projectervaring

Er is veel ervaring met gras als dijkbekleding. Deze ervaring is onder andere vastgelegd in de Handreiking Grasbekledingen. Deze handreiking beschrijft de verschillende aspecten van gras als dijkbekleding zoals het beheer en onderhoud, de mogelijke faalmechanismes, de sterktemodellen et cetera.

Voor zover bekend is er geen ervaring met andere vegetatie dan gras op dijkbekledingen.

3.2.3 Huidige projecten en onderzoeksprogramma's

Op dit moment zijn er geen onderzoeksprogramma's bekend waarin vegetatie op de dijk worden beschouwd.

3.3 Effectiviteit

Het effect van vegetatie op het voorland, uitgedrukt in de invloedsfactor voor ruwheid (γ_r , zie ook Paragraaf 3.1) is waarschijnlijk afhankelijk van de volgende aspecten:

- de lengte van de vegetatie waardoor de golfoplooptong zich door voort moet planten
- de hoogte van de vegetatie
- dichtheid van de vegetatie: hoeveelheid biomassa per vierkante meter
- dikte en stijfheid van de vegetatie
- golfoploopcondities (snelheden en laagdikte van de golfoplooptong)

De effectiviteit van vegetatie op de golfoploopzone van de dijk is onbekend. In Hoofdstuk 6.2 worden aannames gemaakt van de waarde van de invloedsfactor voor ruwheid en wordt op basis van deze aannames de effectiviteit bepaald.

3.4 Zout en zoet water

De oploopzone op een dijk, ook aan zee, ligt zo hoog dat er zelden of nooit zout water komt. Dat maakt het geschikt voor zoete vegetatie. Langs de kust zal er echter vaak wat zout in de lucht zitten, wat voor sommige plantensoorten al teveel kan zijn (zoals de meeste soorten Coniferen). Het zoete milieu maakt dat er een ruime keus is aan planten.

4 Eisen met betrekking tot vegetatie

Vegetatie als onderdeel van het waterkeringssysteem dient aan een aantal eisen te voldoen. In dit hoofdstuk is een eerste aanzet gegeven. Deze aanzet is integraal, dus voor zowel vegetatie op de dijk als vegetatie voor de dijk, gegeven. Om deze eisen te identificeren is gebruik gemaakt van het kader dat is beschreven in de Handreiking Dijkbekledingen deel 1 Algemeen. Deze handreiking is geschreven met het oog op innovatieve oplossingen. In deze handreiking wordt onderscheid gemaakt tussen vier bronnen van eisen:

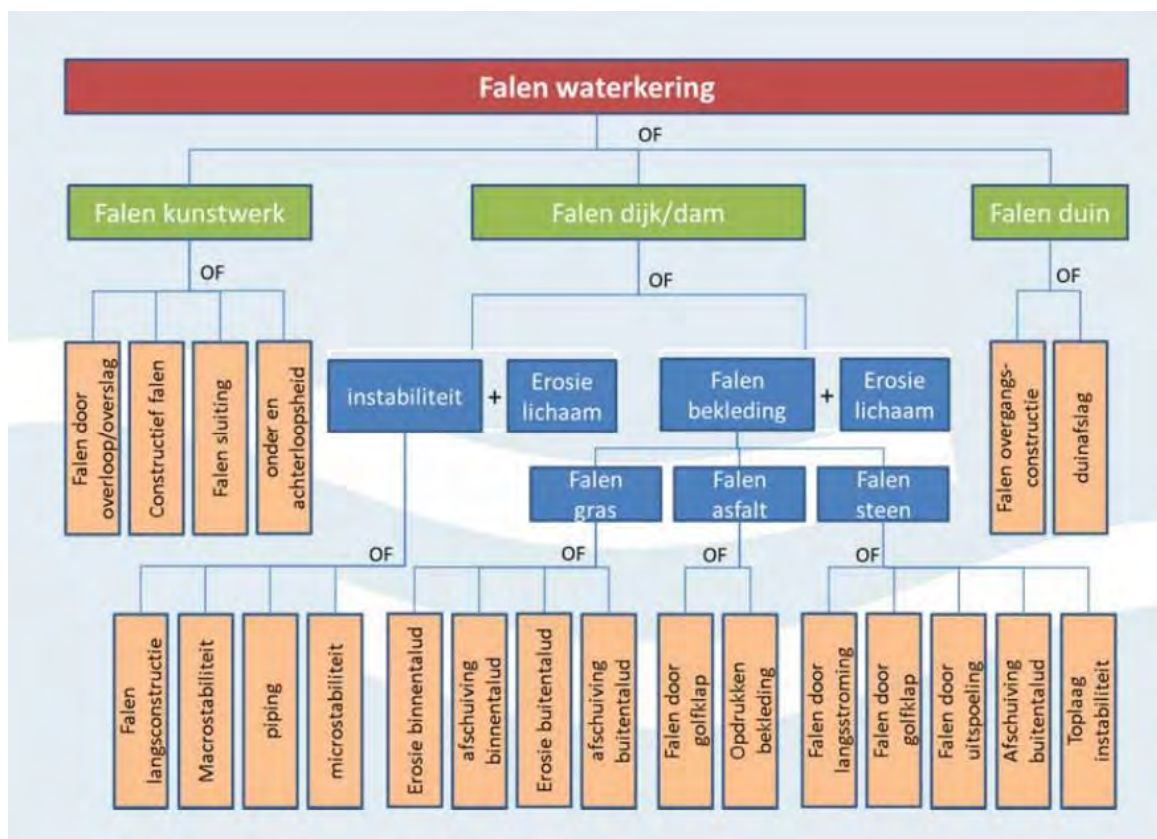
1. Wettelijke eisen
2. Eisen vanuit de primaire functie
3. Eisen vanuit de secundaire functie (waterbouwkundig en niet waterbouwkundig)
4. Aspecteisen

De eerste twee bronnen zijn dwingend, de laatste twee bronnen zijn aanbevelende eisen of zijn wenselijk.

In onderstaande paragrafen zijn de vier typen eisen zoals hierboven weergegeven geprojecteerd op de toepassing van vegetatie op of voor de dijk.

4.1 Wettelijke eisen

De belangrijkste wettelijke eis is de Waterwet waarin is vastgelegd dat de beheerder verplicht is om een periodieke toets op de veiligheid van hun waterkering uit te voeren. Hieruit volgt impliciet dat er een methode beschikbaar dient te zijn om deze toets uit te voeren. De generieke methode wordt door het Rijk beschikbaar gesteld. De centrale gedachtegang achter deze methode is een faalkanseis waaraan een dijktraject dient te voldoen. De faalkanseis is opgebouwd uit verschillende onderdelen welke grafisch zijn weergegeven in de foutenboom in Figuur 4.1.



Figuur 4.1 Foutenboom waterkering

De bovenstaande foutenboom is vrij generiek van aard. Wanneer dit wordt toegepast in het kader van dit rapport dan is de grootste bijdrage van de aanwezigheid van vegetatie aan het spoor 'falen bekledingen' en dan met name 'falen gras'. Grasbekledingen worden op het binnentalud (golfoverslagbelasting) en op het buitentalud (golfoploopbelasting) toegepast. Op zowel het binnentalud als het buitentalud zijn twee faalmechanismen geïdentificeerd: erosie en afschuiving.

Hoewel 'hoogte van de kering' geen direct genoemd faalmechanisme is, dient beseft te worden dat de hoogte van de kering een cruciale parameter is met betrekking tot de faalmechanismen welke op het binnentalud kunnen optreden als gevolg van de hoeveelheid golfoverslag. De hoeveelheid golfoverslag is afhankelijk van:

- Hydraulische belasting aan de teen van de dijk:
 - o de hydraulische belasting kan potentieel worden verminderd door vegetatie voor de dijk
- Eigenschappen (geometrie en ruwheid) van de dijk:
 - o de ruwheid kan worden verhoogd door vegetatie op de dijk.

Om de wettelijke verplichte toets op veiligheid uit te kunnen voeren is er een methode beschikbaar waarmee de kwantitatieve invloed van de vegetatie kan worden bepaald. Zonder deze methode mag de (potentieel positieve) invloed van vegetatie dus niet in rekening worden gebracht.

4.2 Eisen vanuit de primaire functie

Vanuit de primaire functie zijn er de volgende eisen:

- het keringsonderdeel dient bestand te zijn tegen de te verwachten belastingen zodat deze zijn primaire functie (in dit geval golfdemping of golfoverslagreductie) kan vervullen. Deze belastingen zijn in dit geval voornamelijk:
 - o Hydraulische belasting (golf of golfoploop, stroming). Door de hydraulische belasting kan de vegetatie omvergeworpen worden. Ook is het mogelijk dat de vegetatie ontgrond waardoor de wortels geen houvast meer hebben.
 - o Wind (omwaaiende bomen)
- Er dient weerstand te zijn tegen ongewenste vormverandering of degeneratie. In dit geval kan worden gedacht aan de volgende aspecten:
 - o Ziektes
 - o Klimatologische aantasting
 - Droogte
 - UV straling
 - Warmte of kou
 - o Vraat
 - o Invloed van seizoenen (bladverlies, vorst),
 - o Brand
 - o Invloed van zout en zoet water
 - o Ijsbelasting: water met ijs kan een belasting geven op de waterkering en de bekleding. Ijsplaten kunnen over de bekleding schuiven en de vegetatie meentrekken.
- Het keringsonderdeel dient geen significante invloed uit te oefenen op andere keringsonderdelen. Een aandachtspunt hierbij is wanneer de vegetatie in de golfoploopzone in een grasbekleding wordt geplaatst. De grasbekleding heeft als functie om erosie tegen te gaan. Door de vegetatie ontstaat er mogelijk schaduw op het gras wat leidt tot een slechtere graskwaliteit waardoor de dijk gevoeliger is voor erosie.

4.3 Eisen vanuit de secundaire functie

Vanuit de waterbouwkundige secundaire functie is er vooralsnog één aanvullende eis gesignaleerd:

- De onderhoudskosten dienen beperkt te zijn. De onderhoudskosten zijn soms een belemmering om vegetatie een substantiële bijdrage te laten leveren aan de waterveiligheid. De onderhoudskosten van vegetatie zijn in de orde grootte van ongeveer € 100,- tot € 1000,- per hectare per jaar. Recent zijn er mogelijkheden ontstaan om dergelijke extra onderhoudskosten te kapitaliseren en mee te nemen in de HWBP-financiering van het dijkversterkingsproject, mits dit de totale kosten van de dijkverbetering + onderhoud reduceren. Dat kan zeker mogelijkheden voor het toepassen van vegetatie vergroten.

Vanuit de niet-waterbouwkundige secundaire functie zijn er twee aanbevelende eisen:

- Vegetatie op het voorland kan een recreatieve functie hebben. Gedacht kan worden aan wandelpaden, natuurexcursies et cetera.
- Vegetatie op het voorland kan een meerwaarde bieden aan het landschap en de ecologische waarden.

4.4 Aspecteisen

Vanuit de aspecteisen zijn de volgende eisen geïdentificeerd:

- Beheer en onderhoud:
 - het beheer en onderhoud is van belang om ervoor te zorgen dat de vegetatie haar primaire taken nog kan vervullen en dient daarom goed uitgevoerd te kunnen worden. Een voorwaarde is daarom dat de beheerder (veelal het waterschap) zeggenschap moet hebben over het beheer en onderhoud. Daarbij speelt ook de vraag wie de eigenaar is van de vegetatie: het waterschap of een andere partij. Als het een andere partij is, dan kan het waterschap alleen dwingend invloed uitoefenen op het instandhouden van de vegetatie als het aanpassen van de vegetatie vergunningplichtig is. Dit kan bijvoorbeeld door het op te nemen in de keurzone.. Deze situatie zou veranderd kunnen worden door heldere criteria op te stellen waar de vegetatie aan moet voldoen. Het waterschap kan dan makkelijker beoordelen of een verandering, zoals het aanleggen van een wandelpad, de waterveiligheid in gevaar brengt of niet. Dit is een discussie welke ook speelt in de POV Voorlanden (dit was o.a. een discussie item op de POV dag d.d. 13 oktober 2016).
 - Vanuit de landbouw is er belangstelling om natuurgebieden te beheren. Een boerenbedrijf kan met een natuurgebied erbij groener scoren. Door lokale boeren bij de plannen te betrekken, kunnen hierdoor de toepassing van vegetatie een stap dichterbij gebracht worden.
- Ruimtelijke kwaliteit - LNC aspecten: Over het algemeen is het wenselijk dat een waterkering zodanig wordt ontworpen dat het past binnen de landschapsvisie en het bijbehorende landschapsadvies. In het verleden heeft dit er bijvoorbeeld toe geleid dat een gemeente geen bos voor de dijk wilde, omdat het uitzicht vanaf de dijk over de rivier daarmee werd verstoord.
- Invloed op afvoercapaciteit van een rivier: vegetatie voor de dijk kan mogelijk een invloed hebben op de afvoercapaciteit van de rivier indien dit in het stroomvoerende deel van de rivier ligt.

5 Vegetatiesoorten

Voor de toepassing van vegetatie in of voor de dijk dient er een vegetatie gekozen te worden. Deze vegetatie dient uiteraard zo goed mogelijk te voldoen aan de eisen zoals deze zijn beschreven in Hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk zijn enkele voorbeelden van types vegetatie geselecteerd welke op het eerste gezicht aan de eisen lijken te voldoen. In een later stadium dient dit echter nauwkeuriger te worden uitgewerkt. Er wordt dus benadrukt dat er geen uitvoerige studie is uitgevoerd naar toe te passen vegetatie. Wel is een oriënterende verkenning uitgevoerd zodat er al een eerste indruk van het type vegetatie wordt verkregen.



Figuur 5.1 Voorbeeld van gevlochten levende heg die wordt toegepast in het gebied van de Maas.

Omdat er in de winter de grootste kans is op hoog water en storm, gaat het om winterharde planten en is de wintersituatie het meest relevant (wel/geen blad in de winter). Dit geldt voor zowel vegetatie op de dijk als vegetatie voor de dijk.

Zeker aan de kust, maar ook wel langs de rivieren, komt zware storm voor die samenvalt met hoogwater. De vegetatie mag dan niet omwaaien, want windworp geeft een flinke ontgronding die de golven daarna vrij spel geven (Figuur 5.2). De voorkeur gaat daarom uit naar lage vegetatie met sterk wortelstelsel, of vegetatie die laag gehouden kan worden door middel van snoeien. Vegetatie in de golfploopzone dient vanuit haar primaire functie circa 30 a 50 cm hoog te zijn (dat is ongeveer de dikte van de golfplooptong). De benodigde hoogte van de vegetatie voor de dijk is sterk afhankelijk van verschillende omstandigheden zoals de waterdiepte.



Figuur 5.2 Windworp van vegetatie geeft een flinke ontgronding, die ongewenst is op een dijktalud

Er zijn twee aspecten aan vegetatie die de golfoploop en golven beïnvloeden:

- Stammen, takken en twijgjes
- Bladeren

Uiteraard is het effect van de vegetatie het sterkst als er sprake is van een dicht netwerk van takjes, twijgjes en bladeren. De bladeren hebben licht nodig en zijn daardoor voornamelijk aan de buitenzijde van de plant aanwezig. Als we de bijdrage van de bladeren optimaal willen benutten, dan moeten de bladeren ook in de winter aanwezig zijn en moet de vegetatie zo veel mogelijk 'buitenoppervlak' hebben. Uiteraard kunnen de blaadjes alleen meegeteld worden als ze tijdens de ontwerpcondities vast blijven zitten.

Een mogelijk geschikte vegetatie in de golfoploopzone op de dijk zou kunnen bestaan uit Ligusterheggen, evenwijdig aan de waterlijn. Liguster is een sterke breed wortelende plant met een vrij fijn vertakt netwerk van stammen, takjes en twijgjes, zie Figuur 5.3. De ligusterheg behoudt zijn bladeren in de winter, maar kan bij strenge vorst wel wat bladeren verliezen. Hij kan tegen zeewind. *Ligustrum vulgare* en *Ligustrum ovalifolium* zijn de bekendste soorten en kunnen meters hoog worden, maar verdragen snoeien zeer goed. Hij gedijt goed op diverse grondsoorten, zowel op natte als op droge plaatsen, in de zon en in halfschaduw. Afhankelijk van de bestandheid tegen langere tijd onder water staan, kan deze vegetatie ook laag op de dijk of op het voorland langs rivieren worden toegepast.

Belangrijk is ook dat de plant direct boven het maaiveld al sterk vertakt is en bladeren heeft. De golfoplooptong is immers slechts 10 à 50 cm dik. De heggen hoeven daarom niet hoog te zijn: 50 cm is voldoende.

Liguster is een gemakkelijk te onderhouden sterke plant. Door ze in stroken (als heggen) te plaatsen zijn ze gemakkelijk in model te houden door heggescharen op een slimme manier op een voertuig te monteren. Eén à twee keer per jaar maaien is voldoende.



Figuur 5.3 Ligusterhaag

Een alternatief voor Ligusterhagen is bijvoorbeeld de Beukhaag (zie Figuur 5.4) en de Coniferenhaag (zie Figuur 5.5). De Beukhaag heeft als nadeel dat de blaadjes in de winter bruin worden en minder vast aan de takken zitten. Het is denkbaar dat ze losgerukt worden tijdens de extreme belasting in de golfoploopzone.

De Coniferenhaag is er in vele variëteiten, maar vrijwel allemaal hebben ze moeite met de zoute lucht in de buurt van de zoute wateren. Op zeedijken zijn ze daarom niet geschikt.

Verder zou de Laurierhaag een geschikt alternatief kunnen zijn (zie Figuur 5.6). Ook deze plant behoudt zijn bladeren in de winter en vormt een dichte haag.



Figuur 5.4 Beukhaag in de winter



Figuur 5.5 Coniferenhaag (Picea abies)(niet geschikt langs zoute wateren)

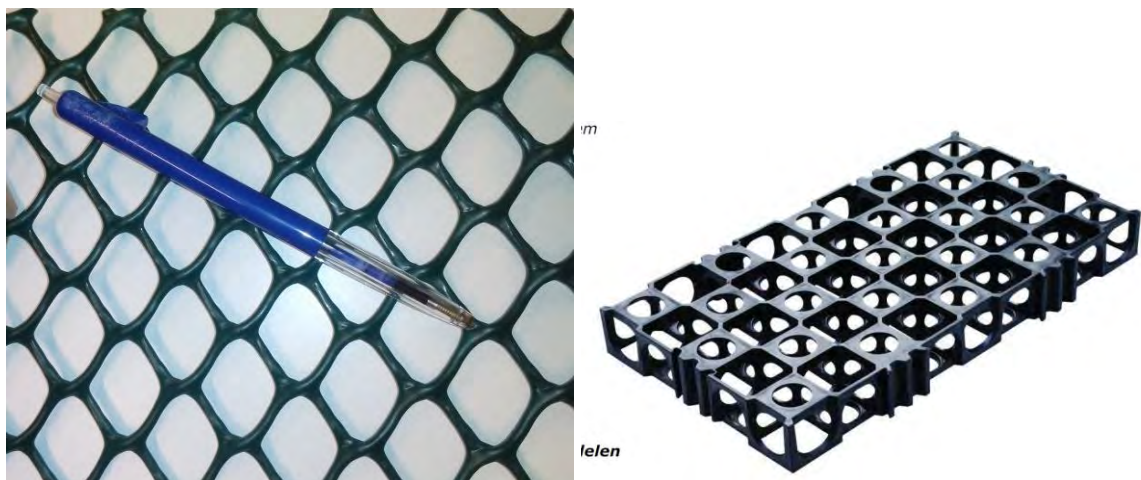


Figuur 5.6 Laurierhaag

Bij toepassing van heggen in de golfoploopzone moet rekening gehouden worden met het feit dat er onder de heggen geen gras groeit, en ook tussen de heggen kan de kwaliteit van het gras wat minder zijn dan op een normaal grastalud. Onder de heggen zal de erosiebestendigheid dus moeten worden gerealiseerd door het wortelstelsel van de heg. Mogelijk dat dit te weinig is en daarom kan het zinnig zijn hier additionele maatregelen te nemen om de erosiebestendigheid van de graszode. Daarvoor zijn er verschillende opties, zoals te zien is in Figuur 5.7 en Figuur 5.8.



Figuur 5.7 Links: Enkamat R45. Rechts: Robulon PE1000 (Ten Cate)



Figuur 5.8 Links: Turfprotecta (Typar). Rechts: Doorgroeiraster Atlantis 52 mm FLO-CELL drainage Cell (

Naast hagen kan er ook gedacht worden aan relatief hoge bodembedekkers, zoals *Pachysandra terminalis*, zie Figuur 5.9. Dat is een sterke plant die circa 15 à 20 cm hoog wordt en ook in de winter het blad houdt. Als alternatief kan gedacht worden aan Struikkamperfoelie, die 20 à 40 cm hoog wordt.

Ook bij deze planten moet de ondergrond wellicht versterkt worden tegen erosie van de golfoploop en –neerloop (zie bovenstaande oplossingen).



Figuur 5.9 Bodembedekkers (links *Pachysandra terminalis* en rechts Struikkamperfoelie)

6 Mogelijk effect van vegetatie op benodigde kruinhoogte

In dit hoofdstuk wordt de effectiviteit van vegetatie voor de dijk en vegetatie in de golfloopzone zo goed mogelijk gekwantificeerd. Dit wordt uitgedrukt in de reductie in de benodigde kruinhoogte.

6.1 Vegetatie vóór de dijk

6.1.1 Inleiding

Het kwantitatieve effect van vegetatie op het voorland wordt in twee stappen beschouwd:

- Stap 1: Invloed van de vegetatie op de golven
- Stap 2: Invloed op de benodigde kruinhoogte gegeven een toegestaan gemiddelde golfoverslagdebiet.

De invloed van de vegetatie op de golven wordt als eerste berekend (Paragraaf 6.1.2). Daarvoor zijn twee methodes beschikbaar:

- Rekenmodel Xbeach
- Rekenmodel SWAN-VEG

De eerste methode wordt tegenwoordig het meeste toegepast in kennisontwikkelingsprojecten. Het geeft de mogelijkheid om de golfhoogtereductie in de vegetatie te berekenen als functie van de hoeveelheid stammen/takken in de vegetatie. Uit een vergelijking met veldmetingen met kleine golven blijkt dat deze methode hoopgevende resultaten geeft.

De tweede methode is eenvoudiger en meer geschikt als praktisch hulpmiddel bij het toetsen en ontwerpen van vegetatie als onderdeel van het waterkeringsysteem. Daarom is hier gebruikgemaakt van de tweede methode.

Er wordt tevens opgemerkt dat het rekenmodel Xbeach geen lokale golfgroei door wind kan modelleren, SWAN kan dit wel. Dit is van belang indien er grote afstanden zijn tussen de vegetatie en de dijk.

In Paragraaf 6.1.3 wordt de invloed van de vegetatie op de golven nader beschouwd door middel van modelschematisaties met het model SWAN-VEG. Vervolgens wordt de benodigde kruinhoogte vastgesteld, gegeven een gemiddeld golfoverslagdebiet. Dit wordt gedaan middels de methodiek welke is beschreven in de TAW (2002).

6.1.2 Oriënterende berekening

Om een eerste inschatting te maken van het effect van vegetatie op een voorland wordt een oriënterende berekening gemaakt. Deze berekening dient alleen om enig gevoel voor orde groottes te krijgen. Men dient zich bewust te zijn dat de uitkomst van deze exercitie fors kan afwijken van de werkelijkheid omdat er belangrijke aannames worden gedaan.

Voor de berekening wordt de volgende situatie beschouwd:

- Een dijk met een 1:3 talud;
- Diep water (er treedt geen breken van golven op als gevolg van ondiepte)
- De bekleding van de dijk in de golfloopzone is glad (bijvoorbeeld gras). Dit resulteert in een invloedsfactor voor ruwheid van $\gamma_f = 1,0$
- De hydraulische belasting van de dijk bestaat uit golven

- significante golfhoogte van $H_{m0} = 1,0$ m
- golfsteilheid van $s_{m-1,0} = 0,04$ (spectrale golfperiode $T_{m-1,0} = 4,00$ s).
- De golfrichting is loodrecht op de as van de dijk; $\beta = 0^\circ$

Om het gemiddelde golfoverslagdebiet q te bepalen wordt de methode welke is beschreven in TAW (2002) gebruikt. Hierbij kan worden gekozen voor een probabilistische verwachtingswaarde of een ontwerpwaarde. In de onderstaande berekening is gekozen voor de probabilistische verwachtingswaarde. In deze methodiek wordt een empirisch model gebruikt welke als volgt is beschreven:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\tan \alpha} \cdot \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot e^{-a \cdot \frac{R_c}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\xi_{m-1,0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}} \quad (6.1)$$

Met een maximum van

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.2 \cdot e^{-a \cdot \frac{R_c}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta}} \quad (6.2)$$

Waarbij

- a = coëfficiënt: normaal verdeelde stochast ($\mu = 4,75$, $\sigma = 0,50$)
- b = coëfficiënt: normaal verdeelde stochast ($\mu = 2,60$, $\sigma = 0,35$)
- g = versnelling als gevolg van de zwaartekracht (m/s^2)
- H_{m0} = significante golfhoogte (m)
- q = gemiddeld golfoverslagdebiet ($m^3/s/m$)
- R_c = kruinhoogte (m)
- $\xi_{m-1,0}$ = breker parameter gebaseerd op de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ (-)
- γ_x = invloedsfactor voor bermen (γ_b), ruwheid buitentalud (γ_f), golfinvalshoek (γ_β) en kruinelementen (γ_v)

Middels Vergelijking (6.1) en Vergelijking (6.2) kan de benodigde kruinhoogte (R_c) worden bepaald.

Er worden twee situaties met elkaar vergeleken:

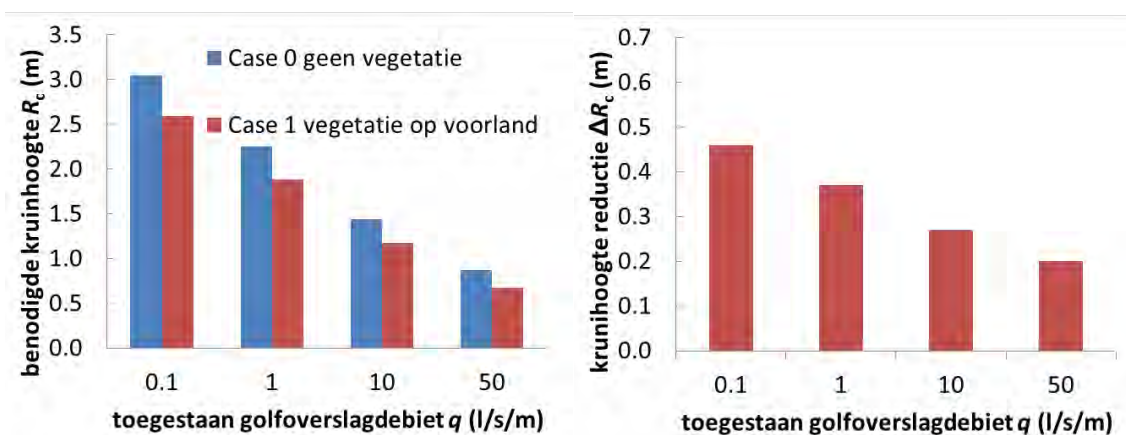
- Casus 0: Geen vegetatie
- Casus 1: Vegetatie op het voorland

Vooralsnog is onbekend wat de invloed is van de vegetatie op de golfhoogte. Er wordt hier aangenomen dat de golfhoogte met 20% afneemt naar $H_{m0} = 0,80$ m en dat de golfperiode gelijk blijft op $T_{m-1,0} = 4,00$ s. De werkelijke afname is echter onbekend en zal afhankelijk zijn van het type vegetatie, de hoogte van de vegetatie en over welke lengte van het voorland deze is aangebracht, zie volgende paragraaf. Tevens wordt aangenomen dat de vegetatie de golven kan weerstaan en niet bijvoorbeeld wordt ontworteld.

Voor beide situatie kan nu de benodigde kruinhoogte worden berekend aannemende een toegestaan gemiddeld golfoverslagdebiet q . De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Benodigde kruinhoogte als functie van het overslagdebiet. De resultaten berusten op berekeningen waarbij de input is aangenomen. De resultaten mogen daarom niet worden toegepast om definitieve conclusies te trekken.

Toegestaan overslagdebiet q (l/s/m)	Casus 0 Geen vegetatie Benodigde kruinhoogte R_c (m)	Casus 1 Vegetatie op voorland Benodigde kruinhoogte R_c (m)	Reductie Kruinhoogte ΔR_c (m)
0,1	3,05	2,59	0,46
1,0	2,25	1,88	0,37
10	1,44	1,17	0,27
50	0,87	0,67	0,20



Figuur 6.1 Benodigde kruinhoogte als functie van het overslagdebiet. De resultaten berusten op berekeningen waarbij de input is aangenomen. De resultaten mogen daarom niet worden toegepast om definitieve conclusies te trekken.

Uit de resultaten, welke zijn weergegeven in Tabel 6.1 en Figuur 6.1, kan worden opgemaakt dat, gegeven de berekeningsmethodiek en de gekozen aannames, mogelijk een kruinhoogtereductie van enkele decimeters kan worden bereikt. Deze reductie is minder bij hogere toegestane golfoverslaghoeveelheden. Er dient echter opgemerkt te worden dat de aannames zeer onzeker zijn en dat deze dienen te worden geverifieerd alvorens daadwerkelijk conclusies kunnen worden getrokken.

6.1.3 Berekening met SWAN-VEG

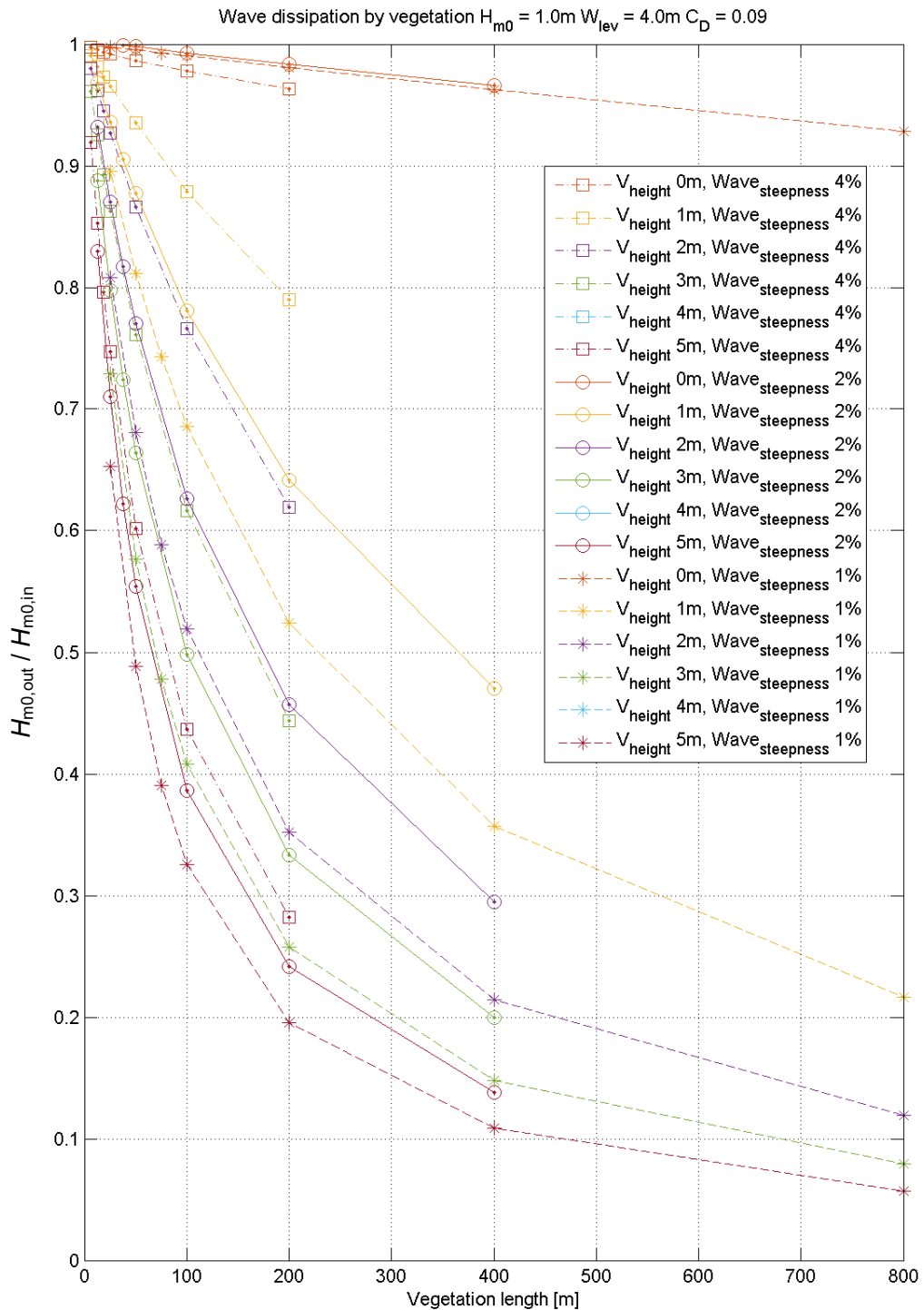
Met het rekenmodel SWAN-VEG zijn vele berekeningen uitgevoerd met diverse waarden voor de breedte van de strook vegetatie op het voorland en de parameters die de eigenschappen van de vegetatie weergeven. De resultaten van al deze berekeningen en de gebruikte invoer zijn in detail beschreven in bijlage A. Het doel is om met deze berekeningen een indruk te krijgen van de mate waarin de vegetatie op het voorland de golfcondities beïnvloedt. Helaas zijn er nog weinig metingen beschikbaar waarmee het rekenmodel kan worden gekalibreerd. Daarom moeten de berekeningen gezien worden als een eerste indicatie van wat er bereikt kan worden met vegetatie.

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met een golfhoogte voor de vegetatie van 1 m. De golfperiode is zo gekozen dat er berekeningen zijn uitgevoerd met een golfsteilheid van 4%, 2% en 1% waarbij de golfsteilheid is gedefinieerd als $s = H_{m0}/\sqrt{(gT^2)/(2\pi)}$. Een golfsteilheid van 4% komt veel voor bij rivierdijken.

Er zijn berekeningen uitgevoerd met een breedte van de strook vegetatie variërend van 0 m tot 200 à 800 m en een hoogte variërend van 0 m tot 5 m, terwijl steeds gerekend is met een waterstand van +4 m boven het voorland.

Enkele resultaten zijn samengevat in Figuur 6.2. De blokjes in de figuur hebben betrekking op een golfsteilheid van 4%, de rondjes zijn berekend met een golfsteilheid van 2% en de sterretjes met 1%. De vegetatiehoogte (V_{height}) is stap voor stap verhoogd van 0 m tot 5 m.

Bij een golfsteilheid van 4% zien we dat een strook van 100 m vegetatie met hoogte van 2 m de inkomende golfhoogte van 1,0 m reduceert naar een golfhoogte van 0,77 m. Dit resultaat is vergelijkbaar met de aanname die gebruikt is in de vorige paragraaf, waar gerekend is met een reductie van 20%.



Figuur 6.2 Verhouding tussen de golfhoogte voor de vegetatie en achter de vegetatie (weerstandscoefficiënt = 0,09)

Belangrijke invoerparameters zijn de weerstandscoefficiënt, vegetatiediameter en vegetatiedichtheid. In het rekenmodel is alleen het product van deze drie variabelen relevant. Voor de laatste twee is het product constant gehouden op 1,53 takken/m. Dat komt neer op bijvoorbeeld 1 cm dikke takjes en 153 takjes/m², of 10 cm dikke stammen en 15,3 stammen/m². De weerstandscoefficiënt is wel gevarieerd, namelijk van $C_d = 0,09$ tot 0,39.

Figuur 6.2 is berekend met een vrij lage waarde van de weerstandscoefficiënt ($C_d = 0,09$). Wordt een hogere waarde van de weerstandscoefficiënt aangehouden ($C_d = 0,39$), dan is de golfhoogte achter de 2 m hoge vegetatie niet 0,77 m maar slechts 0,43 m. Momenteel is niet goed bekend welke waarden aangehouden zou moeten worden voor een bepaald soort vegetatie. Dat betekent dat er nog vervolgonderzoek nodig is om de relatie tussen de soort vegetatie en de waarde van de invoerparameters te bepalen. De rekenresultaten moeten daarom ook meer gezien worden als een indicatie van wat er bereikt kan worden met vegetatie, dan dat het een nauwkeurige schatting is.

Vervolgens is ook berekend welke kruinhoogtereductie mogelijk is door de golfhoogte beperkende invloed van de vegetatie op het voorland. Voor bovenstaand voorbeeld met 2 m hoge vegetatie wordt een kruinhoogtereductie van ongeveer 25 cm berekend met $C_d = 0,09$. Voor de resultaten wordt verder verwezen naar bijlage A. Daar is te zien dat met $C_d = 0,39$ een kruinhoogtereductie van 1,25 m wordt verkregen. Deze grote spreiding geeft ook aan dat onderzoek noodzakelijk is om de juiste weerstandscoefficiënt vast te stellen.

6.2 Vegetatie op de dijk in de golfploopzone

Om een eerste inschatting te maken van het effect van vegetatie op de golfploopzone wordt een oriënterende berekening gemaakt. Deze berekening dient alleen om enig gevoel voor orde groottes te krijgen. Men dient zich bewust te zijn dat de uitkomst van deze exercitie kan afwijken van de werkelijkheid omdat er diverse aannames worden gedaan.

Voor de berekening wordt de volgende situatie beschouwd, die karakteristiek is voor het riviereengebied op plaatsen met behoorlijke golfaanval op de dijk onder maatgevende condities:

- Een dijk met een 1:3 talud;
- Diep water (er treedt geen breken van golven op als gevolg van ondiepte)
- De bekleding van de dijk in de golfploopzone is voor een deel bekleed met vegetatie. Er wordt aangenomen dat dit resulteert in talud waarvan de invloedsfactor voor ruwheid (van het gehele talud boven water) gelijk is aan $\gamma_f = 0,8$.
- De hydraulische belasting van de dijk bestaat uit golven
 - Significante golfhoogte van $H_{m0} = 1,0$ m
 - Golfsteilheid van $s_{m-1,0} = 0,04$ (spectrale golfperiode $T_{m-1,0} = 4,00$ s, $L_{m-1,0} = 25$ m).
 - De golfrichting is loodrecht op de as van de dijk; $\beta = 0^\circ$

Om het gemiddelde golfoverslagdebiet q te bepalen is de methode uit TAW (2002) gebruikt, zie paragraaf 6.1.2. Hierbij kan worden gekozen voor een probabilistische verwachtingswaarde of een ontwerpwaarde. In de onderstaande berekening is gekozen voor de probabilistische verwachtingswaarde.

Er worden twee situaties met elkaar vergeleken:

- Casus 0: Geen vegetatie
- Casus 2: Vegetatie in de golfploopzone

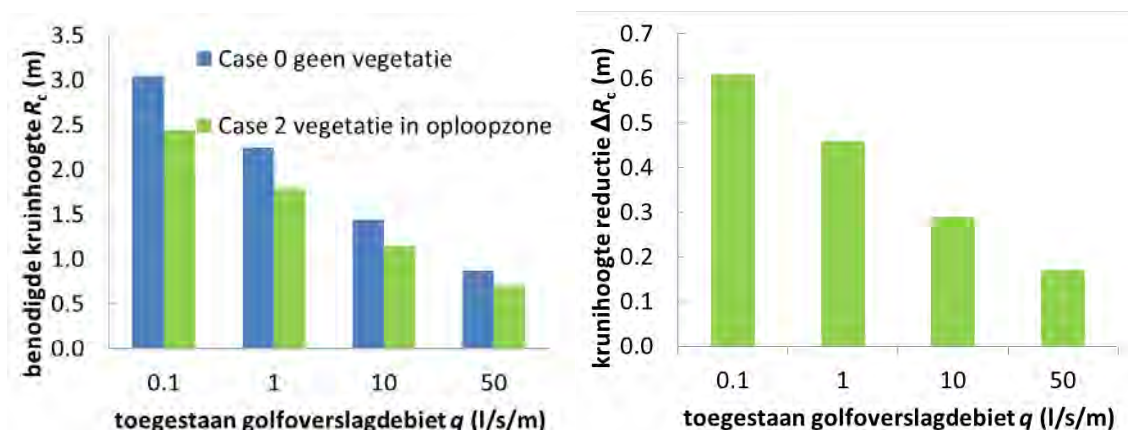
Vooralsnog is onbekend wat de invloed is van de vegetatie op het golfoverslagdebiet. Om deze reden dienen er vooralsnog aannames te worden gemaakt. Er wordt hier aangenomen dat de invloedsfactor voor ruwheid in de TAW (2002) formules (6.1) en (6.2) gelijk is aan $\gamma_f = 0,8$. De werkelijke waarde van deze parameter is echter onbekend en zal afhankelijk zijn van het type vegetatie, de hoogte van de vegetatie en over welke lengte van het talud deze is aangebracht. Tevens wordt aangenomen dat de vegetatie de golfploop en golfneerloop kan weerstaan en niet bijvoorbeeld ontworteld raakt. Tot slot wordt aangenomen dat de vegetatie

niet in de golfklapzone is geplaatst (en daar dus geen energie onttrekt aan de hydraulische belasting).

Voor beide situaties kan nu de benodigde kruinhoogte worden berekend aannemende een toegestaan gemiddeld golfoverslagdebiet q . De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Benodigde kruinhoogte als functie van het overslagdebiet. De resultaten berusten op berekeningen waarbij de input is aangenomen. De resultaten mogen daarom niet worden toegepast om definitieve conclusies te trekken.

Toegestaan golfoverslagdebiet q (l/s/m)	Casus 0 Geen vegetatie Benodigde kruinhoogte R_c (m)	Casus 2 Vegetatie in oploopzone Benodigde kruinhoogte R_c (m)	Reductie Kruinhoogte ΔR_c (m)
0,1	3,05	2,44	0,61
1,0	2,25	1,79	0,46
10	1,44	1,15	0,29
50	0,87	0,70	0,17



Figuur 6.3 Benodigde kruinhoogte als functie van het overslagdebiet. De resultaten berusten op berekeningen waarbij de input is aangenomen. De resultaten mogen daarom niet worden toegepast om definitieve conclusies te trekken.

Uit de resultaten, welke zijn weergegeven in Tabel 6.1 en Figuur 6.1, kan worden opgemaakt dat, gegeven de berekeningsmethodiek en de gekozen aannames, mogelijk een kruinhoogtereductie van enkele decimeters kan worden bereikt. Deze reductie is minder bij hogere toegestane golfoverslaghoeveelheden. Er dient echter opgemerkt te worden dat de aannames zeer onzeker zijn en dat deze dienen te worden geverifieerd alvorens daadwerkelijk conclusies kunnen worden getrokken.

Een vergelijkbare exercitie kan worden uitgevoerd voor kustlocaties. Het verschil met de rivieren is dat langs de kust de golven onder maatgevende condities 2 à 3 maal hoger zijn en de golfoploopzone veel langer is. De berekeningen leiden dan tot de conclusie dat de kruin met vegetatie op het buitentalud 0,5 à 1,5 m lager kan worden dan zonder vegetatie.

6.3 Synthese

De effectiviteit van vegetatie voor de dijk of op de dijk wordt uitgedrukt in een fictieve mogelijke kruinverlaging. Vanwege een gebrek aan goede benchmarkdata is het niet goed mogelijk om een betrouwbare voorspelling te doen van de effectiviteit van vegetatie. In de aanpak zijn stevige aannames gemaakt die geverifieerd dienen te worden. Op basis van de aannames lijkt het realistisch dat zowel vegetatie op de dijk als vegetatie voor de dijk kan leiden tot enkele decimeters kruinverlaging.

7 Conclusies: kennisvragen en hoe deze op te pakken

7.1 Kennisvragen

Op basis van de analyse in dit rapport kunnen kennisvragen worden gedistilleerd. Deze kennisvragen worden, waar mogelijk, integraal weergegeven voor zowel vegetatie voor de dijk als vegetatie op de dijk.

- Vanuit de wettelijke eis (zie Paragraaf 4.1) is het noodzakelijk om een methode te hebben waarbij de effectiviteit van de vegetatie in rekening kan worden gebracht. Deze methode dient de reductie in hydraulische belasting op de waterkering aan te geven. In het geval van vegetatie voor de dijk betreft dit de golfcondities. In het geval van vegetatie op de dijk betreft dit de golfoplopen en golfoverslaggebieden.

→ *Kennisvraag 1: Hoe mag de invloed van de vegetatie op de hydraulische belastingen in rekening worden gebracht in ontwerp en toetsing van de dijk?*

- Vanuit de primaire functies (zie Paragraaf 4.2) maar indirect ook vanuit de wettelijke eisen dient aangetoond te worden dat de vegetatie bestand is tegen de te verwachten belastingen zoals hydraulische belastingen op de vegetatie (golven, stroming, golfoplopen) en windbelasting in extreme situaties. Ook dient er weerstand te zijn tegen ongewenste vormverandering of degeneratie zoals genoemd in Paragraaf 4.2.

→ *Kennisvraag 2: Hoe kan er met voldoende zekerheid worden aangetoond dat er in extreme situaties voldoende weerstand is tegen ongewenste vormverandering of degeneratie van de vegetatie op zowel korte tijdschaal (duur van de storm) en lange tijdschaal?*

- Vanuit de primaire functie dient tevens aangetoond te worden dat een keringsonderdeel geen significante invloed uitoefent op andere keringsonderdelen. Bij vegetatie op het voorland kan dit bijvoorbeeld wortelgroei door een kleilaag zijn (intredepunt voor het faalmechanisme piping). Bij vegetatie op de dijk is dit bijvoorbeeld de invloed van vegetatie op een grasbekleding door schaduwvorming of onttrekking van vocht en voedingsstoffen.

→ *Kennisvraag 3: Hoe kan worden aangetoond dat de vegetatie geen relevante invloed heeft op de waterkerende functie van andere keringsonderdelen?*

- Vanuit de secundaire waterbouwkundige functie (zie Paragraaf 4.3) volgt met name de eis dat de kosten beperkt dienen te zijn.

→ *Kennisvraag 4: Welke factoren dragen bij aan de verwachte kosten in de verschillende stadia (aanleg, onderhoud, verwijderbaarheid) conform de life cycle systematiek en hoe verhoudt dit zich tot traditionele alternatieven zoals bijvoorbeeld een dijkverhoging.*

- Vanuit de secundaire niet-waterbouwkundige functie (zie Paragraaf 4.3) volgt de aanbevelende eis dat vegetatie zodanig ingezet kan worden dat deze recreatieve en ecologische functies kunnen hebben.

→ *Kennisvraag 5: welke aanvullende eisen worden aan vegetatie, welke primair voor waterveiligheid is bedoeld, gesteld zodat deze recreatieve en / of ecologische voordelen hebben?*

- Vanuit de aspecteisen (zie Paragraaf 4.4) wordt gesteld dat het waterschap zeggenschap dient te houden over de vegetatie. Verder wordt gesteld dat de waterkering zodanig dient te worden ontworpen dat deze binnen de landschapsvisie past. Tot slot wordt gesteld dat de vegetatie niet de afvoercapaciteit van een rivier mag beïnvloeden. Hoewel dit belangrijke aspecten zijn volgen hier geen direct noodzakelijke kennisvragen uit.

Naast de hierboven genoemde (ingekaderde) kennisvragen zijn er nog enkele kennisvragen te benoemen:

→ *Kennisvraag 6: welke soorten vegetatie zijn geschikt voor de genoemde toepassingen?*

→ *Kennisvraag 7: Welke scenario's zijn denkbaar waarbij, door calamiteiten (bijvoorbeeld vraat, brand, ziekte etc.) de vegetatie niet zijn primaire taak kan vervullen, hoe groot is de kans daarop en welke maatregelen kunnen dan worden getroffen?*

→ *Kennisvraag 8: In hoeverre is er draagvlak voor deze innovaties?*

7.2 Hoe kunnen de kennisvragen worden opgepakt?

→ *Kennisvraag 1: Hoe mag de invloed van de vegetatie op de hydraulische belastingen in rekening worden gebracht in ontwerp en beoordeling (toetsing) van de dijk?*

Inhoudelijk gezien is deze kennisvraag voor vegetatie voor de dijk en vegetatie op de dijk zeer verschillend.

Met betrekking tot vegetatie op voorlanden zijn er verschillende modellen en lopende studies waarmee de invloed van vegetatie voor de dijk op de golfbelasting tot op zekere hoogte kan worden bepaald (zie Paragraaf 2.2). In hoeverre die modellen betrouwbaar zijn zal per casus beschouwd dienen te worden.

Er zijn mogelijk toekomstige studies welke gaan bijdragen aan dit vraagstuk. Zo wordt er een STW voorstel voorbereid waarbij mogelijk de demping van golven door wilgen wordt onderzocht in een grootschalige golfgoet. Tevens wordt er een Europees voorstel voorbereid met betrekking tot golfdemping door vegetatie.

Met betrekking tot vegetatie op de dijk zijn er geen modellen, lopende studies of toekomstige studies bekend waarbij de invloed van vegetatie op de dijk op het golfoverslaggebied wordt bepaald. Aangezien deze kwantificering wettelijk verplicht is alvorens dit mag worden toegepast wordt aanbevolen om hier nader onderzoek naar te verrichten. Hierbij kan een analogie worden gemaakt naar ruwheden van 'harde' bekledingen. De ruwheden worden doorgaans empirisch bepaald door middel van onderzoek in golfgoten. Een nadere uitwerking hoe dit kan worden gedaan is weergegeven in Bijlage C.

→ *Kennisvraag 2: Hoe kan er met voldoende zekerheid worden aangetoond dat er in extreme situaties voldoende weerstand is tegen ongewenste vormverandering of degeneratie van de vegetatie op zowel korte tijdschaal (duur van de storm) en lange tijdschaal?*

Aanbevolen wordt om hier een bureaustudie naar uit te voeren. Daarnaast is goede benchmark data nodig. De benchmarkdata kan worden verkregen uit bestaande kennis (bijvoorbeeld kennis met betrekking tot degeneratie door ziekte, brand, etc) of door proeven uit te voeren in het veld of in een golfgoot (bij hydraulische belasting).

→ *Kennisvraag 3: Hoe kan worden aangetoond dat de vegetatie geen relevante invloed heeft op de waterkerende functie van andere keringsonderdelen?*

Deze kennisvraag kan worden beantwoord door een bureaustudie uit te voeren. Hierbij verdient het de voorkeur om een analogie te maken met de systematiek van het WBI 2017 (bijvoorbeeld het gebruik van een foutenboom of de bekende faalmechanismen)

→ *Kennisvraag 4: Welke factoren dragen bij aan de verwachte kosten in de verschillende stadia (aanleg, onderhoud, verwijderbaarheid) conform de life cycle systematiek en hoe verhoudt dit zich tot traditionele alternatieven zoals bijvoorbeeld een dijkverhoging?*

Deze kennisvraag kan worden beantwoord door een bureaustudie uit te voeren. Hierbij dient een analogie te worden gemaakt met kennis over onderhoudskosten van vegetatie in bestaande toepassingen bij waterkeringen (bijvoorbeeld Fort Steurgat, zie Paragraaf 2.2.2 of de kennis over grasbekledingen) of andere toepassingen (bijvoorbeeld bosbeheerders).

→ *Kennisvraag 5: Welke aanvullende eisen worden aan vegetatie, welke primair voor waterveiligheid is bedoeld, gesteld zodat deze recreatieve en / of ecologische voordelen hebben?*

Deze kennisvraag kan worden beantwoord door een bureaustudie uit te voeren. Het kan hierbij erg helpen om specifieke, al dan niet fictieve cases, te beschouwen.

→ *Kennisvraag 6: Welke soorten vegetatie zijn geschikt voor de genoemde toepassingen?*

Deze kennisvraag kan worden beantwoord door allereerst een bureaustudie uit te voeren. Hierbij is het van belang dat er een plantenkundige wordt betrokken die, aan de hand van de gestelde eisen en wensen, vegetatie kan suggereren welke geschikt zijn voor de beoogde toepassing. Het resultaat van deze voorstudie is een voorselectie van mogelijke vegetatiesoorten. Een uiteindelijke selectie dient plaats te vinden op basis van ervaringen welke in de praktijk zijn opgedaan (bijvoorbeeld een pilot in het veld of een proef in een golfgoot).

→ *Kennisvraag 7: Welke scenario's zijn denkbaar waarbij, door calamiteiten (bijvoorbeeld vraat, brand, ziekte et cetera) de vegetatie niet zijn primaire taak kan vervullen, hoe groot is de kans daarop en welke maatregelen (in ontwerp en beheer) kunnen dan worden getroffen?*

Deze kennisvraag kan worden beantwoord door een bureaustudie uit te voeren.

→ *Kennisvraag 8: In hoeverre is er draagvlak voor deze innovaties?*

Om te inventariseren of er draagvlak voor deze innovaties is, kunnen de relevante stakeholders worden geïnterviewd. Dit zijn voor de Nederlandse situatie voornamelijk de beheerders (Waterschappen en Rijkswaterstaat) en omwonenden.

In dit interview kan bijvoorbeeld worden gevraagd wat men als voordelen en nadelen ziet en welke vragen er bij de dijkbeheerders en omwonende omtrent dit onderwerp.

8 Literatuur

EurOtop, 2007

Wave overtopping of Sea Defences and Related Structures:
Assessment Manual, August 2007.

Hu, Z., 2015

Tidal flat landscape formation and evolution
doctoral thesis, Delft, University of Technology, ISBN. 978-90-6562-3782.
Doi: [10.4233/uuid:8615fc47-4c17-4f41-8456-4b042bdf526d](https://doi.org/10.4233/uuid:8615fc47-4c17-4f41-8456-4b042bdf526d)

Klijn, Frans, en Maaïke Maarse (2015)

Wat te doen tegen de toename van overstromingsrisico's in de toekomst?
Kennis voor klimaat
Stowa, rapport 33, ISBN 978-90-5773-721-3, oktober 2015

Möller, I, et al (2006)

Quantifying saltmarsh vegetation and its effect on wave height dissipation: Results from a UK
East coast saltmarsh
Elsevier Coastal & Shelf science, 69 (2016) 337–351

Möller, I, et al (2014a)

Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions
Nature Geoscience 7, 727-731 (October 2014)

Möller, I, et al, (2014b).

Wave dissipation and transformation over coastal vegetation under extreme hydrodynamic
loading.
Proceedings of the HYDRALAB IV Joint User Meeting, Lisbon 2014.

Oude, R., 2010.

Modelling wave attenuation by vegetation with SWAN-VEG. Model evaluation and application
to the Noordwaard polder.
University of Twente repository, January 2010.

Rijkswaterstaat, 2015a

Handreiking Dijkbekleding. Deel 1: Algemeen
Januari 2015

Rijkswaterstaat, 2015b

Handreiking Dijkbekledingen. Deel 5: Grasbekledingen
Januari 2015

Smale, A.J., 2016

Vegetatie als maatregel voor reductie benodigde kruinhoogte voor het traject Tiel -
Waardenburg, Deltares rapport 1220539-001-ZWS-0004

TAW (2002)

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

Venema, J.E., H.A. Schelfhout en M.D. van der Meulen (2013)
Toetsmethode griendijk Fort Steurgat
Deltares rapport, 1206002-000-GEO-0009, 3 september 2013

Verheij, H., Sprengers, C., 2012
Quick scan golfremmende vegetatie bij stroomlijn
Deltares rapport, 1206002-000-GEO-005

Vries, M.B. de, Dekker, F., Bijlsma, E., Koning, R. de, 2009
Ontwerp groene golfremmende dijk Fort Steurgat bij Werkendam Verkennende studie,
Deltares rapport Z4832

Mindert de Vries (Deltares)
Frank Dekker (Deltares)
Eric Bijlsma (RWS bouwdienst)
Robbert de Koning (BNT)

Vries, M.B. de, E. Penning, G. van Geest, M. Genseberger, P. van Steeg, J. Morris (2015)
Kwantificering van effect van golfremming door vegetatie op uiterwaarden
Deltares, conceptrapport 1220539-000-ZWS-0006, 1 juni 2015

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

A Wave dissipation by vegetation at the foreshore of a dike

Amaury Camarena Calderon

A.1 Introduction

Wave conditions are one of the main determining factors when required crest height of dikes are assessed. The reduction of wave conditions has a direct effect on the reduction of the required crest height. In this study the effect of vegetation located at the foreshore of the dike is assessed by doing a sensitivity analysis of different vegetation lengths and heights, as well as various wave conditions and drag coefficients.

Wave dissipation by vegetation at the foreshore of a dike

The SWAN-VEG numerical model is used to simulate the wave propagation. The wave conditions at the toe of the dike are used to determine the required crest height assuming an allowable mean wave overtopping discharge.

A.2 Methodology

In order to acquire some insight on how the vegetation placed in the foreshore of a dike affects the wave conditions approaching a dike and subsequently the reduction of the required crest height; the SWAN-VEG wave model was implemented and coupled with the TAW (2002) equations in order to calculate transformed wave conditions given different input conditions and their corresponding required crest height.

Table 8.1 Wave and vegetation input parameters for SWAN-VEG model.

Significant wave height [m]	Peak wave period [s]	Wave steepness [%]	Wave length [m]	Vegetation height [m]	Vegetation length [m]
1.0	4.0	4.0	25	[0, 1, 2, 3, 4, 5]	6.25
					12.5
					18.75
					25
					50
					100
					200
1.0	5.6	2.0	50	[0, 1, 2, 3, 4, 5]	12.5
					25
					37.5
					50
					100
					200
1.0	8.0	1.0	100	[0, 1, 2, 3, 4, 5]	25
					50
					75
					100
					200
					400
					800

The table shows the different input combinations that were used to create a matrix of results from SWAN-VEG and PC-Overtop. The matrix contains 126 combinations of input conditions.

The vegetation lengths that were assessed were defined based on the wave length of each of the cases. Ratios between wave length and vegetation length $L_{m-1,0}$ and vegetation length L_{veg} were defined as follows:

$$L_{veg} / L_{m-1,0} = [0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00].$$

The properties of the vegetation that were implemented in SWAN-VEG were selected based on previous studies (Möller et al 2014a and Möller et al 2014b). The vegetation diameter that was used for all computations was $V_{diameter} = 0.00125$ m, the vegetation density $V_{density} = 1225$ vegetation stems / m². Note that only the product of these is relevant for the results, meaning that the calculation results will be the same for $V_{diameter} = 0.125$ m and vegetation density $V_{density} = 12.25$ stems / m². The drag coefficient $C_D = [0.09, 0.19, 0.29, 0.39]$ is another input parameter that has to be provided to SWAN-VEG, given the fact that large difference were found in literature, four different drag coefficients were used for the computations, all ranging within the recommended values in literature (Möller et al 2014a and Möller et al 2014b). As mentioned before in this study the sensitivity of the drag coefficient was analysed, another way to get some insight on how the model interprets the input is by using the vegetation parameter (V), which depends directly in the relation given by the drag coefficient (C_d), the vegetation density ($V_{density}$) and the vegetation diameter $V_{diameter}$ as shown in the following formula:

$$V = C_d \cdot V_{diameter} \cdot V_{density} \quad (1.1)$$

In total 126 conditions were computed using four different drag coefficients, providing a data set of 504 combinations of conditions for which the wave transformation and required crest height was calculated.

A.3 Wave conditions behind the forest

The results of each set of conditions was summarized for analysis in Figure 8.1, Figure 8.2, Figure 8.3 and Figure 8.4, these figures show the relative reduction of the wave height with respect to the vegetation length, given different input wave conditions and vegetation heights. The wave conditions corresponding to steepness of 4% are shown in solid lines with square markers, 2% is plotted with solid line and circle markers, and lastly the dashed line shows the results corresponding to the waves with 1% steepness. Each of the colours represents the vegetation height.

The implementation of the vegetation module in SWAN is verified by comparing the output of the original SWAN model with the SWAN-VEG model keeping the dissipation term 0 (no vegetation). Since both simulations give identical results, the (vegetation) module does not influence the original model.

The model settings were also checked to see the effect of wave breaking and bottom friction. When bottom friction was set equal to zero, the breaking of waves was only observed for the steeper waves, while the 1% and 2% steepness wave remained unchanged while propagation through the foreshore. Bottom friction was kept as the default value in the model which is $C_f = 0.038$.

This plot was reproduced for the four different drag coefficients (0.09, 0.19, 0.29 and 0.39). It can be deduced that the higher the drag coefficient the higher the wave reduction. Likewise, the longer the wave vegetation foreshore the higher wave reduction.

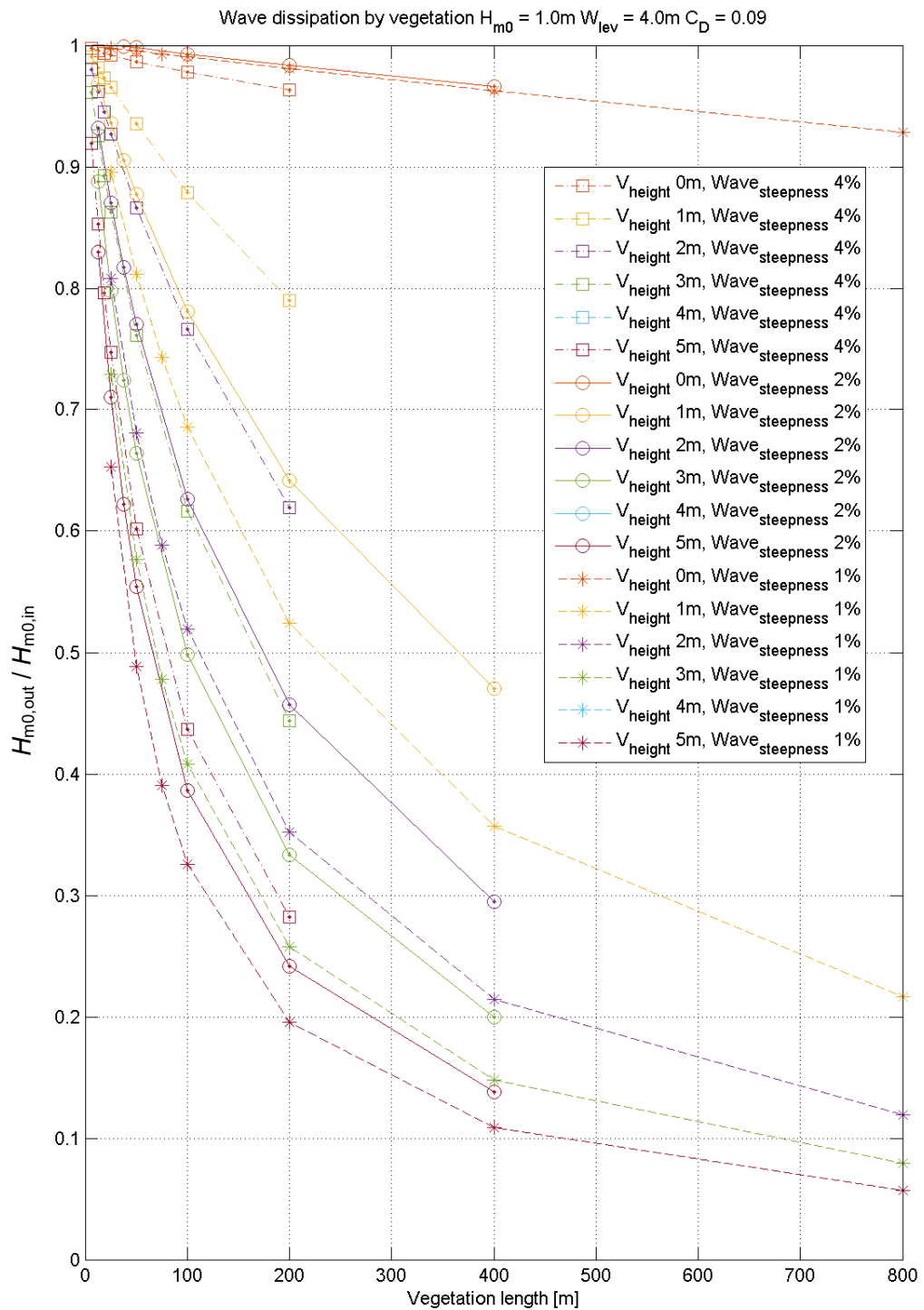


Figure 8.1 Relative wave dissipation by vegetation. Drag coefficient = 0.09.

This study considered vegetation heights of 4m and 5m, the water level for the computations was set to 4m, the results show that additional vegetation (higher than the water level), has no effect for wave dissipation.

In general the longer waves (steepness of 1%), are reduced more by the existence of vegetation, the only case where this does not stand, is for the case with 0m height of

vegetation (no vegetation) where wave breaking of the steeper waves (4%) causes more wave reduction than the bottom friction and drag caused by the vegetation (as vegetation is not present). As the vegetation grows in height throughout the testing is clear that the wave dissipation by the vegetation becomes the main constituent influencing the wave reduction and wave breaking and the normal friction coefficient implemented in SWAN-VEG become secondary constituents. This is in line with the study by Oude (2010), where it was concluded that “for waves with a larger wave height relative more energy dissipation occurs than for smaller waves. The same accounts for the wave peak period, waves with a longer peak period will experience more energy dissipation what results in less reduction of the group velocity and a lower wave height behind the vegetation than for waves with a shorter wave period.”

One important remark is that for waves with a peak wave period lower than two seconds, as results show very large dissipation rates.

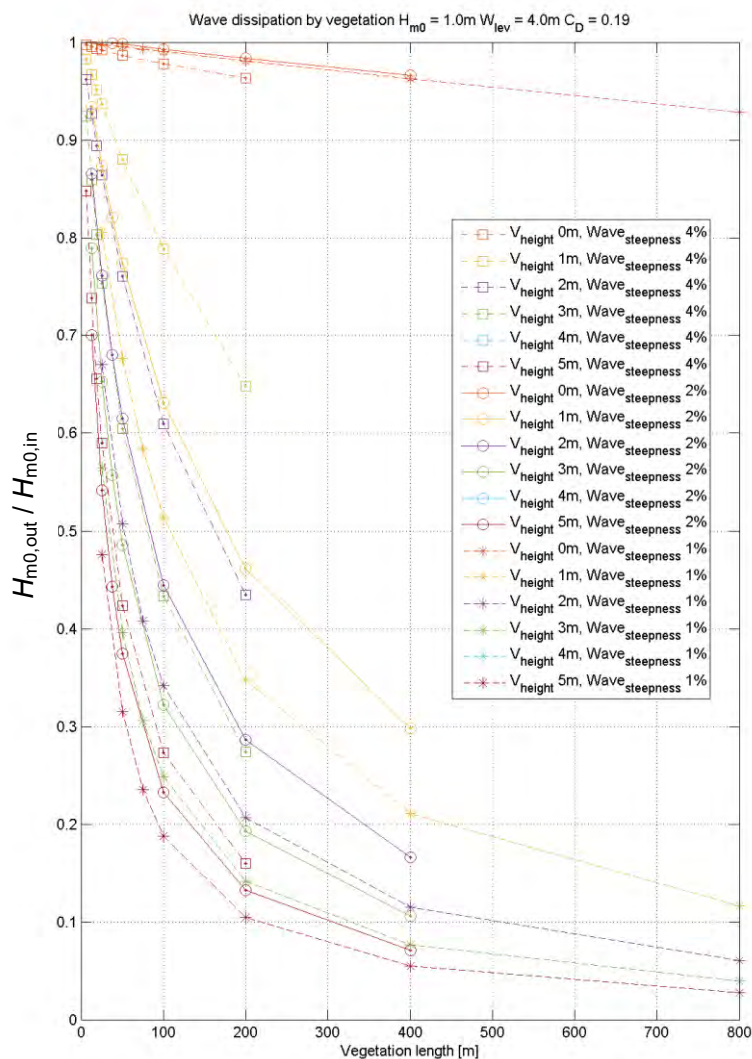


Figure 8.2 Relative wave dissipation by vegetation. Drag coefficient = 0.19.

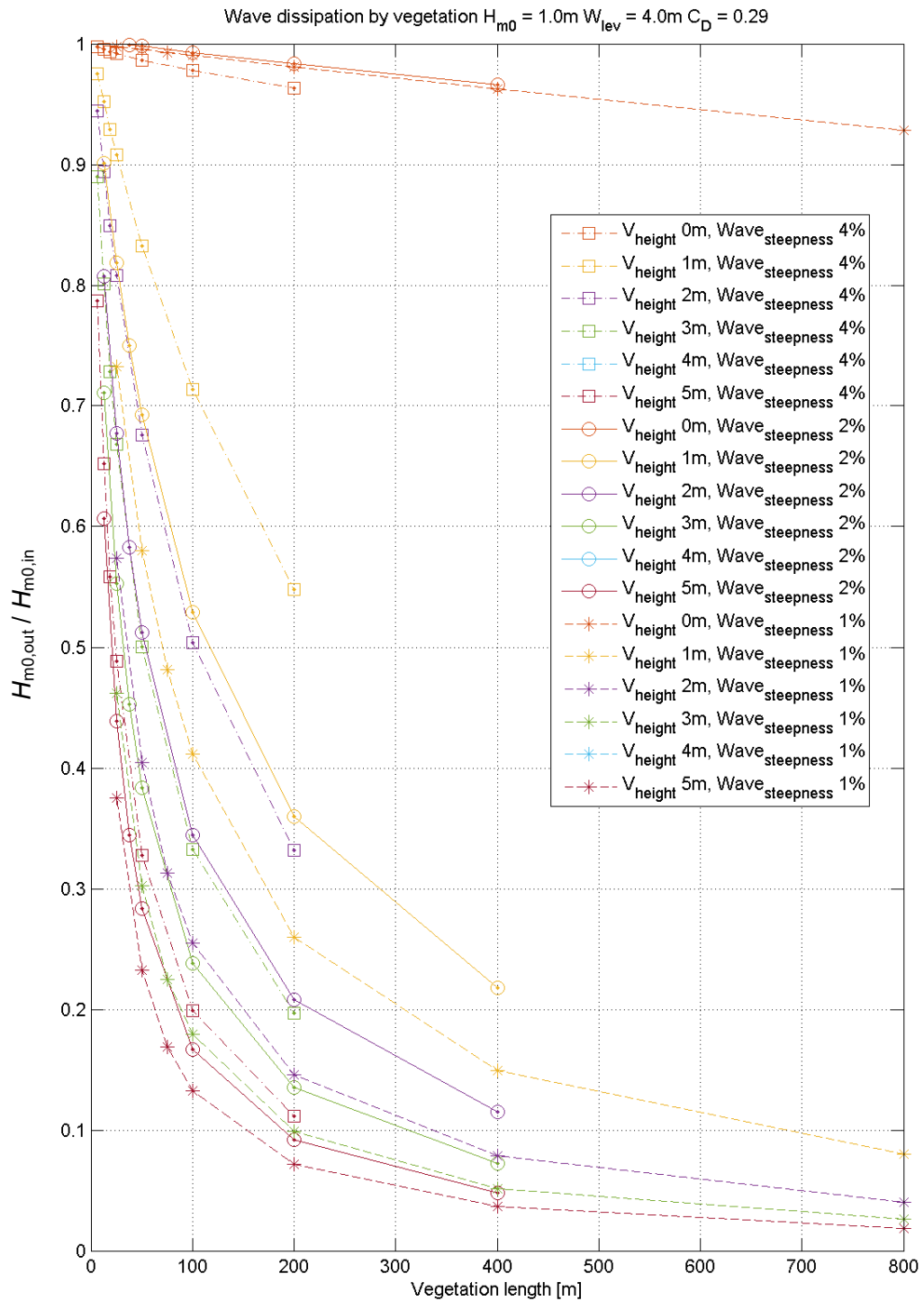


Figure 8.3 Relative wave dissipation by vegetation. Drag coefficient = 0.29.

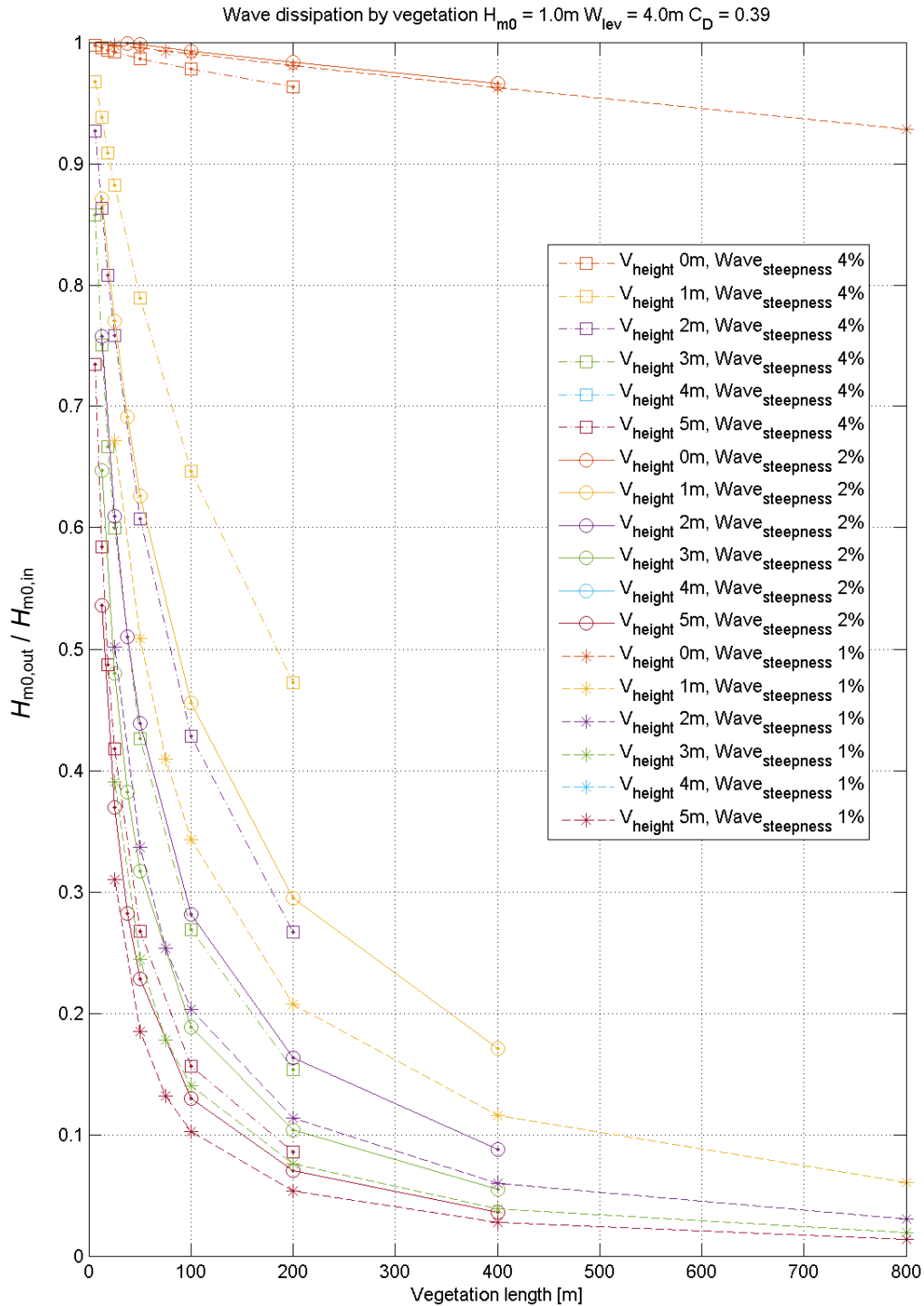


Figure 8.4 Relative wave dissipation by vegetation. Drag coefficient = 0.39.

A.4 Required crest height

The required crest height was calculated for each of the resulting wave conditions shown in the previous Section (shown in Figure 8.5, Figure 8.6, Figure 8.7 and Figure 8.8). In order to have an idea of what the effect of the vegetation is, the calculated required crest height of each of the input combinations is compared to its original required crest height with the case of no vegetation. The reference cases that are used for comparison are shown in Table 8.2.

Table 8.2 Reference input conditions for required crest height calculations.

Significant wave height [m]	Peak wave period [s]	Steepness [%]	Wave length [m]	Required crest height [m]	Overtopping limit [l/s/m]
1.0	4.0	4	25	2.2	1.0
1.0	5.6	2	50	2.8	1.0
1.0	8.0	1	100	2.8	1.0

The required crest height was calculated based on the EuroTop guidelines, shown in Appendix B. The implementation of the PC-Overtop equations is verified by comparing the output of a number of cases using the standalone application with the results obtained in this study (where the PC-Overtop equations were automated to use them in MATLAB). As the results were identical, the proper implementation was verified.

Results shown in Figure 8.5, Figure 8.6, Figure 8.7 and Figure 8.8, show that as the vegetation grows in height and length the difference in required crest height (compared to the reference case) is larger. It can also be seen that at the first 50-100 meters there are very steep changes on the required crest height and that at some point ~300-400 meters vegetation becomes less efficient, mainly due to the fact that wave conditions are already too low and consequently the absolute reduction in crest height is not too large.

As mentioned before, longer waves feel the effect of the vegetation to a larger extent, thus, more energy is dissipated while the wave travels along the vegetated foreshore. As a result, the difference in required crest height is also larger for the longer waves than the shorter waves with the same significant wave height. Longer waves are represented by the dashed line with the * markers in the plots and correspond to the wave steepness of 1%, shorter waves are represented by the semi-dashed line with square markers and correspond to a wave steepness of 4%.

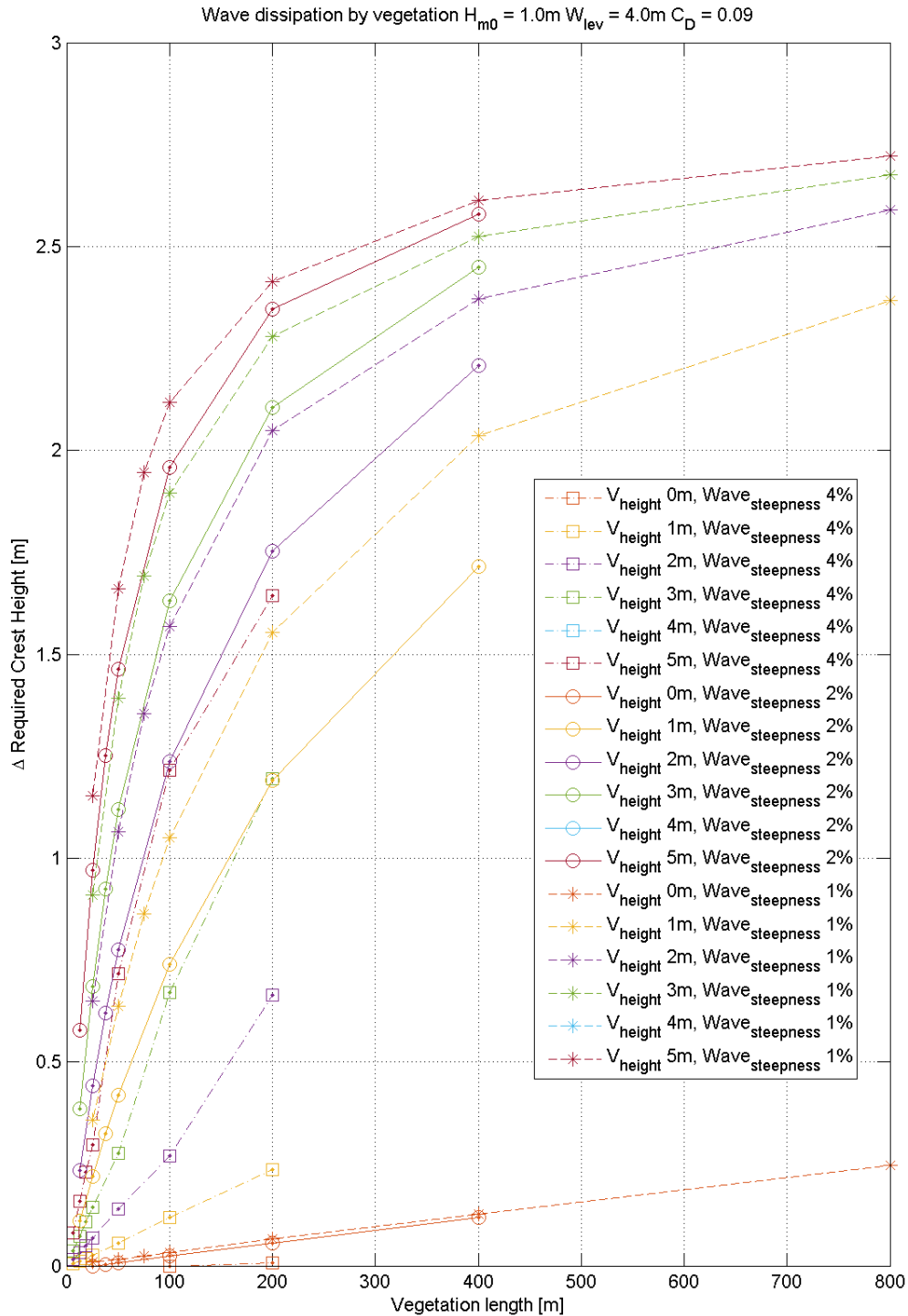


Figure 8.5 Absolute difference in required crest height (reference required crest height – calculated required crest height). Drag coefficient = 0.09.

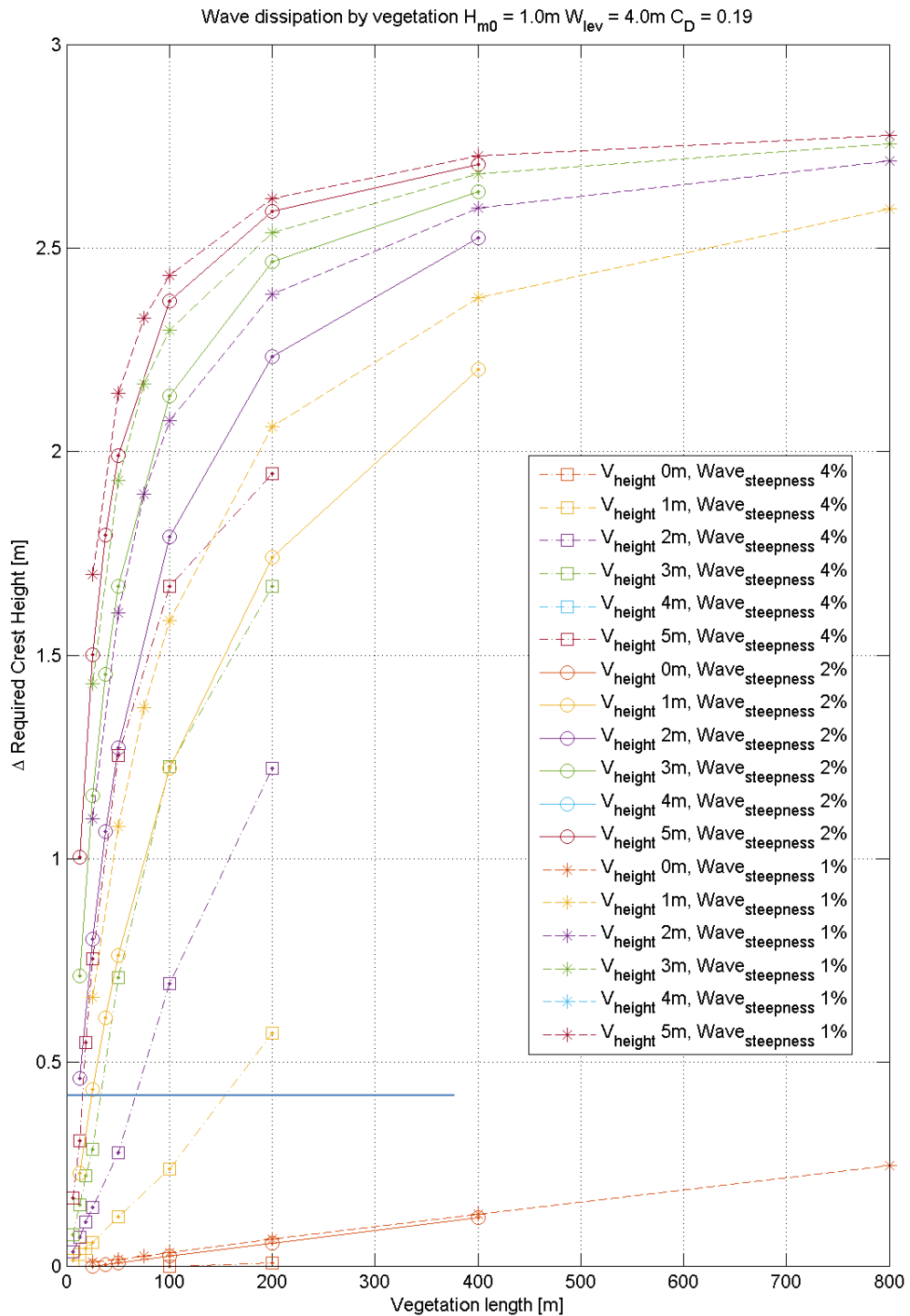


Figure 8.6 Absolute difference in required crest height (reference required crest height – calculated required crest height). Drag coefficient = 0.19.

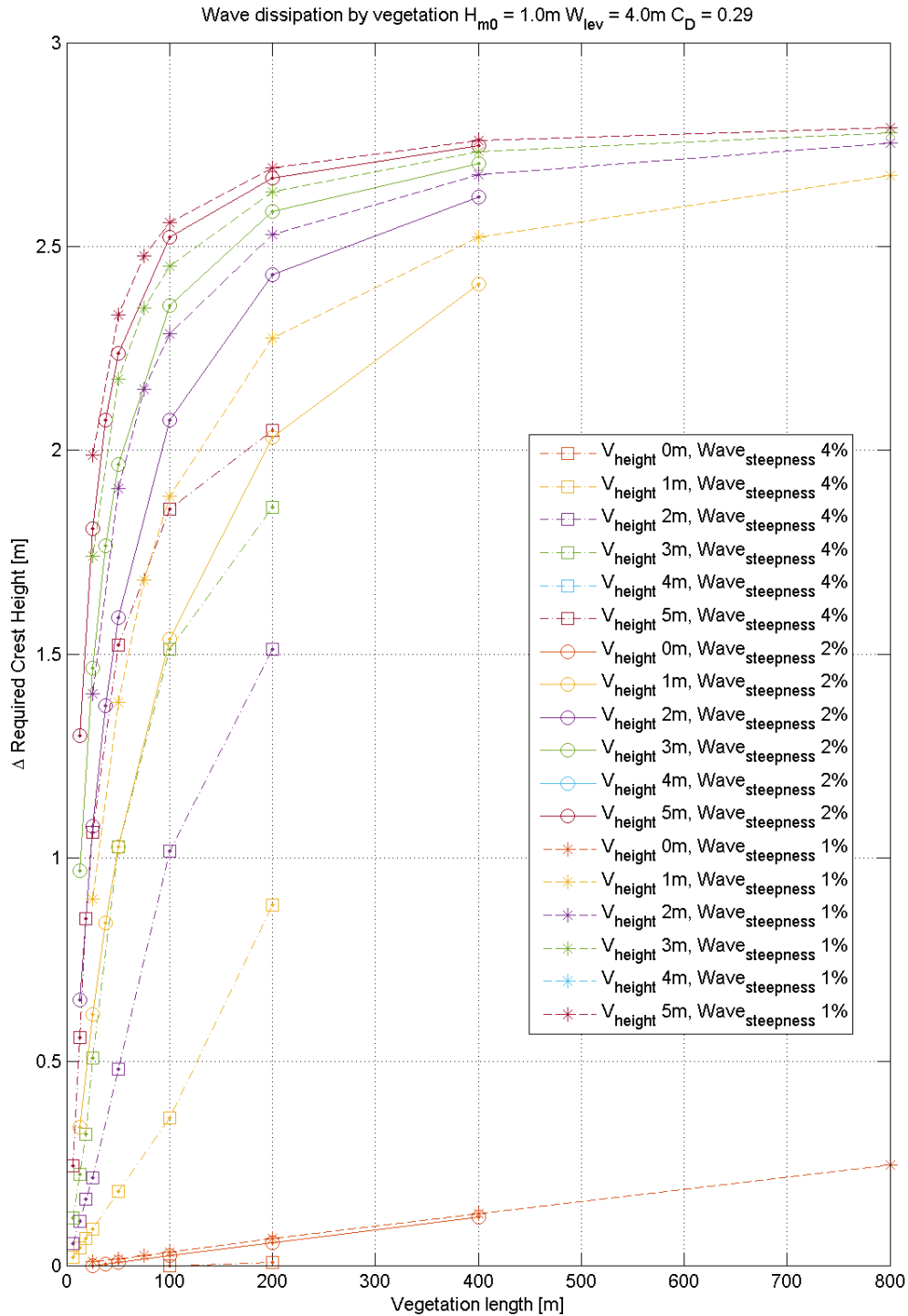


Figure 8.7 Absolute difference in required crest height (reference required crest height – calculated required crest height. Drag coefficient = 0.29.

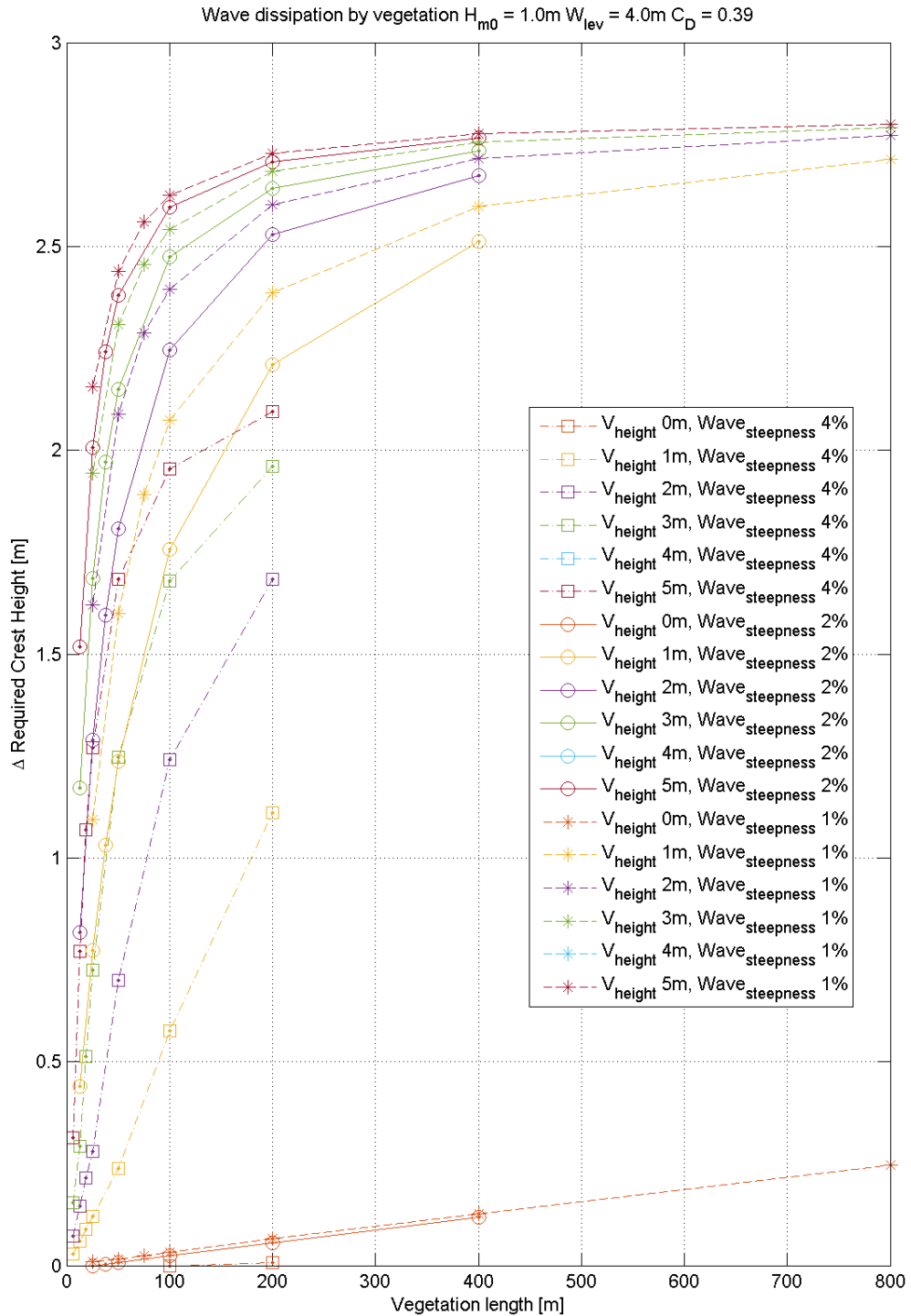


Figure 8.8 Absolute difference in required crest height (reference required crest height – calculated required crest height. Drag coefficient = 0.39.

A.5 Conclusions

As shown in the results of this study, dissipation rates can vary a lot depending on the vegetation characteristics (height, length) and drag coefficient defined as input conditions.

Wave steepness is also an important parameter; this is concluded as the longer waves show larger dissipation rates in comparison with the steeper shorter waves. It was also found that wave breaking can dissipate some of the energy especially for steeper waves (4% and higher). The effect of wave breaking on less steep waves was almost negligible based on the results of this study.

Wave conditions have a direct effect on the required crest height; this might cause large differences in the final design of a dike.

One limitation of the SWAN-VEG model is that the drag coefficient stays constant along the entire vegetation foreshore, which in reality might vary. One additional constraint is that the SWAN-VEG model does not take into account the vegetation above the water line, which in reality will also affect the wave propagation.

B Influence of wave conditions on required crest height

This Appendix describes the influence of wave conditions on the required crest height of a simple dike having a uniform slope and uniform roughness.

Technical background

Use is made of Eurotop (2007) to determine the required crest height given certain hydraulic boundary conditions, geometric properties of the dike and allowable average wave overtopping discharge.

The average wave overtopping discharge is given by the following set of formulas:

For $\xi_{m-1,0} < 5$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot e^{-a \cdot \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}} \quad (2.1)$$

With a maximum of

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.2 \cdot e^{-b \cdot \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}} \quad (2.2)$$

For $\xi_{m-1,0} > 7$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 10^c \cdot e^{-\frac{R_c}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot H_{m0} \cdot (0.33 + 0.022 \cdot \xi_{m-1,0})}} \quad (2.3)$$

Where

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{m-1,0}}} \quad (2.4)$$

$$s_{m-1,0} = \frac{H_{m0}}{L_{m-1,0}} \quad (2.5)$$

$$L_{m-1,0} = \frac{g \cdot T_{m-1,0}^2}{2\pi} \quad (2.6)$$

Tabel 1: overview of coefficients a, b, c

coefficient	μ	σ	Design value
a	4.75	0.5	4.3
b	2.6	0.35	2.3
c	-0.92	0.24	-0.68

With

a	= coefficient	
b	= coefficient	
c	= coefficient	
H_{m0}	= spectral significant wave height at the toe of the structure	(m)
g	= acceleration due to gravity	(m/s ²)
$L_{m-1,0}$	= wave length on deep water based on $T_{m-1,0}$	(m)
q	= average wave overtopping discharge	(m ³ /s/m)
R_c	= crest height relative to still water line	(m)
$S_{m-1,0}$	= wave steepness based on spectral wave period $T_{m-1,0}$	(-)
$T_{m-1,0}$	= spectral wave period	(s)
α	= slope angle	(°)
γ_f	= influence factor for roughness elements on a slope	(-)
γ_b	= influence factor for a berm	(-)
γ_v	= influence factor for crest elements	(-)
γ_β	= influence factor for oblique wave attack	(-)
$\xi_{m-1,0}$	= breaker parameter	(-)

To determine the required crest height, Eq. (2.1), Eq. (2.2), and Eq. (2.3) can be rewritten as:

For $\xi_{m-1,0} < 5$

$$R_c = \frac{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}{-a} \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} \cdot \frac{\sqrt{\tan \alpha}}{0.067} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0}} \right) \quad (2.7)$$

$$R_c = \frac{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}{-b} \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} \cdot \frac{1}{0.2} \right) \quad (2.8)$$

For $\xi_{m-1,0} > 7$

$$R_c = -\gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot H_{m0} \cdot (0.33 + 0.022 \cdot \xi_{m-1,0}) \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} \cdot \frac{1}{10^c} \right) \quad (2.9)$$

For $5 \leq \xi_{m-1,0} \leq 7$ a linear interpolation between Eq. (2.7) / Eq. (2.8) and Eq. (2.9) is recommended.

A 'standard' case

A standard case of a simple dike is assumed. This dike has the following characteristics:

- Seaward slope angle $\tan \alpha$ = 0.333 (1:3 slope)
- No berms γ_b = 1.0
- Perpendicular wave attack γ_β = 1.0
- No crest elements γ_v = 1.0
- No roughness at outer slope γ_f = 1.0 (e.g. asphalt or grass)
- Design value $\{a, b, c\}$ = {4.3; 2.3; -0.68}

Example

Suppose the standard case as described in the previous paragraph. Two situations are considered:

- Case 1: no vegetation
- Case 2: with vegetation leading to a reduced wave height

Case 1

The wave conditions are:

- significant wave height at the toe of the dike $H_{m0} = 1.0$ m
- spectral wave period $T_{m-1,0} = 4.0$ s

This results in

- wave steepness (Eq. (2.5)) $S_{m-1,0} = 0.040$
- breaker parameter (Eq. (2.4)) $\xi_{m-1,0} = 1.67$

The accepted wave overtopping discharge is $q_{\text{accepted}} = 0.001$ m³/s/m

Which results in

- crest height (Eq. (2.7)) $R_c = 2.48$ m
- crest height (Eq. (2.8)) $R_c = 2.80$ m

Checking with Eq. (2.1) and (2.2) shows that Eq. (2.1) (and thus Eq. (2.7)) should be used resulting in a required crest height of $R_c = 2.48$ m.

Case 2

Suppose vegetation is placed in front of the dike leading to the following adapted conditions at the toe of the structure:

- significant wave height at the toe of the dike $H_{m0} = 0.6$ m
- spectral wave period $T_{m-1,0} = 4.0$ s (equal to Case 1)

Note that in this case it is assumed that the vegetation has no influence on the spectral wave period. This might not be the case in reality.

This results in

- wave steepness $S_{m-1,0} = 0.024$
- breaker parameter $\xi_{m-1,0} = 2.15$

The accepted wave overtopping discharge is $q_{\text{accepted}} = 0.001$ m³/s/m

Which results in

- crest height (Eq. (2.7)) $R_c = 1.77$ m
- crest height (Eq. (2.8)) $R_c = 1.48$ m

Checking with Eq. (2.1) and (2.2) gives a preference for Eq. (2.2) (and thus Eq. (2.8)) resulting in a required crest height of $R_c = 1.48$ m.

Influence of vegetation in Case 1 and Case 2

The influence of the vegetation expressed in reduction of required crest height of the dike is thus

$$\Delta R_c = 2.48 \text{ m} - 1.48 \text{ m} = 1.00 \text{ m}.$$

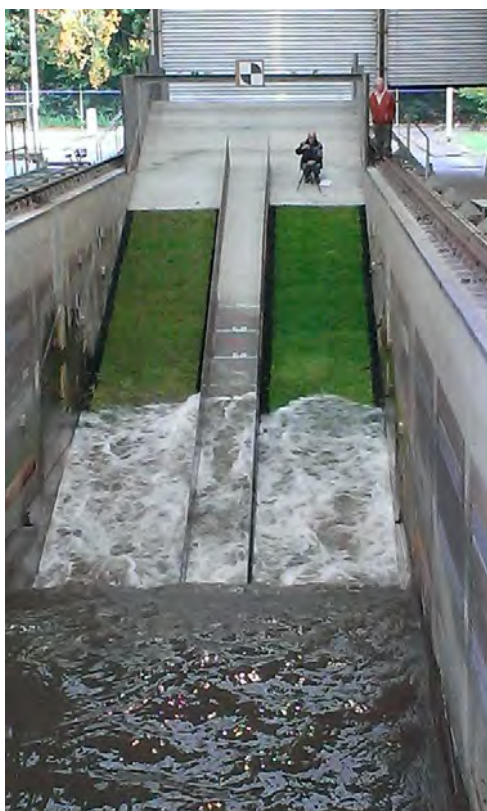
Note that this value is different for other values of H_{m0} , $T_{m-1,0}$, γ_f , γ_b , γ_v , γ_β , α and q_{accepted} .

For simplicity reasons the effects of settlement, compaction, local ground subsidence during design period, sea level rise during design period et cetera are not taken into account in this example.

C Projectvoorstel kwantificeren effect vegetatie in golfloopzone

In Hoofdstuk 6 is beschreven dat er een grote onzekerheid is over de golfloopremmende werking en standzekerheid van vegetatie in de golfloopzone. Om hier een beter inzicht in te krijgen is empirische data benodigd. In deze paragraaf wordt beschreven hoe deze data kan worden ingewonnen.

Doorgaans wordt dergelijke empirische data ingewonnen met onderzoek in golfgoten. In deze golfgoten kunnen golven worden opgewekt en kunnen hydraulische en constructieve aspecten worden getest onder gecontroleerde omstandigheden. In sommige gevallen kunnen dergelijke experimenten op schaal (bijvoorbeeld 1:20 of 1:50) worden uitgevoerd. Een voorwaarde hiervoor is dat er een grondig begrip is voor de correcte schaling van de fysische verschijnselen. In andere gevallen is schaling niet mogelijk en zijn relatief grote golfgoten zoals de Deltagoot nodig. In het geval van vegetatie in de golfloopzone is schaling niet goed mogelijk en wordt onderzoek in een grootschalige golfgoot aanbevolen.

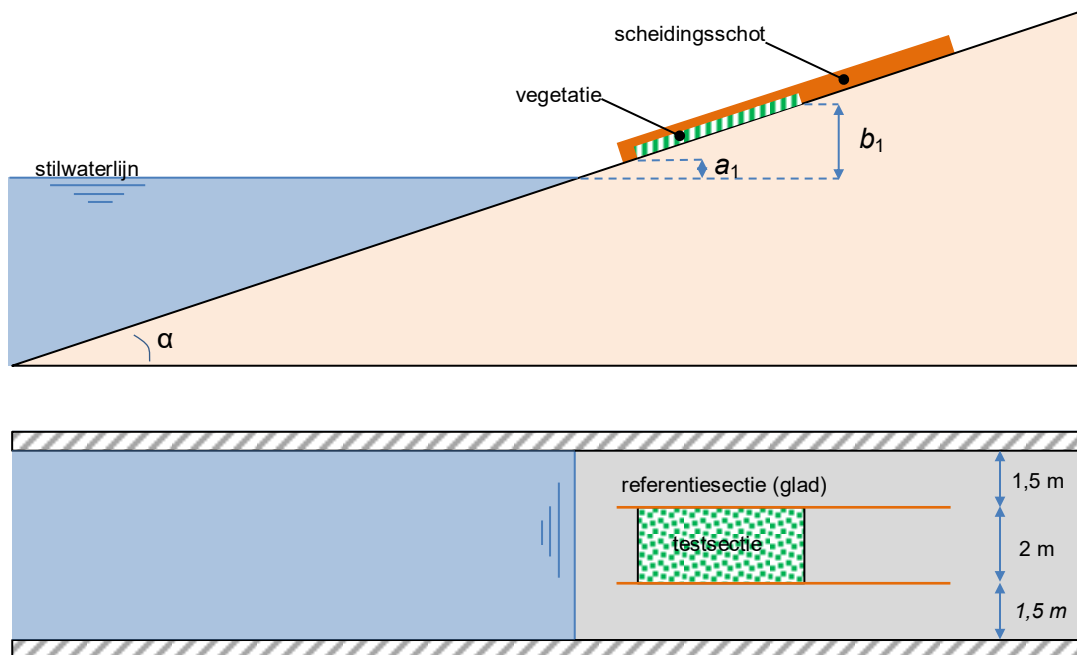


Figuur 8.9 Impressie van een golfloopmeting in de Deltagoot bij grasbekledingen

Het primaire doel van het voorgestelde onderzoek is om de invloed van de vegetatie op de golfloop en golfoverslag te bepalen. Hiertoe wordt een opstelling voorgesteld zoals deze is weergegeven in de onderstaande figuur.

De proefopstelling zoals hierboven gegeven geeft slechts een indicatie. In een latere fase kan deze gewijzigd worden.

De proefopstelling bestaat uit twee gedeelten: de werkelijke testsectie en een referentiesectie met een glad talud. Het laatste is vrij gebruikelijk bij golfoploop en golfoverslagmetingen en dient om een goede referentiemeting te verkrijgen waarbij geen vegetatie aanwezig is. De testsectie en de referentiesectie worden gescheiden door een houten schot (oranje lijn).



Figuur 8.10 Schematische weergave voorgestelde proefopstelling (dwarsdoorsnede en bovenaanzicht)

De taludhelling α is inhoudelijk gezien niet van groot belang. Deze dient te liggen tussen circa 1:4 en 1:2.5 (conform Nederlandse dijken). In de praktijk ligt er vrijwel altijd een talud in de Deltagoot. Om significante kosten te besparen wordt voorgesteld om het al bestaande talud in de Deltagoot te gebruiken. Dat talud bepaald in dat geval dus ook de taludhelling. Er wordt vooralsnog aangenomen dat er een 1:3 talud in de goot beschikbaar is.

De breedte (haaks op de as van de golfgoet) van de testsectie is 2 m. Dit is een afdoende breedte voor een dergelijke meting. De breedte van de referentiesectie is 1,5 m.

De vegetatie wordt geplaatst op een hoogte van $0,5 \cdot H_{m0}$ boven de stilwaterlijn (bij $H_s = 1,0$ m is de waarde van deze hoogte dus $a_1 = 0,5$ m). Op deze manier ligt de vegetatie niet in de golfklapzone en wordt beschadiging van de vegetatie door golfklappen voorkomen.

De vegetatie loopt door tot een hoogte van 2 m boven de stilwaterlijn. De 2% golfoploophoogte bij een 1:3 talud met een ruwheid van 0,8 ($H_{m0} = 1,0$ m, $s_{m-1,0} = 0,04$) is gelijk aan 2,2 m. De 2% golfoploophoogte komt dus volgens deze schematisatie net boven de vegetatie uit (en is dus goed meetbaar).

De totale lengte van de vegetatie (gemeten parallel aan het talud) is dan bij een 1:3 talud gelijk aan 4,74 m. Bij een breedte van 2 m is dit dus $9,5 \text{ m}^2$ vegetatie welke aangebracht dient te worden. Bij de toepassing van ligusterhaag kunnen circa vier heggen geplaatst worden.

De 'dikte' van de vegetatie wordt zodanig gekozen dat deze gelijk is aan de te verwachten dikte van de golfplooptong. Bij $H_{m0} = 1$ m en $s_{m-1,0} = 0,04$ is de dikte van de oplooptong welke door 2% van de golven wordt overschreden gelijk aan circa 30 cm (bij begin van vegetatie) en neemt af tot circa 3 cm (bij eind van de vegetatie). De benodigde dikte van de vegetatie wordt geschat op tenminste 15 a 25 cm. Als gekozen wordt voor ligusterheggen, dan wordt aanbevolen een hoogte van 50 cm aan te houden.

Het proevenprogramma wordt zodanig ingericht dat er geen tussentijdse (kostbare) verbouwingen noodzakelijk zijn. Er wordt dus eenmalig een proefopstelling gebouwd en deze wordt aan een reeks testen onderworpen. Negen testen zijn voorzien waarbij de golfsteilheid wordt gevarieerd ($s_{m-1,0} = 1\%$, 2% , 4%) en waarbij de golfhoogte wordt gevarieerd ($H_{m0} = 0,75$ m, $1,0$ m en $1,25$ m, zoals in werkelijkheid in extreme omstandigheden in het beneden-rivierengebied kan voorkomen). Er kan worden overwogen om een aantal te testen te herhalen met een aangepaste vegetatie (bijvoorbeeld een kleiner oppervlak bedekken met vegetatie).

Tabel 8.3 Voorbeeld proevenprogramma waarbij H_{m0} (0,75 m, 1,00 m, 1,25 m) en $s_{m-1,0}$ (1%, 2%, 3%) worden gevarieerd

Proef	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	$s_{m-1,0}$ (-)	$\xi_{m-1,0}$ (-)	N (-)	$z_{2\%,\text{glad}}$ (m)
1	0.75	6.93	0.010	3.33	1000	4.13
2	0.75	4.90	0.020	2.36	1000	3.02
3	0.75	3.47	0.040	1.67	1000	2.84
4	1.00	8.00	0.010	3.33	1000	5.50
5	1.00	5.66	0.020	2.36	1000	3.89
6	1.00	4.00	0.040	1.67	1000	2.84
7	1.25	8.95	0.010	3.33	1000	6.88
8	1.25	6.33	0.020	2.36	1000	4.86
9	1.25	4.47	0.040	1.67	1000	3.44

De volgende metingen worden uitgevoerd:

- Golfhoogtemetingen teneinde de inkomende golfcondities te bepalen.
- Golfploopmetingen teneinde de golfploophoogte te bepalen. Door de golfploophoogte van de testsectie te vergelijken met de golfploophoogte van de referentiesectie kan de invloedsfactor voor ruwheid (γ_f) worden bepaald. Deze parameter karakteriseert de invloed van de ruwheid van een dijkbekleding.
- Erosie van de ondergrond onder en rond de vegetatie

De golfhoogtemetingen worden uitgevoerd door middel van golfhoogtemeters. De golfploopmetingen en ontgrondingen worden visueel waargenomen. Hiertoe wordt er elke halve meter een horizontale lijnen op het talud geschilderd. Van iedere golfplooptong wordt genoteerd welke lijn wordt overschreden.