



# Effectiviteit van vegetatie op voorlanden

EEN STUDIE NAAR DE GOLFDEMPENDE WERKING VAN HET  
VOORLAND 'NOORDERLEECH'

I.M.H. VAN DER REIJDEN

TU DELFT

APRIL, 2019

 TU Delft

 WETTERSKIP  
FRYSLÂN



# Effectiviteit van vegetatie op voorlanden

Een studie naar de golfdempende werking van het voorland  
'Noarderleech'

Door

I.M.H. van der Reijden

Dit rapport is geschreven ter afronding van het vak CIE4040-09: Internship aan de TU Delft in opdracht van Wetterskip Fryslân

Universiteit:	Technische Universiteit Delft	
Educatieprogramma:	Msc Civiele techniek - Waterbouwkunde	
Studentnummer:	4381254	
Datum:	14 januari 2019 – 18 april 2019	
Begeleiders:	Ir. P. Buring,	Wetterskip Fryslân
	Dr.ir. M. Zijlema,	TU Delft

Het voorblad toont het voorland na de storm van 2006, kijkend richting Ameland



---

## Voorwoord

Dit rapport is het resultaat van een drie maanden durende stage bij Wetterskip Fryslân. Deze stage is onderdeel van de master Civiele techniek: Waterbouwkunde te Delft, waardoor de insteek van het rapport hoofdzakelijk technisch is. De doelgroep bestaat uit technisch onderzoekers, waterschappers en eenieder met interesse in dijkveiligheid en innovatieve oplossingen.

Tijdens deze stage heb ik voor het eerst kennis gemaakt met de werkzaamheden in de praktijk. Voor mijn eigen project heb ik veel technische vaardigheden vanuit de TU kunnen toepassen, wel vanuit een praktische kant. Over andere werkzaamheden binnen het Wetterskip en de gehele organisatiestructuur heb ik de afgelopen maanden veel kunnen leren.

Voor de afronding van dit project wil ik meerdere mensen bedanken. Om te beginnen wil ik mijn dagelijkse begeleider Paul Buring van Wetterskip Fryslân bedanken voor zijn tijd en inzet. Hij heeft mij de ruimte gegeven om zo veel mogelijk aspecten van het werk mee te maken en gezorgd dat ik mij betrokken voelde bij de organisatie. Daarnaast kon ik ieder moment terecht voor vragen of advies over mijn eigen project. Daarop aansluitend bedank ik Vincent Vuik die, ondanks dat hij bezig was met zijn eigen promotie onderzoek, tijd vrij heeft gemaakt om mij te ontvangen en mijn vragen te beantwoorden. Ook bedank ik Wim Ridderinkhof en Emma Sirks van Witteveen+Bos voor respectievelijk uitleg over het model en het uitvoeren van enkele vervolgberekeningen. Verder wil ik nog Marcel Zijlema van de TU Delft bedanken voor de begeleiding. Tot slot bedank ik alle collega's van Wetterskip Fryslân, vrienden en familie bij wie ik over dit onderwerp discussiëren kon en die mij gesteund hebben.

Veel leesplezier,

I.M.H. van der Reijden  
Leeuwarden, april 2019

---

## Samenvatting

Een groot deel van het dijktraject tussen Koehool-Lauwersmeer (KL) aan de Waddenzee voldoet nog niet aan de normering. Zo ook de zogenaamde ‘groene dijk’, welke volledig uit grasbekleding bestaat. Dit dijktraject voldoet niet voor het faalmechanisme Gras Erosie Buitentalud (GEBU), mede door een te hoge hydraulische belasting. Momenteel is Wetterskip Fryslân in de verkenningfase voor dijkversterking van het traject KL, met een totale lengte van ongeveer 50 km. Door de grote omvang van het project geeft dit een uitdagende opgave voor Wetterskip Fryslân.

Voor de groene dijk en omliggende dijkvakken is het voorland ‘Noarderleech’ aanwezig, waarvan in de huidige methodes enkel de verhoogde ligging wordt meegenomen. Uit onderzoek uitgevoerd in de ‘POV Waddenzeedijken: Effectiviteit voorlanden’ is gebleken dat ook de aanwezige vegetatie op voorlanden significante golfdempende werking kan hebben. In dit onderzoek is de opgedane kennis in de POV toegepast voor het voorland Noarderleech. Doordat de hydraulische belasting op de achterliggende dijk wordt gereduceerd, bestaat de kans dat dijkversterking op bepaalde delen kan worden versimpeld of zelfs onnodig blijkt. Dit leidt tot de volgende onderzoeksvraag: *“Wat is het effect van de vegetatie op voorlanden op de golfcondities?”*. Hierbij wordt specifiek naar het voorland Noarderleech gekeken, met de aanwezige vegetatie tijdens de wintermaanden.

Voor het bepalen van het effect van vegetatie is gebruik gemaakt van SWAN versie 41.20AB, waarin een 1D model is opgesteld voor verschillende doorsnedes. Hierbij is de bodemruwheid gevarieerd om de vegetatie te simuleren. Initieel is gekeken naar de gevoeligheid van het model voor de ruwheid. Vervolgens is voor verschillende doorsnedes het profiel opgedeeld in verschillende oppervlaktetypes, waarvoor een representatieve bodemruwheid is bepaald. Hieruit volgt de grootte van de golfhoogtereductie. Tot slot is met de gereduceerde golfhoogte de benodigde dijkhoogte bepaald voor één locatie en voor de totale groene dijk de klei-erosie voor het faalmechanisme GEBU.

Uit de gevoeligheidsanalyse volgt dat het golfdempende effect afvlakt voor hoge ruwheden. Daarnaast zijn de golven over het algemeen diepte-gelimiteerd, waardoor de golfhoogte wordt bepaald door de waterdiepte. De lengte van het voorland is een belangrijke parameter, doordat het bepaald hoelang de golf wordt blootgesteld aan de hogere bodemruwheid. Daarnaast zijn de verlopen voor een kort en lang voorland nagenoeg identiek, waardoor met één profiel een goede inschatting voor de omliggende profielen gemaakt kan worden op basis van de lengte.

Voor de groene dijk geldt dat de golfhoogtereductie door vegetatie in de orde van  $8\% \pm 2\%$  valt. Een reductie van 8% leidt tot 10 cm minder kleilaagerosie. Ondanks dit voldoet de dijk met de huidige methodiek nog niet aan de normering voor GEBU.

Tot slot is ook de op het voorland aanwezige zomerkade in beschouwing genomen. Uit de analyse blijkt dat de golfhoogte bij de achterliggende dijkteen niet meer dan 2% reduceert ten gevolge van de kade. Door de extreme windcondities en een strijklengte van 500-600 m is de golfgroei dusdanig dat het effect van de zomerkade teniet wordt gedaan ter hoogte van de achterliggende dijkteen. Voor een effectieve golfreductie is het dus van belang dat de afstand tot de dijkteen klein is en de kruinhoogte zo groot mogelijk.

Volgend uit dit onderzoek wordt aanbevolen om de invloed van vegetatie op voorlanden, in de vorm van bodemruwheid, mee te nemen in de beoordeling in het geval de primaire kering initieel niet voldoet. Voor het toepassen in de ontwerpfase zijn de mogelijkheden en beperkingen vanuit omgeving en beheer essentieel, waarvoor verder onderzoek wordt aangeraden. Daarnaast wordt onderzoek naar het effect van bodemruwheid op de spectrale periode aanbevolen.

## Inhoud

Voorwoord .....	i
Samenvatting.....	ii
1 Inleiding.....	1
1.1 Achtergrond.....	1
1.2 Aanleiding.....	2
1.3 Doelstelling.....	3
1.4 Werkwijze .....	3
1.5 Leeswijzer .....	3
2 Voorland en vegetatie .....	4
2.1 Vorming van voorlanden .....	4
2.2 Karakteristieke opbouw .....	6
2.3 Golfdependende werking voorlanden.....	6
2.4 Vegetatie en karakteristieken voorland Noarderleech .....	7
2.5 Variatie vegetatie over seizoenen .....	9
3 Hydraulische randvoorwaarden .....	10
3.1 Bodemprofiel .....	10
3.2 Terugkeertijden .....	11
3.3 Hydra-NL .....	12
3.4 Waterstand .....	12
3.5 Golf- en windcondities .....	13
4 Model in SWAN .....	16
4.1 Verschil 1D en 2D model .....	16
4.2 Fysische en wiskundige achtergrond.....	16
4.2.1 Energiebalans.....	17
4.2.2 Aanwezige fysische processen .....	18
4.2.3 Discretisatie in tijd en ruimte.....	21
4.3 Implementatie vegetatie in SWAN.....	22
4.3.1 Bodemruwheid.....	22
4.3.2 Vegetatie.....	24
5. Case I: Referentie, gladde bodem .....	25
5.1 Kalibratie op basis van Hydra-NL invoer database .....	25
5.2 Hydra-NL en SWAN resultaten bij dijkteen .....	26
5.3 Conclusie kalibratie .....	26
6. Case II: Gevoeligheidsanalyse SWAN.....	28
6.1 Verschillende herhalingstijden .....	28
6.2 Waterstandvariatie .....	28

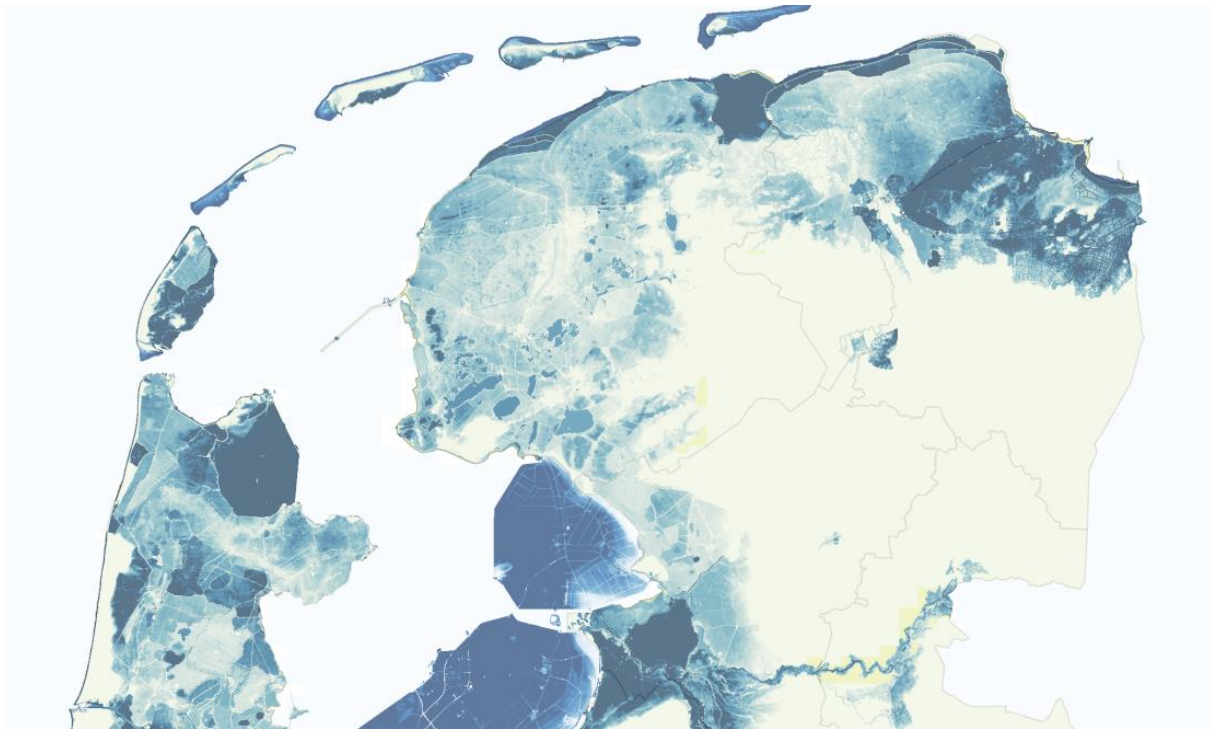
---

6.3	Golfhoogtevariatie .....	29
6.4	Lengte-effect voorland .....	32
6.5	Conclusie gevoeligheidsanalyse .....	34
7.	Case III: Implementatie vegetatie .....	35
7.1	Ruwheidsvariatie per locatie .....	35
7.2	SWAN resultaten inclusief vegetatie .....	36
7.3	Conclusie implementatie vegetatie .....	39
8.	Case IV: Effect zomerkade .....	40
8.1	SWAN resultaten inclusief zomerkade .....	40
8.2	Conclusie effect zomerkade .....	42
9.	Case V: Combinatie vegetatie en zomerkade .....	43
9.1	SWAN resultaten .....	43
9.2	Conclusie combinerend effect .....	45
10.	Case VI: Effect op beoordeling .....	46
10.1	GEKB beoordeling .....	46
10.2	GEBU beoordeling .....	46
	Discussie .....	48
	Conclusie en aanbevelingen .....	51
	Bibliografie .....	53
	Bijlage A .....	55
	Bijlage B .....	58
	Bijlage C .....	60
	Bijlage D .....	65
	Bijlage E .....	66
	Bijlage F .....	67
	Bijlage G .....	69
	Bijlage H .....	70
	Bijlage I .....	72
	Bijlage J .....	75
	Bijlage K .....	83
	Bijlage L .....	88

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Nederland ligt in een deltagebied, waardoor meer dan de helft van het oppervlak gevoelig is voor overstromingen. Dit geldt ook voor een groot deel van Friesland, zoals aangegeven in Figuur 1. Door klimaatverandering en de resulterende zeespiegelstijging wordt de waterveiligheid een steeds grotere opgave. Innovatieve oplossingen zijn nodig om ook in de toekomst de waterveiligheid te kunnen blijven garanderen.



*Figuur 1 Overstroomd gebied bij afwezigheid van primaire keringen, gebaseerd op data van LIWO [1]*

In het kader van waterveiligheid is in Nederland het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) opgericht. Hierin staan de plannen voor een periode van zes jaar, waarnaast het jaarlijks wordt geactualiseerd om de nieuwste ontwikkelingen mee te nemen. Het HWBP is een onderdeel van het Deltaprogramma, wat als doelen heeft [2]:

- Waterveiligheid;
- Zoetwatervoorziening;
- Ruimtelijke aanpassing, klimaatbestendige inrichting.

Sinds 2016 heeft het HWBP een nieuwe benadering. Een aspect van het nieuwe programma omvat de samenwerking tussen Rijk en waterschappen om overstromingen te voorkomen. Daarnaast wordt in de normering rekening gehouden met overstromingskansen en gevolgen, in plaats van enkel de overschrijdingskansen [3]. In de huidige normen wordt dus gekeken naar het overstromingsrisico, wat bestaat uit een vermenigvuldiging van kans en gevolg.

Om de waterveiligheid te toetsen, is in 2017 het Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium (WBI) opgesteld. Het WBI omvat de methoden en regels om de primaire keringen te toetsen op verschillende faalmechanismen [4]. In het WBI worden faalmechanismen meegenomen waarop voorheen niet werd getoetst.



## 1.2 Aanleiding

Ten gevolge van de nieuwe normering en het WBI voldoet een deel van de Friese Waddenzee dijken niet aan de huidige veiligheidsnormen. Dijkvakken op het traject tussen Koehool en Lauwersmeer, met een lengte van ongeveer 50 km, zijn afgekeurd doordat de overstromingskans te groot is. De dijkvakken zijn momenteel op verschillende faalmechanismen afgekeurd, waaronder piping, bekleding en macro-instabiliteit.

Op het traject ligt de 'groene dijk', welke volledig uit gras- en kleibekleding bestaat. Deze bekleding voldoet met de huidige beschikbare rekenmethodieken niet aan de normen. Echter, het vermoeden bestaat dat de hydraulische belasting in de toetsing overschat wordt, waardoor de berekening mogelijk te conservatief is. Dit is gebaseerd op het feit dat buitendijks van de groene dijk het voorland 'Noarderleech' aanwezig is, zie Figuur 2. Dit is een buitendijkse vlakte in het getijdengebied en grotendeels boven gemiddeld hoogwater (GHW). Door de hoge ligging overstroomt het gebied enkel tijdens stormvloed, wat een aantal keer per jaar voorkomt. Op het voorland zijn verschillende soorten vegetatie aanwezig, waarvan een groot gedeelte gras. In het geval van stormvloed verhoogt de vegetatie op de voorlanden de bodemruwheid. In theorie zorgt een verhoogde ruwheid voor meer energiedissipatie, waardoor onder andere de golfhoogte afneemt. De potentie van dit effect op de golfcondities en dus de belasting wordt in de huidige toetsing nog niet meegenomen.



Figuur 2 Locatie van het traject en het voorland Noarderleech

Deze veiligheidsbeoordeling en het ontwerp van de primaire keringen kunnen worden geoptimaliseerd aan de hand van Project Overstijgende Verkenningen (POV's). Dit zijn projecten die voor een algemene situatie gelden en waarin onderzoek wordt gedaan naar hoe bepaalde mechanismen beter kunnen worden meegenomen in de beoordeling en het ontwerp van primaire keringen. In de 'POV waddenzeedijken' is onderzoek gedaan naar de effectiviteit van voorlanden langs de Waddenzee kust. Hierin is aangetoond dat de voorlanden wel degelijk effect hebben op de golfbelasting. De POV geeft echter een algemene analyse en niet specifiek voor het eerder genoemde traject. Doordat de effectiviteit sterk afhankelijk is van de afmetingen van het voorland en het type vegetatie, is het van belang om specifiek voor deze locatie de effectiviteit van vegetatie op voorlanden te bepalen.

Dit kan tot gevolg hebben dat de hydraulische belasting op de dijk kan worden verlaagd. Een groot deel van de groene dijk is afgekeurd mede door een te hoge hydraulische belasting. Een verlaging kan ervoor zorgen dat bepaalde dijkvakken wel voldoen aan de normering. Door de grote lengte van het traject Koehool-Lauwersmeer is een complete dijkversterking een grote opgave voor Wetterskip Fryslan, daarom is het technisch en financieel gunstig als blijkt dat versterking op bepaalde delen eenvoudiger kan of zelfs onnodig is.

### 1.3 Doelstelling

In dit rapport staat de volgende vraag centraal:

*Wat is het effect van de vegetatie op voorlanden op de golfcondities?*

De doelstelling van dit rapport bestaat uit enkele onderdelen:

- Het inzichtelijk maken van de gevoeligheid van het model voor verschillende combinaties van ruwheden en randvoorwaarden.
- Inzicht krijgen in het effect van een begroeid voorland op de golfbelasting op de achterliggende waterkering, specifiek voor het traject Koehool-Lauwersmeer.
- Bepalen of de achterliggende 'groene dijk' aan de normen voldoet in het geval dat het voorland geheel worden meegenomen.
- Effect van de op het voorland aanwezige zomerdijk bepalen.

Benadrukt wordt dat dit rapport vooral de technische aspecten aankaart. De maatschappelijke en ecologische consequenties worden kort besproken, echter, de details worden buiten beschouwing gelaten.

### 1.4 Werkwijze

Met behulp van SWAN [5] wordt het effect van vegetatie onderzocht. Hiervoor zijn Hydraulische Randvoorwaarden (HR) aan de zeewaartse kant van het voorland nodig voor een terugkeertijd conform de Waterwet. Deze randvoorwaarden worden opgevraagd bij Helpdesk Water, waarna ze via Hydra-NL [6] verkregen kunnen worden. Met SWAN worden de golfcondities op 50 m zeewaarts van de dijkteen bepaald. Als referentie wordt eerst een gladde bodem zonder vegetatie aangenomen. Met behulp van de hydraulische belastingen uit Hydra-NL wordt het SWAN model gekalibreerd, omdat deze belastingen nagenoeg gelijk moeten zijn aan de uitvoer van SWAN.

Vervolgens worden de golfcondities bij de dijkteen bepaald in het geval dat vegetatie wel wordt meegenomen. Hierbij wordt vooral aandacht besteed aan de golfhoogte, omdat uit eerder onderzoek blijkt dat de golfperiode mogelijk incorrect wordt gemodelleerd [7]. Er wordt onderscheid gemaakt in twee cases:

1. Bepalen van de golfhoogte voor diverse bodemruwheden. Hiermee kan inzichtelijk worden gemaakt wat de gevoeligheid van het model is voor de ruwheid.
2. De aanwezige vegetatie voor onder andere het maatgevende profiel zo goed mogelijk benaderen, waardoor het optredende effect van de vegetatie kan worden ingeschat.

Daarnaast wordt gekeken naar het effect dat de aanwezige zomerdijk heeft. Deze dijk wordt op dit moment niet beheerd en daarom uit de modellen weggelaten. In deze studie wordt de dijk weer aan het bodemprofiel toegevoegd om met SWAN het effect te kwantificeren.

Tot slot wordt het effect van de gereduceerde golfhoogte op de faalmechanismen Gras Erosie Krui Binnentalud (GEKB) en Gras Erosie Buitentalud (GEBU) bepaald.

### 1.5 Leeswijzer

Ten eerste beschrijft hoofdstuk 2 de eigenschappen van voorlanden en wordt kort besproken welke typen vegetatie hierop aanwezig zijn. Vervolgens worden in hoofdstuk 3 de hydraulische randvoorwaarden bepaald die nodig zijn voor de uit te voeren berekeningen. Hoofdstuk 4 gaat dieper in op de achtergrondprocessen van SWAN en de verschillende methoden om vegetatie mee te nemen in de berekening. De daarop volgende hoofdstukken bevatten de verschillende beschouwde cases. In hoofdstuk 11 wordt verder ingegaan op de implicaties van de resultaten en worden de resultaten bediscussieerd. Tot slot bevat hoofdstuk 12 de conclusie en aanbevelingen.

## 2 Voorland en vegetatie

Voorlanden, in de Waddenzee ook wel kwelders genaamd, ontstaan over het algemeen in getijdengebieden. In dit hoofdstuk worden de algemene opbouw en karakteristieken van een voorland beschreven. Er wordt ingegaan op de factoren die kweldergroei bevorderen of juist tegengaan. Daarna wordt de situatie specifiek voor het voorland Noorderleech omschreven en de variatie in vegetatie hierop gedurende een jaar.

### 2.1 Vorming van voorlanden

De interactie tussen verschillende factoren is van belang voor kweldervorming. Hieronder wordt elk aspect kort toegelicht.

#### Getij

Van nature is getij een belangrijke factor. Getijplaten beschut tegen golven en stroming sedimenteren, waardoor de hoogte toeneemt. Een groot getijverschil is hierbij gunstig voor de sedimentatie. Getij heeft dus een positieve invloed op de verticale ontwikkeling van de platen. Door invloeden van andere processen kan een plaat hierdoor uitgroeien tot boven gemiddeld hoogwater, met een maximum hoogte van rond het hoogste springtijniveau [8].

Naast het getijdeverschil is ook de getijdestroming van belang. Door de positieve relatie tussen stroomsnelheid en sedimenttransport, wordt het transport van sediment groter naarmate de stroomsnelheid toeneemt. Afhankelijk van de valsnelheid van het sediment vindt sedimentatie plaats als de stroomsnelheid beneden de kritische waarde komt. In het voorland kan dus gelaagdheid ontstaan door de verschillende valsnelheden van de soorten sediment [8]. De minimale stroomsnelheid van het getij vindt plaats tijdens kentering van het tij, wat de overgang van eb naar vloed of vice versa aangeeft. Als dit samenvalt met hoogwater, is de snelheid dus minimaal ten tijde dat de kwelder onder water staat. De combinatie van een lage stroomsnelheid en kleine waterdiepte maakt de aangroei van de kwelder mogelijk.

Tot slot is de asymmetrie van het getij een belangrijke factor met betrekking tot sedimenttransport. Voor de Waddenzee geldt dat de ebperiode langer duurt dan de vloedperiode [8]. Doordat het watervolume dat de Waddenzee inkomt even groot is voor eb en vloed, moet de stroomsnelheid tijdens vloed hoger zijn. Hierdoor is er dus sprake van import van sediment in de Waddenzee.

#### Golf- en windklimaat

Het golf- en windklimaat is vooral van invloed op de erosie en sedimentatie die plaatsvindt. Golven zorgen voor opwerveling van sediment, waardoor het in de waterkolom terecht komt. Het transport vindt grotendeels plaats door de getijstroming. Daarnaast zorgen schuin invallende golven voor een stroming langs de kust en dus langstransport van sediment.

Hiernaast kan een storm door middel van opstuwing de waterstand sterk vergroten. Zeker in een bassin als de Waddenzee kan het water enkele meters ophopen tegen de kust. Hierdoor lopen zelfs de hoger gelegen delen van het voorland onder. Afhankelijk van het getij kan dit leiden tot ophoging van het voorland.

#### Beschikbaarheid van sediment

Om de vorming van voorlanden mogelijk te maken is voldoende sediment in de waterkolom noodzakelijk. De Waddenzee is van nature rijk aan zand en slib. Door de lage valsnelheid van kleine zanddeeltjes en slib dragen deze het meest bij aan kweldervorming [8].

### Aanwezigheid van vegetatie

De vegetatie draagt op twee manieren bij aan de kweldervorming:

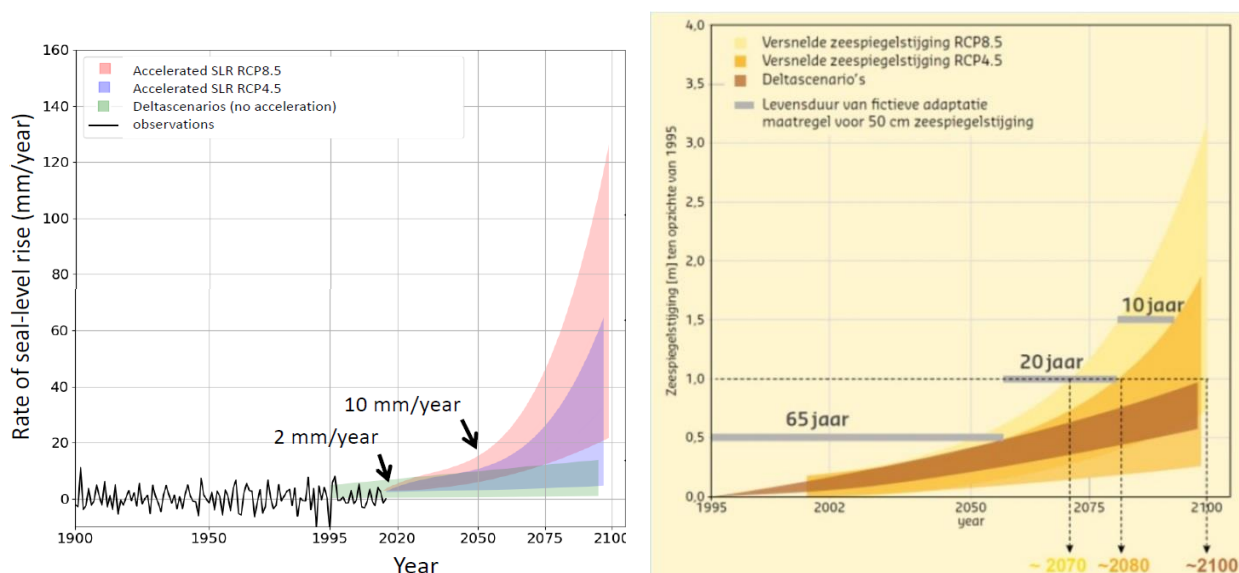
- Indien de vegetatie voldoende hoog is, vormt zich tussen de vegetatie een beschut gebied. Hierdoor is de stroomsnelheid lager, wat tot gevolg heeft dat er meer sedimentatie optreedt.
- De wortels van vegetatie houden de bodem bijeen, wat de bodemsterkte vergroot. Hierdoor wordt de bestaande bodem minder weg geërodeerd.

Afhankelijk van het type vegetatie worden de bovenstaande effecten groter of kleiner.

### Relatieve zeespiegelstijging

De opsomming van absolute zeespiegelstijging en bodemdaling vormt de relatieve zeespiegelstijging. Door de stijging van de zeespiegel neemt de waterstand in de Waddenzee toe, wat tot gevolg heeft dat ook het Gemiddeld Hoog Water (GHW) niveau toeneemt. Omdat een voorland rond dit niveau ligt, groeit het voorland als het ware met de waterstand mee. Op basis van bovenstaande kan men dus concluderen dat relatieve zeespiegelstijging een positief effect kan hebben op voorlandvorming.

Echter, dit is alleen het geval als de vorming van het voorland even snel of sneller gaat dan de relatieve zeespiegelstijging. Als de zeespiegelstijging groter is, kan de kweldervorming het niet 'bijhouden', wat ervoor zorgt dat het voorland als het ware 'verdrinkt'. De huidige zeespiegelstijging in Nederland is ongeveer 2 mm/jaar, zie Figuur 3. De verwachtingen voor de komende eeuw lopen sterk uiteen, maar de algemene trend laat wel een stijging van deze snelheid zien. Volgens ref. [9] kunnen wadplaten in de Waddenzee een stijging van ongeveer 6 mm/jaar niet meer bijhouden, de stijging zal voor het voorland in dezelfde orde liggen. De voorspelde scenario's in Figuur 3 laten zien dat de toekomstige zeespiegelstijging een bedreiging kan vormen voor het voorland. Het is van belang dit in gedachten te houden wanneer het voorland actief deel uitmaakt van de kustverdediging.



Figuur 3 Voorspelde zeespiegelstijging tot het jaar 2100 voor de Deltascenario's en IPCC voorspellingen RCP4.5 en 8.5 [10]

### Menselijk ingrijpen

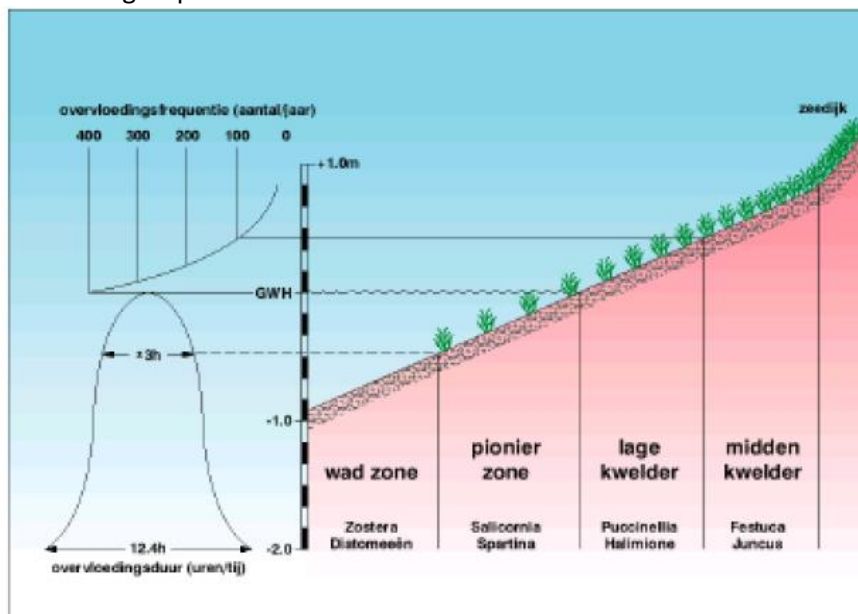
Een groot deel van de kwelders in de Waddenzee zijn gevormd of bevordert door menselijke invloeden voor landinwinning. Met behulp van rijshoutdammen werd een luwte gecreëerd waardoor sedimentatie werd bevorderd, zie Figuur 4. Aangewonnen land werd eigendom, wat een stimulans was voor veel boeren [11]. De kwelderwerken worden tegenwoordig grotendeels niet meer onderhouden, maar zorgen nog altijd voor een bevordering van de kwelder groei.



Figuur 4 Rijshoutdam op het voorland Noarderleech (foto 15 feb. '19)

## 2.2 Karakteristieke opbouw

In het algemeen is een voorland opgebouwd zoals in Figuur 5. Beginnend vanaf de zeekant start het voorland met de wadzone. Dit gebied ligt ongeveer drie uur per getijdencyclus onder water, waardoor er alleen zeewier groeit in dit gebied. Vervolgens komt de pionierzone, welke doorloopt tot GHW. Deze zone bevat zogenaamde 'pioniersoorten', zoals slijkgras. Dan volgt de lage kwelder, zie Figuur 5 voor de locatie. Karakteristieke vegetatie in deze zone zijn kweldergras en zoutmelde. Tot slot eindigt het voorland met de middenkwelder. De mate van vegetatiedichtheid neemt toe bij oplopende hoogte op het voorland. Ook de soort vegetatie verandert, met meer zouttolerante soorten in de pionierzone en dichtere grassoorten hogerop het voorland.



Figuur 5 Karakteristieke opbouw en relatieve hoogteligging van een voorland [8]

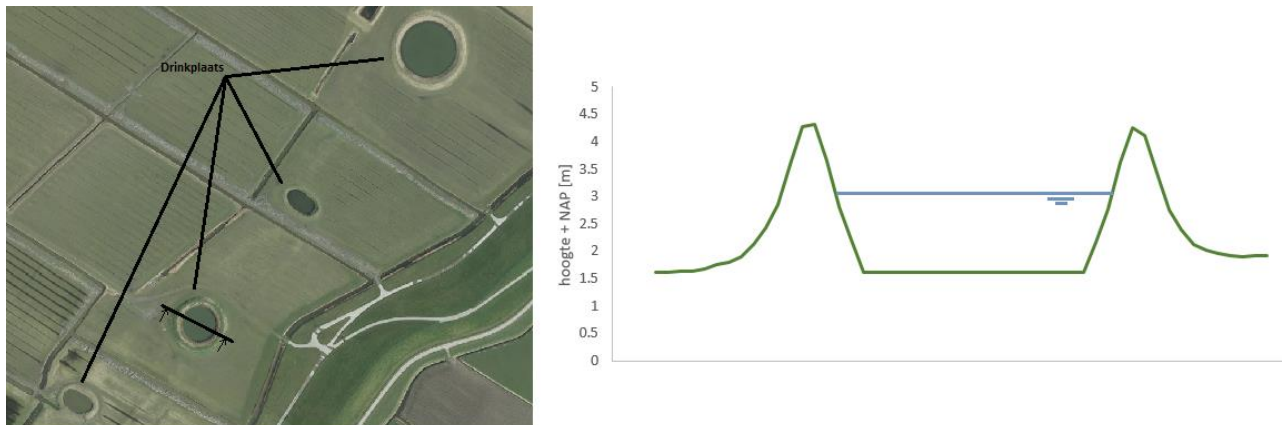
## 2.3 Golfdependende werking voorlanden

De voorlanden beïnvloeden de golfhoogte op twee manieren. Ten eerste zorgt de verhoogde ligging voor een eerder optredende breking van de golven. Doordat de breking afhankelijk is van de verhouding tussen golfhoogte en waterdiepte, zorgt een kleinere waterdiepte ervoor dat een kleinere golfhoogte mogelijk is. Daarnaast 'voelen' de golven de bodem meer bij een kleinere waterdiepte, waardoor de bodemwrijving toeneemt. Ten tweede zorgt vegetatie op de voorlanden voor een hogere bodemruwheid. Door de verhoogde frictie wordt energie gedissipeerd, wat resulteert in een reductie

in golfhoogte. De ruwheid is hoofdzakelijk afhankelijk van het type vegetatie, de hoogte van de vegetatie en de vegetatiedichtheid.

## 2.4 Vegetatie en karakteristieken voorland Noarderleech

Het voorland Noarderleech wordt voor een groot deel gebruikt door boeren voor het opfokken van vee. Dit heeft tot gevolg dat het hogere deel van het voorland bestaat uit weilanden, voornamelijk bedekt met gras. In deze weilanden zijn hoger gelegen drinkplaatsen aanwezig voor het vee, wat bij lichte overstroming ook kan dienen tot hoogwatervluchtplaats, zie Figuur 6.



Figuur 6 Voorbeeld van drinkplaatsen voor vee, rechts: doorsnede van een drinkplaats [12]

De Waddenzeekant van het voorland wordt niet voor veeteelt gebruikt en bevat meer natuurlijke vegetatie. De overgang tussen de veeteelt en natuurlijke zone vindt abrupt plaats doordat er een zomerdijk op het voorland aanwezig is die de zones scheidt, zie Figuur 8. Voor elke zone zijn er specifieke soorten die vaak op voorlanden voorkomen. Tabel 1 geeft een overzicht van de meest voorkomende plantensoorten per categorie.

Tabel 1 Veel voorkomende plantensoorten op voorlanden [7]

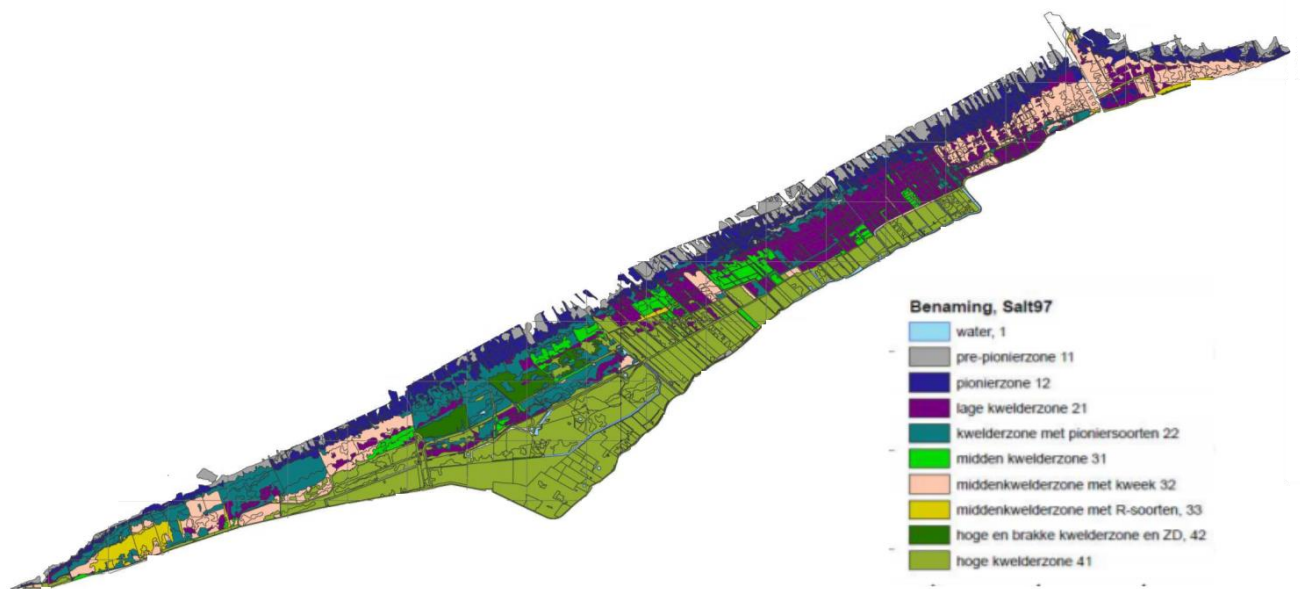
Plantgroep	Nederlandse naam	Wetenschappelijke naam	Afkorting	Type
Pionierplanten	Zeekraal	Salicornia europaea	SAL	Bloem
	Engels slijkgras	Spartina anglica	SPA	Lang gras
Lage kwelderplanten	Gewoon kweldergras	Puccinellia maritima	PUC	Kort gras
	Gewone zoutmelde	Atriplex portulacoides	ATX	Bloem
	Schorrenkruid	Suaeda maritima	SUA	Bloem
Midden kwelderplanten	Zeealsem	Artemisia maritima	ART	Bloem
	Rood zwenkgras	Festuca rubra	FES	Kort gras
	Fioringras	Agrostis stolonifera	AGR	Kort gras
	Zeemelkkruid	Glaux maritima	GLA	Kort gras
Hoge kwelderplanten	Zeekweek	Elymus athericus & repens	ELY	Lang gras
	Zeeaster	Aster tripolium	AST	Bloem
	Zeeweegbree	Plantago maritima	PLA	Bloem
	Reukeloze kamille	Tripleurospermum m.	TRP	Bloem

### Ruimtelijke variatie in vegetatie

Figuur 7 geeft een overzicht van de ruimtelijke distributie van de verschillende plantengroepen. Deze kaart is opgesteld voor het jaar 2008, de huidige variatie zal kleine verschillen kennen. Figuur 7 toont dat tegen de dijk veelal hoge kwelderzone aanwezig is, zie de groene kleur. Dit zou volgens Tabel 1 betekenen dat er waarschijnlijk zeekweek en zeeaster ter plaatse is. Echter, uit eigen observaties blijkt dat in de wintermaanden vooral gewoon kweldergras aanwezig is in dit gebied. Dit is het gevolg van

begrazing van vee en ganzenkolonies die in dit gebied overwinteren, waardoor korte grassen dominant worden.

Buitendijks van de zomerdijk zijn sporen van kamille, zeeaster en zeekweek te vinden. Verder is er Rood zwenkgras en Fioringras aanwezig, aangegeven met de felgroene kleur in Figuur 7. Het paarse gebied geeft de lage kwelderzone. In dit gebied is gewone zoutmelde en gewoon kweldergras aanwezig. Tot slot geeft de blauwe kleur de pionierzone, waar aan de dijkkant vooral Engels slijkgras aanwezig is wat verder zeewaarts overgaat in zeekraal.



Figuur 7 Overzichtskartaal met de verschillende types vegetatie op het voorland 'Noarderleech' [13]

In Bijlage A zijn foto's opgenomen die zijn gemaakt op 15 februari '19 van de verschillende soorten vegetatie. Ook de locatie van de foto's op het voorland is bijgevoegd. De foto's geven een beeld van de staat van de vegetatie tijdens de wintermaanden. Vooral de grassen zijn aanwezig, met kort stoppelig gras dicht bij de dijk en lange grassoorten in de middenkwelder.

### Zomerdijk

De gedeelten met weilanden en natuurgebied worden gescheiden door een zomerdijk, ook wel zomerkade genaamd. Deze omsluit een groot deel van de weilanden en heeft een hoogte van gemiddeld NAP+3 m. De locatie is weergegeven in Figuur 8. Omdat de dijk niet binnen het beheer van Wetterskip Fryslân valt, wordt deze niet onderhouden waardoor de eigenschappen onzeker zijn. Uit verkennend onderzoek blijkt dat de dijk wel invloed heeft op de golfcondities [14]. Echter, de onzekerheid omtrent de sterkte en stabiliteit heeft tot gevolg dat de zomerdijk niet wordt meegenomen in de beoordeling.

In hoofdstuk 8: Case IV wordt het effect van de zomerkade verder onderzocht. Er wordt gekeken naar de invloed op de golfhoogte voor verschillende situaties. Indien de invloeden significant zijn, kan het gunstig zijn om de zomerkade actief te onderhouden.



Figuur 8 Locatie van de Zomerdijk op het voorland [12]

Een neveneffect van de zomerkade is dat de natuurlijke opbouw van het voorland wordt verstoort. Het zeewater wordt tegengehouden, waardoor het water de weilanden achter het dijkje niet kan bereiken en er dus ook geen sediment afgezet wordt. Op deze wijze kan het voorland hier niet meegroeien met de zeespiegel, waardoor het voorland op lange termijn verdrinkt. Een oplossing zou kunnen zijn om de zomerkade op enkele plekken door te steken, wat ervoor zorgt dat het water toegang krijgt en sediment afgezet kan worden. Dit heeft slechts geringe negatieve gevolgen op de golfdempende werking, omdat de doorgestoken ruimtes relatief klein zijn. Een nadeel is echter dat het regelmatig onderlopen van het weiland en sedimentatie nadelig zijn voor de boeren en hun vee. Hieruit volgend is er dus een paradox tussen behoud van het voorland op lange termijn en het gebruik op korte termijn.

## 2.5 Variatie vegetatie over seizoenen

Het stormseizoen aan de Nederlandse kust begint in oktober en loopt tot en met april. Gedurende deze periode zijn de hydraulische belastingen het grootst. Echter, de grootte in vegetatiedichtheid en de lengte van de stengels zijn het kleinst gedurende de wintermaanden. Over het algemeen wordt het bovengrondse deel van kwelderplanten voor een groot deel opgegeten of sterft af, waardoor alleen korte grassen overblijven. Ook de stabiliteit tegen breken van de vegetatie is lager in het winterseizoen [7]. Een belangrijk aspect waar rekening mee moet worden gehouden, is de hersteltijd gedurende de wintermaanden. Afgebroken stengels groeien niet aan binnen een stormseizoen. In het geval er twee heftige stormen in hetzelfde stormseizoen voorkomen, is de aangenomen verhoogde weerstand ten gevolge van vegetatie bij de tweede storm in mindere mate of zelfs niet meer aanwezig.



### 3 Hydraulische randvoorwaarden

Voor een representatief model is het belangrijk dat de randvoorwaarden goed zijn opgesteld. In dit hoofdstuk worden de verschillende randvoorwaarden uiteengezet. De berekening zal in 1D mode worden uitgevoerd, om de rekentijd te verkorten. Dit heeft tot gevolg dat er randvoorwaarden aan de start van het domein nodig zijn, in dit geval de rand van het voorland. Verder zijn de bathymetrie en de windcondities van belang.

#### 3.1 Bodemprofiel

De bodemhoogte is verkregen uit het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN3), waarin de minimale stapgrootte 0.50 m is. In de berekening is een grootte van 1.0 m genomen omdat de winst in rekentijd groter is dan het verlies in nauwkeurigheid. Daarnaast toont Bijlage F dat het verschil tussen deze stapgroottes te verwaarlozen is. Een stapgrootte van 1.0 m is dus in dit geval het meest efficiënt en voldoende nauwkeurig. Ook in het geval dat de eerder besproken zomerkade wordt meegenomen in het bodemprofiel voldoet een stapgrootte van 1.0 m, zie de bijlage.

Uit berekeningen in Hydra-NL, wat in het vervolg van dit hoofdstuk verder wordt besproken, volgt dat de maatgevende golf- en windrichting 310 graden is. Figuur 9 geeft de locaties van de gekozen doorsnedes. De getallen aan de teen van de dijk geven de kilometrerings van de locatie aan. Vooral punt 32.2 en 33.4 zijn interessant, omdat deze volgens berekeningen het zwakst worden bevonden op toetsing van de klei- en grasbekleding. In Bijlage B is een vergrote versie van Figuur 9 gegeven, alsmede een AHN3 hoogtekaart.

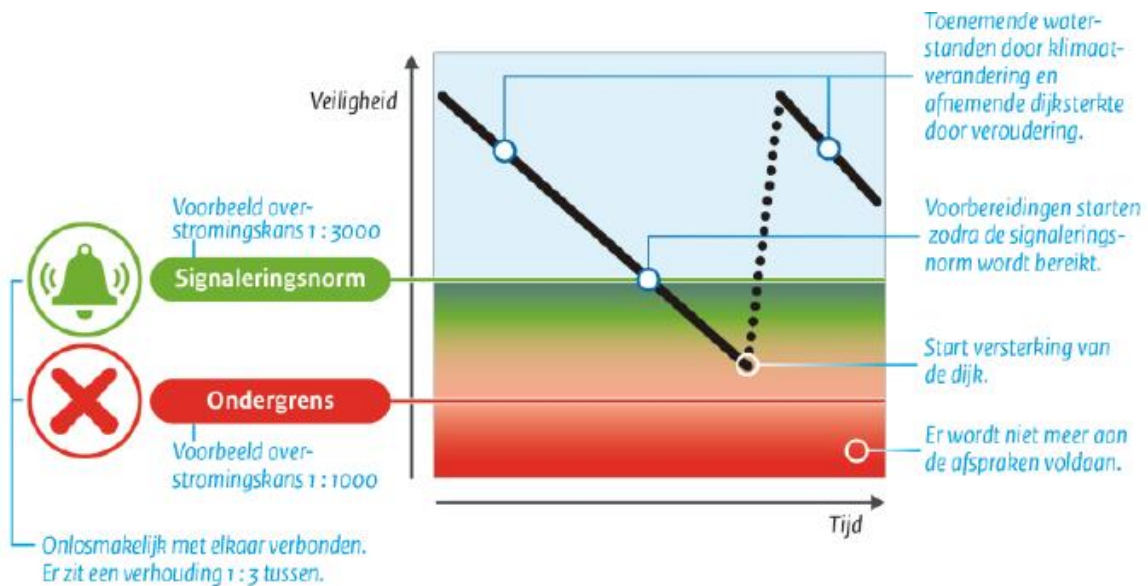
De bodemprofielen bevatten aanwezige geultjes en de zomerdijk. Deze zijn eruit gefilterd om lokale verschillen zoveel mogelijk uit het profiel te halen. In Bijlage C zijn de gebruikte bodemprofielen, zowel gefilterd als ongefilterd, weergegeven.



Figuur 9 Locaties en oriëntatie van de doorsnedes, bij een golf- en windrichting van 310 graden

### 3.2 Terugkeertijden

De hydraulische randvoorwaarden (HR) zijn afhankelijk van de gekozen terugkeertijd. In de norm zijn twee varianten gegeven, de signaalwaarde en de ondergrenswaarde, zie Figuur 10. De beoordeling van de primaire keringen wordt uitgevoerd aan de hand van de signaleringsnorm.



Figuur 10 Schematische weergave van de signaalwaarde in groen en de ondergrens in rood [15]

Als de kering niet voldoet aan deze norm, is het noodzakelijk om de voorbereidingen voor versterking te starten. Als de overstromingskans onder de ondergrens komt, voldoet de dijk niet meer en zal de dijkversterking van start moeten gaan. Het ontwerp van de primaire keringen is op basis van de ondergrens voor een bepaalde ontwerplevensduur met bijbehorende gevolgen van bodemdaling en klimaatverandering. Tussen de signaleringswaarde en de ondergrens zit een 1:3 verhouding. De beschouwde doorsnedes liggen op normtrajecten 6-3 en 6-4, zie Figuur 11. Voor deze trajecten geldt een signaleringswaarde van 1/3000 per jaar met een maximaal toelaatbare faalkans (ondergrens) van 1/1000 per jaar [16].



Figuur 11 Locatie van normtrajecten 6-3 en 6-4 [17]

De overstromingskans is opgebouwd uit de faalkansen van alle faalmechanismen. Elk faalmechanisme heeft een eigen maximale faalkans, welke in de normen is bepaald. Voor de groene dijk moet de hydraulische belasting voor de volgende twee faalmechanismen op doorsnedeniveau worden bepaald:

- Gras erosie kruin-binnentalud (GEKB)
- Gras erosie buitentalud (GEBU)

Per faalmechanisme wordt een faalkans op doorsnede niveau uitgerekend. De faalkans per doorsnede is afhankelijk van de faalkansruimtefactor,  $\omega$ , welke varieert per mechanisme. De faalkans per doorsnede kan nu worden bepaald met:

$$P_{eis,dsn} = \frac{P \omega}{N}$$

waarin  $N$  de lengte-effectfactor en  $P$  de overstromingskans volgens de signaleringsnorm, gelijk aan  $1/3000$ .  $N$  is afhankelijk van de lengte van het dijktraject, voor trajecten 6-3 en 6-4 is deze waarde gelijk aan 3. De faalkansruimtefactor is bij norm vastgesteld op 0.24 voor GEKB en 0.05 voor GEBU [16]. Samenvattend geeft dit de volgende herhalingstijden van de hydraulische belastingen op doorsnedeniveau voor de trajecten 6-3 en 6-4, zie Tabel 2.

Tabel 2 Doorsnede-eis per faalmechanisme bij signaalwaarde voor toetsing in 2023

Faalmechanisme	P	$\omega$	N	$P_{eis,dsn}$
GEKB	1/3000	0.24	3	1/37500
GEBU	1/3000	0.05	3	1/180000

Het faalmechanisme GEBU neemt gras en klei erosie in beschouwing, als variant hierop kan ook alleen naar graserosie worden gekeken. Volgens de normering is de faalkans hiervan 90% van de faalkans van gras en klei, ofwel:

$$P_{eis,dsn} = 0.9 * 1/180000 = 1/200000 \text{ per jaar}$$

In dit onderzoek zullen vier scenario's worden bekeken, gebaseerd op de bovengenoemde faalkansen. Met de hydraulische belastingen behorend bij deze herhalingstijden kunnen de faalmechanismen in normtraject 6-3 en 6-4 worden doorgerekend. De hydraulische randvoorwaarden worden bepaald voor de volgende herhalingstijden:

- 1/3000 per jaar Signaleringsnorm
- 1/37500 per jaar GEKB
- 1/180000 per jaar GEBU
- 1/200000 per jaar GEBU

### 3.3 Hydra-NL

Voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden wordt gebruik gemaakt van Hydra-NL [6]. Dit is een programma dat gebruikt wordt om probabilistisch de hydraulische belastingen op de dijk te bepalen. Het programma zal gerund worden in beoordelingsmodus, omdat dit strookt met het uiteindelijke doel van de studie. De condities op 50 m van de dijkteen kunnen eenvoudig uit Hydra-NL gehaald worden. Deze zijn met een SWAN model, het 2D WTI 2011-model gebruikt voor het WBI, bepaald uit condities aan de rand van het voorland. Voor het bepalen van de HR aan de rand van het voorland is een extra database nodig, welke is opgevraagd bij Helpdesk Water. Door deze database WTI2011\_Waddenzee\_voorlanden.mdb in Hydra-NL in te laden, kunnen ook aan de rand van het voorland de condities worden bepaald, zie de grijze stippen in Figuur 9. Deze condities dienen als HR in het SWAN model en zullen in onderstaande paragrafen besproken worden.

### 3.4 Waterstand

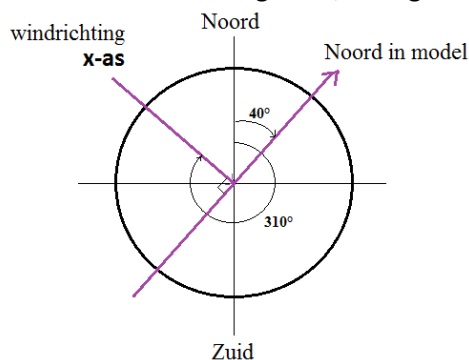
Zoals hierboven aangegeven is de waterstand bepaald met Hydra-NL voor de verschillende locaties. Er is een waterstandsrekening uitgevoerd aan de rand van het voorland en op 50 m van de dijkteen. Hieruit volgt voor verschillende terugkeertijden de waterstand. Tabel 3 geeft de resultaten van Hydra-NL. Het gemiddelde verschil bedraagt rond de 3 cm, wat vooral wordt veroorzaakt door opstuwung tegen de kust door wind. In het SWAN model is een lineair verloop aangenomen over het voorland.

Tabel 3 Waterstanden per locatie voor verschillende terugkeer frequenties

locatie [km]	terugkeer frequentie [/jr]	rand voorland	dijkteen
		waterstand [m]	waterstand [m]
22.3	1/3000	4.74	4.76
	1/37500	5.27	5.29
	1/180000	5.59	5.62
	1/200000	5.61	5.64
27.3	1/3000	4.75	4.81
	1/37500	5.29	5.35
	1/180000	5.61	5.68
	1/200000	5.63	5.71
32.2	1/3000	4.76	4.81
	1/37500	5.30	5.35
	1/180000	5.63	5.69
	1/200000	5.65	5.71
33.4	1/3000	4.76	4.81
	1/37500	5.30	5.35
	1/180000	5.63	5.68
	1/200000	5.65	5.71
36.3	1/3000	4.77	4.81
	1/37500	5.31	5.35
	1/180000	5.64	5.69
	1/200000	5.66	5.71
39.0	1/3000	4.77	4.80
	1/37500	5.31	5.34
	1/180000	5.65	5.68
	1/200000	5.67	5.70
41.9	1/3000	4.78	4.80
	1/37500	5.33	5.35
	1/180000	5.67	5.69
	1/200000	5.69	5.71

### 3.5 Golf- en windcondities

De richting van de golven en de wind is ook bepaald aan de hand van Hydra-NL. Er is gekeken naar de bijdrage per golfrichting, met een 30 graden interval. De maatgevende wind- en golfrichting was tussen 270-330 graden, met de piek tussen 300-330 graden. Het gewogen gemiddelde ligt rond de 310 graden voor de meeste locaties. Daarom is voor alle punten uitgegaan van een maatgevende golfinvalshoek en windrichting van 310 graden. Het bodemprofiel in SWAN volgt deze richting, wat zichtbaar is in Figuur 9. In het 1D SWAN model wordt de 'x-as' gekozen parallel aan dit profiel. De golf- en windrichting wordt in het nautische stelsel opgegeven ten opzichte van het Noorden in het model, wat een verschuiving heeft van 40 graden met het 'echte' Noorden. Dit heeft dus tot gevolg dat de richting in SWAN als  $310-40 = 270$  graden dient te worden ingevuld, zie Figuur 12.



Figuur 12 Verklaring van richtingen in SWAN model

De hydraulische randvoorwaarden en windcondities zijn weergegeven in Tabel 5. De windsnelheid is bepaald door de gemiddelde waarde te nemen tussen de windsnelheid aan de rand van het voorland en bij de dijkteen. Uit Hydra-NL volgt de spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  gedefinieerd als:

$$T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0}$$

Waarin:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n E(f) df$$

Met  $f$  de golffrequentie en  $E(f)$  de golfenergie. Echter, in SWAN dient de piekperiode,  $T_p$ , of de gemiddelde spectrale periode,  $T_{m01} = \frac{m_0}{m_1}$ , ingevoerd te worden.

Volgens ref. [18] is de theoretische verhouding tussen piekperiode en  $T_{m-1,0}$  of  $T_{m01}$  voor een JONSWAP spectrum gelijk aan de verhoudingen in Tabel 4.

*Tabel 4 Relatie tussen piek periode en verschillende spectrale periodes*

	$T_p / T_{mx}$
$T_{m-1,0}$	1.11
$T_{m01}$	1.21

Hieruit kan mede worden afgeleid dat de verhouding  $T_{m-1,0} / T_{m01}$  theoretisch ongeveer gelijk is aan 1.1. Deze verhoudingen zijn gebruikt om de laatste kolommen in Tabel 5 te bepalen.

Tabel 5 Hydraulische randvoorwaarden te gebruiken voor SWAN per locatie en terugkeertijd bij de buitenrand van het voorland

locatie [km]	terugkeer frequentie [/jr]	Windcondities		Hydraulische randvoorwaarden				
		gemiddelde windsnelheid [m/s]	Windrichting [°]	H <sub>s</sub> [m]	Golfrichting [°]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>m01</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]
22.3	1/3000	34.1	310	1.92	310	4.48	4.11	4.92
	1/37500	38.9	310	2.26	310	4.80	4.40	5.28
	1/180000	41.6	310	2.48	310	4.94	4.54	5.44
	1/200000	41.7	310	2.49	310	4.95	4.54	5.45
27.3	1/3000	34.1	310	1.95	310	4.57	4.19	5.02
	1/37500	38.7	310	2.29	310	4.90	4.50	5.39
	1/180000	41.3	310	2.51	310	5.07	4.65	5.57
	1/200000	41.3	310	2.52	310	5.08	4.66	5.59
32.2	1/3000	34	310	1.89	310	4.39	4.03	4.83
	1/37500	39	310	2.22	310	4.73	4.34	5.20
	1/180000	41.3	310	2.43	310	4.91	4.50	5.40
	1/200000	41.5	310	2.44	310	4.92	4.51	5.41
33.4	1/3000	34.2	310	1.90	310	4.43	4.06	4.87
	1/37500	39	310	2.24	310	4.75	4.36	5.23
	1/180000	41.5	310	2.45	310	4.93	4.52	5.42
	1/200000	41.6	310	2.46	310	4.94	4.53	5.43
36.3	1/3000	34.2	310	1.87	310	4.31	3.96	4.75
	1/37500	39	310	2.21	310	4.66	4.27	5.12
	1/180000	41.7	310	2.42	310	4.83	4.43	5.31
	1/200000	41.8	310	2.43	310	4.84	4.44	5.32
39.0	1/3000	34.2	310	1.93	310	4.18	3.84	4.60
	1/37500	39.1	310	2.28	310	4.52	4.15	4.97
	1/180000	41.5	310	2.50	310	4.69	4.30	5.16
	1/200000	41.8	310	2.51	310	4.70	4.32	5.17
41.9	1/3000	34.1	310	1.75	310	4.05	3.72	4.46
	1/37500	38.8	310	2.08	310	4.39	4.03	4.83
	1/180000	41.6	310	2.29	310	4.58	4.20	5.03
	1/200000	41.8	310	2.30	310	4.59	4.21	5.05

## 4 Model in SWAN

Voor het opstellen van het SWAN model is het belangrijk om de processen zo realistisch mogelijk mee te nemen. Hiervoor is het nodig om eerst in beeld te brengen wat de achterliggende processen van SWAN zijn. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste processen en de werking van de methoden uiteengezet. Tabel 6 geeft een overzicht van de gebruikte instellingen en de instellingen gebruikt door het WTI-model als basis voor Hydra-NL. Het opgestelde SWAN script is bijgevoegd in Bijlage D.

Tabel 6 Overzicht van de gebruikte methodes in SWAN voor de fysische processen

Proces	Opgestelde SWAN model (versie 41.20AB)	SWAN WTI-model (versie 40.72ABCDE)
Quadruplet interacties	Standaardinstellingen	Standaardinstellingen
Triad interacties	-	Standaardinstellingen
White-capping	Komen, standaardinstellingen	Van der Westhuysen, standaardinstellingen
Bodemwrijving	Madsen, variërende $k_N$	Jonswap, standaardinstellingen
Diepte-geïnduceerde golfbreking	Battjes en Janssen, standaardinstellingen	Van der Westhuysen, standaardinstellingen

### 4.1 Verschil 1D en 2D model

In dit rapport zullen alle SWAN berekeningen in 1D worden uitgevoerd, dit in tegenstelling tot de 2D berekeningen die voor Hydra-NL in SWAN zijn gedaan (WTI-model). De belangrijkste verschillen en daaruit volgende gevolgen zijn:

- Processen als diffractie worden in een 1D berekening niet meegenomen, waar een 2D berekening deze wel opneemt. Refractie is van belang bij een in langsrichting variërend bodemgrid of schuin invallende golven, wat bij een 1D model liever wordt vermeden. Meer informatie over deze processen volgt in paragraaf 4.2. Op bepaalde locaties hebben deze processen grote invloed op de aanwezige golfhoogte en richting, wat in een 1D berekening dus wordt verwaarloosd.
- Aanwezige stromingen worden alleen in een 2D berekening meegenomen. Vooral in ondiep water hebben stromingen effect op de absolute groepssnelheid van golven, waardoor het effect heeft op het energietransport.
- Ruimtelijke variaties in golfhoogte en de effecten hiervan op energietransport worden enkel meegenomen in een 2D model. Door dieptevariaties kan langs de kust de golfhoogte variëren, waardoor er een energietransport plaatsvindt langs de kust.
- Tot slot zitten interacties tussen golven niet in een 1D model, dit kan in een 2D model wel worden meegerekend. Dit is vooral van invloed op de golflengte en -periode.

### 4.2 Fysische en wiskundige achtergrond

In ondiep water spelen drie processen een belangrijke rol in energiepropagatie, te weten 'shoaling', 'refractie' en 'diffractie'. Shoaling treedt op door verandering in waterdiepte. De golfsnelheid is afhankelijk van de waterdiepte volgens:

$$c = \sqrt{gd}$$

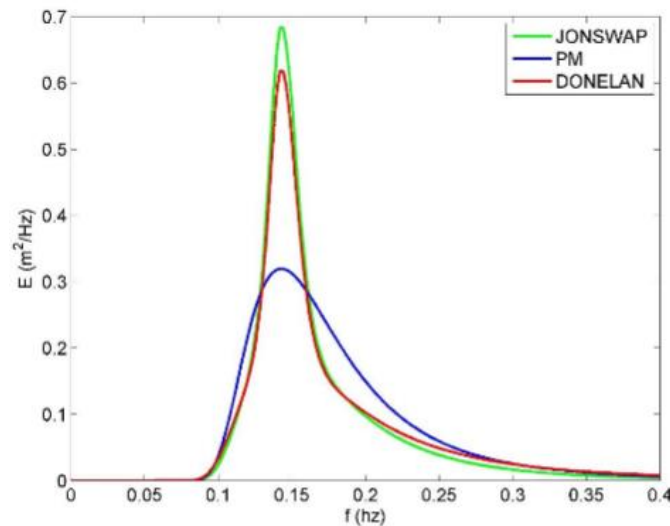
Met  $g$  de gravitatieconstante gelijk aan  $9.81 \text{ m/s}^2$  en  $d$  de waterdiepte. Hierdoor nemen golven in het algemeen in snelheid af naarmate ze dichterbij de kust komen. Doordat de voorste golven langzamer gaan dan de achterste, stuwen de achterste als het ware op de voorste waardoor de golfhoogte toeneemt.

Refractie beschrijft de verandering in golfrichting door ruimtelijke variatie in waterdiepte. Door variërende dieptes en dus snelheden langs een golf verandert de oriëntatie van de golf ‘crest’, ofwel de golfrichting. Refractie treedt in 1D enkel op bij schuin invallende golven.

Tot slot beschrijft diffractie de afbuiging van golven door constructies, zoals bijvoorbeeld golfbrekers. Dit beïnvloedt dus opnieuw de golfrichting. Benadrukt wordt opnieuw dat diffractie geen rol speelt in een 1D model.

#### 4.2.1 Energiebalans

SWAN maakt gebruik van het feit dat het waterniveau kan worden beschreven met het ‘energiedichtheid’ spectrum  $E(\sigma, \theta)$ . Hierin wordt de aanwezige golfenergie verdeeld over relatieve frequenties  $\sigma$  en golfrichtingen  $\theta$  [19]. In relatief ondiep water, zoals de Noordzee, heeft het spectrum een JONSWAP vorm. Het JONSWAP spectrum wordt gekarakteriseerd door zijn piekige karakter, zie Figuur 13. Omdat de waterdiepte in de Waddenzee zeer minimaal is, wijkt het hier optredende spectrum af van de theoretische JONSWAP vorm. Omdat de gegevens hierover onbekend zijn, wordt in het SWAN model toch uitgegaan van het theoretische JONSWAP spectrum.



Figuur 13 JONSWAP spectrum vergeleken met het Pierson-Moskovitch geldend voor diep water [20]

Door de energiedichtheid te delen door de relatieve frequentie, kan de ‘actiedichtheid’,  $N(\vec{x}, t; \sigma, \theta)$ , worden bepaald op locatie  $\vec{x}$  en tijdstip  $t$ . Een belangrijk verschil tussen de actiedichtheid en de energiedichtheid is dat de actiedichtheid behouden blijft bij de aanwezigheid van stromingen [19]. Om interactie tussen golven en stromingen te modelleren, wordt in SWAN dus gekozen voor de actiedichtheid.

Omdat  $N(\vec{x}, t; \sigma, \theta)$  behouden blijft, kan een balans over een controle volume  $(\vec{x}; \sigma, \theta)$  worden opgesteld. De hoeveelheid energie die het volume uitgaat, is gelijk aan de inkomende energie plus de verandering over het controle volume. Deze balans leidt tot de ‘spectrale actiebalans’ vergelijking voor een 2D situatie [19]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} [(\vec{c}_{g,relative} + \vec{U})N] + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

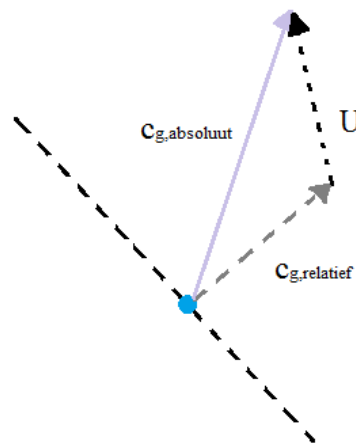
De bovenstaande vergelijking is in feite gelijk aan de energiebalans vergelijking, met  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$  en een extra term om de energieverschuiving over frequenties mee te nemen.

De eerste term geeft de verandering in actie over tijd aan. Bij een stationaire situatie zal dit gelijk zijn aan nul.



De aanwezige golfenergie verplaatst met de absolute groepssnelheid, grafisch weergegeven in Figuur 14 [21]:

$$\vec{c}_{g,absolute} = (\vec{c}_{g,relative} + \vec{U})$$



Figuur 14 Grafische weergave van de vectorsommatie van de relatieve groepssnelheid en de stroming [21]

De groepssnelheid,  $\vec{c}_g$ , in ondiep water is diepte-afhankelijk volgens de relatie:

$$c_g = c = \sqrt{gd}$$

Hierdoor is de tweede term in de actiebalans diepte-afhankelijk, waardoor het effect van shoaling in deze term is meegenomen [21].

De derde term beschrijft de verschuiving van energie over de frequenties. De vierde term geeft de diepte-geïnduceerde refractie, ofwel verandering in golfrichting [21]. In het geval van loodrecht inkomende golven en bodemcontouren parallel aan de kust is deze term gelijk aan nul.

De rechterkant van de vergelijking bevat alle processen die bijdragen aan de verandering in energie van de golf over het controlevolume. Op deze processen wordt in sectie 4.2.2 verder ingegaan.

In een cartesisch 1D coördinatenstelsel ( $x,y=0,z=0$ ) kan de vergelijking in stationaire situatie worden omgeschreven tot:

$$\frac{\partial c_{g,x} N}{\partial x} + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

Omdat in een 1D berekening geen stroming wordt meegenomen, geldt  $\vec{U} = 0$ . De derde term speelt alleen een rol bij schuin invallende golven. Omdat het bodemprofiel parallel loopt aan de golfrichting, is deze term dus gelijk aan nul.

#### 4.2.2 Aanwezige fysische processen

Voor de fysische processen wordt gebruik gemaakt van het derde generatie golfmodel (GEN3). Hiervoor is gekozen omdat hierin de nieuwste inzichten zijn verwerkt en alle processen worden meegenomen. De  $S_{tot}$  wordt bepaald aan de hand van de volgende formule [19]:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl4} + S_{nl3} + S_{wc} + S_{bfr} + S_{surf}$$

Waarin:

$S_{in}$	=	Wind input
$S_{nl4}$	=	Non-lineaire quadruplet interacties

$S_{nl3}$	=	Non-lineaire triad interacties
$S_{wc}$	=	White-capping
$S_{bfr}$	=	Bodem wrijving
$S_{surf}$	=	Diepte-geïnduceerde golfbreking

### Wind input

Als wind input wordt de gevonden windsnelheid en -richting gebruikt. De windsnelheid is de snelheid gemeten op 10 m hoogte, aangegeven met  $U_{10}$ . Uit Hydra-NL volgt voor verschillende terugkeer-frequenties de windsnelheid en -richting, welke als invoer dienen in het SWAN model. Vervolgens wordt de source input door wind bepaald volgens Miles [21]:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = \alpha + \beta E(\sigma, \theta)$$

Waarin  $\alpha$  de initiële golfgroei aanduidt en de coëfficiënt  $\beta$  wordt bepaald volgens de methode van Komen et al. [21].

### Non-lineaire interacties tussen golven

De  $S_{nl4}$  zijn vooral dominant in diep water, wat hier niet het geval is. De interacties zorgen voor een verschuiving van de energie over de frequenties. Om te bepalen of deze non-lineaire processen van belang zijn wordt gebruik gemaakt van het Ursell getal, wat voor ondiep water gelijk is aan [21]:

$$N_{Ursell} = \frac{HL^2}{d^3} = \frac{gHT^2}{d^2}$$

Met  $H$  de golfhoogte,  $L$  de golflengte en  $T$  de golfperiode. Het Ursell getal geeft de mate van non-lineairiteit aan, hoe meer non-lineair des te groter het Ursell getal wordt. Uit de definitie kan worden afgeleid dat het getal lager is voor dieper water, ofwel meer lineair. Doordat de quadruplet interacties vooral van belang zijn in diep water, worden ze in het model meegenomen voor  $N_{Ursell} < 10$ .

De triad interacties zijn net als de quadruplets non-lineaire processen, echter, deze vinden vooral plaats in ondiep water. Deze term zorgt opnieuw voor een verschuiving van de golfenergie over de frequenties. Echter, in SWAN worden de infragravity-golven niet meegenomen, waardoor de verschuiving naar lage frequenties niet is gemodelleerd. Dit heeft tot gevolg dat de golfperiode wordt onderschat. Om dit te voorkomen, is gekozen om de triad interacties niet mee te nemen. Hierbij wordt aangenomen dat de fout door het niet meenemen van de triads niet groter is dan het wel meenemen van de triads.

### Dissipatie

Energiedissipatie vindt plaats door de laatste drie processen. Voor white-capping wordt in het model gebruik gemaakt van het model van Komen et al. [22]. White-capping beschrijft de golfbreking in dieper water [21]. De golven breken doordat de golfhoogte te groot wordt in verhouding tot de golflengte. Bodemwrijving wordt beschreven volgens Madsen et al. [23], omdat deze parameter vooral van belang is in dit onderzoek, volgt meer hierover in sectie 4.3.1.

Tot slot wordt er energie gedissipeerd door golfbreking. SWAN beschrijft de golfbreking met de methode van Battjes en Janssen [24], waarin dissipatie van één golf wordt gemodelleerd als bij een 'bore' volgens [21]:

$$D_{surf,golf} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} \rho g f_0 H_{br}^2$$

Met:  
 $\alpha_{BJ}$  = Coëfficiënt, gelijk genomen aan 1

$f_0$  = Inverse van de golfperiode  $T_0$   
 $H_{br}$  = Hoogte van de brekende golf

De gemiddelde dissipatie voor brekende en niet brekende golven kan worden bepaald met [21]:

$$\bar{D}_{surf} = Q_b \bar{D}_{surf,golf}$$

Hierin is  $Q_b$  de fractie van brekende golven en de gemiddelde dissipatie van één golf bepaalt met [21]:

$$\bar{D}_{surf,golf} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} \rho g \bar{f}_0 H_{max}^2$$

Waarin:

$$H_{max} = \gamma(d + \eta)$$

$\gamma$  = breker index

$\eta$  = waterniveau boven Stil Water Level (SWL)

Er zijn twee manieren om breking mee te nemen in SWAN, te weten met een constante of een variabele breker index. Door middel van kalibratie wordt gekozen welke wijze het meest geschikt is. Bij het opgeven van een constante waarde wordt 0.73 als de standaardwaarde genomen. Uit onderzoek in ref [25] blijkt dat voor bijna horizontale bodems, zoals de voorlanden, SWAN de golfhoogte onderschat. Er wordt gesuggereerd dat de diepte-geïnduceerde breking te groot is, waardoor golfgroei teveel wordt belemmerd. Door het verhogen van de breker index wordt meer golfgroei toegestaan, waardoor de werkelijkheid beter wordt benaderd. Het is dus zeer waarschijnlijk dat de breker index in dit deel van de Waddenzee groter is dan 0.73. Volgens Battjes en Stive [26] is de  $\gamma$  afhankelijk van de diep water golfsteilheid,  $s_0$ , volgens:

$$\gamma = 0.5 + 0.4 \tanh(33s_0)$$

Er wordt aangenomen dat voor het hele voorland de diep water golven nagenoeg gelijk zijn, dit leidt ertoe dat ook de  $\gamma$  voor elke locatie gelijk is.

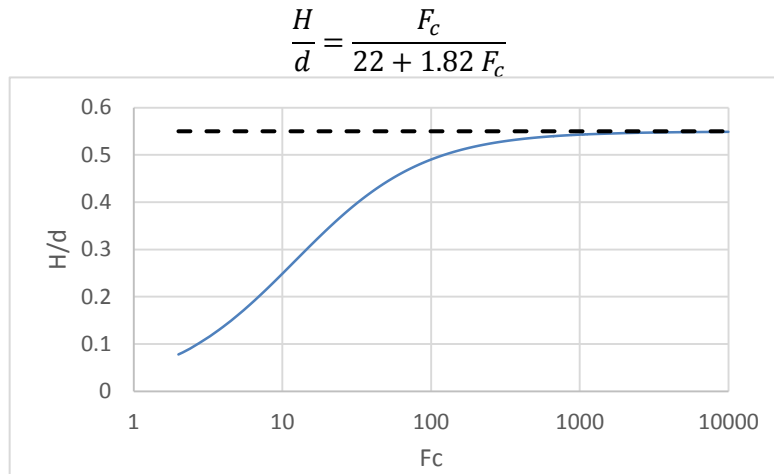
De variabele  $\gamma$  wordt geschaald volgens de methode van Salmon met de bodemhelling en dimensieloze diepte,  $kd$ , door het commando BKD in SWAN [19]. Deze methode is over het algemeen beter toepasbaar voor ondiep water. Voor de coëfficiënten worden de standaardwaarden aangehouden. Als invoer is de breker index voor een horizontale bodem,  $\gamma_0$ , nodig. Nelson [27] toont aan dat de maximale diepte-gelimiterde golfhoogte bij een bodemhelling langer kan voortbestaan dan bij een horizontale bodem. Waar voor hellende bodems de  $\gamma$  volgens CERC in de orde van 0.78 zit, wordt de breker index voor horizontale bodems niet groter dan 0.55 volgens Nelson [27]. Figuur 15 laat het verloop van  $\gamma = H/d$  zien als functie van de non-lineariteits parameter  $F_c$ , gelijk aan:

$$F_c = \frac{g^{1.25} H^{0.50} T^{2.50}}{h^{1.75}}$$

Hiermee kan worden geïdentificeerd welk regime geldig is volgens [27]:

Ondiep water golf	$F_c > 500$
Transitiegolf	$10 < F_c < 500$
Diep water golf	$F_c < 10$

Door de limiet van 0.55 wordt in het SWAN model uitgegaan van de standaardwaarde  $\gamma_0 = 0.54$ .



Figuur 15 Theoretisch maximum volgens Nelson van de breker index voor een horizontale bodem [27]

#### 4.2.3 Discretisatie in tijd en ruimte

In SWAN bestaat de ruimtelijke discretisatie uit een rechthoekig grid, met  $\Delta x$  en  $\Delta y$  in respectievelijk de x- en y-richting. Omdat de berekening stationair is, is tijdsdiscretisatie onnodig. In het spectrale vlak is de stapgrootte van de golfrichting gelijk aan  $\Delta\theta$ . De relatieve resolutie behorende bij de frequentie is gegeven door  $\Delta\sigma/\sigma$  [21]. Als minimale frequentie wordt  $f_{min} = 0.03 \text{ Hz}$  aangehouden met een maximale frequentie van  $f_{max} = 2 \text{ Hz}$ , omdat voor de Waddenzee verwacht wordt dat alle frequenties hiertussen vallen.

SWAN maakt gebruik van impliciete propagatie schema's omdat deze onvoorwaardelijk stabiel zijn, waardoor de stapgroottes niet worden gelimiteerd door het Courant criterium. Wel is het van belang dat de resolutie in de ruimte veel kleiner is dan bijvoorbeeld de golflengte. Omdat het domein klein is, voldoet een eerste orde up-wind (up-wave) schema. In het richtingen domein is over het algemeen een hogere orde schema nodig. [21]

Het geografisch domein (x,y) wordt opgedeeld in vier kwadranten, doordat de golven in alle richtingen kunnen voortbewegen. Voor elk kwadrant wordt de hoeveelheid energie onafhankelijk van de anderen uitgerekend. Door zogehete 'sweeps' wordt per kwadrant de energiepropagatie uitgerekend. De overdracht van energie tussen de kwadranten wordt door iteratie bepaald [21]. De hoeveelheid inkomende energie bij een cel moet gelijk zijn aan de uitgaande energie bij een aanliggende cel. SWAN maakt een eerste gok, waarna door iteratie deze balans kloppend wordt gemaakt voor een opgegeven minimaal aantal punten. In het gebruikte SWAN script wordt een balans in minimaal 99% van de punten gevraagd, met een maximum van 100 iteraties. Dit is relatief hoog, maar door de snelheid van de berekening is dit acceptabel.

In een stationair model wordt in het ruimtedomein van de actie balans standaard gebruik gemaakt van het SORDUP schema [21]:

$$\left[ \frac{1.5(c_{g,x} N)_{i_x} - 2(c_{g,x} N)_{i_{x-1}} + 0.5(c_{g,x} N)_{i_{x-2}}}{\Delta x} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i_t, n} + \left[ \frac{1.5(c_{g,y} N)_{i_y} - 2(c_{g,y} N)_{i_{y-1}} + 0.5(c_{g,y} N)_{i_{y-2}}}{\Delta y} \right]_{i_x, i_\sigma, i_\theta}^{i_t, n}$$

Voor een 1D model is alleen de eerste term van belang, aangezien  $\Delta y = 0$ . De totale 1D actie balans voor een stationaire situatie kan in dit geval worden gediscrètiseerd tot [21]:

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{1.5(c_{g,x} N)_{i_x} - 2(c_{g,x} N)_{i_{x-1}} + 0.5(c_{g,x} N)_{i_{x-2}}}{\Delta x} \right]_{i_\sigma, i_\theta}^n \\ & + \left[ \frac{(1-\nu)(c_\sigma N)_{i_{\sigma+1}} + 2\nu(c_\sigma N)_{i_\sigma} - (1+\nu)(c_\sigma N)_{i_{\sigma-1}}}{2\Delta\sigma} \right]_{i_x, i_\theta}^n \\ & + \left[ \frac{(1-\eta)(c_\theta N)_{i_{\theta+1}} + 2\eta(c_\theta N)_{i_\theta} - (1+\eta)(c_\theta N)_{i_{\theta-1}}}{2\Delta\theta} \right]_{i_x, i_\sigma}^n = \left[ \frac{S}{\sigma} \right]_{i_x, i_\sigma, i_\theta}^n \end{aligned}$$

Hierin zijn  $\nu$  en  $\eta$  coëfficiënten die bepalen wat voor type propagatieschema wordt gebruikt. Een waarde van 0 geeft een ‘central’ schema, wat weinig diffusie geeft maar kans heeft op ‘spurious’ fluctuaties. Een waarde gelijk aan 1 leidt tot een eerste orde up-wind schema welke meer diffusie vertoont. Als standaardwaarde wordt  $\nu, \eta = 0.5$  aangehouden [19].

### 4.3 Implementatie vegetatie in SWAN

Vegetatie kan op twee manieren worden meegenomen in SWAN, te weten door de bodemruwheid aan te passen of het toevoegen van het command ‘vegetation’. Beide manieren worden in onderstaande paragrafen besproken. Hierbij moet rekening worden gehouden dat het stormseizoen duurt van september tot en met april. Gedurende de winter hebben bepaalde plantensoorten weinig biomassa bovengronds, waardoor hun wrijvingseffect lager is dan tijdens zomermaanden.

#### 4.3.1 Bodemruwheid

Het eerste effect dat vegetatie heeft is een verhoging van de bodemruwheid. Om een variërende ruwheid over het profiel in SWAN in te kunnen voeren wordt gebruik gemaakt van de methode van Madsen et al. [23]. Dit is gebaseerd op het ‘eddy-viscosity’ model voor het bepalen van de bodemwrijving [21]. De dissipatie door bodemwrijving wordt in het algemeen in SWAN berekend volgens [21]:

$$S_{bfr} = -\frac{C_{bfr}}{g} \left( \frac{\sigma}{\sinh kd} \right)^2 E(\sigma, \theta) u_{rms, bodem}$$

met:

$C_{bfr}$	=	Bodemwrijvingcoëfficiënt
$k$	=	Golfgetal ( $=2\pi/L$ )
$u_{rms, bodem}$	=	‘root mean squared’ orbitale bodem snelheid

In de methode van Madsen wordt de bodemwrijvingscoëfficiënt beschreven als [21]:

$$C_{bfr} = \frac{f_w}{\sqrt{2}}$$

De coëfficiënt  $f_w$  kan worden geschat afhankelijk van de verhouding tussen de ‘representative near-bottom excursion amplitude’,  $a_b$ , en de Nikuradse ruwheid,  $k_N$ . De amplitude  $a_b$  is afhankelijk van het golfklimaat en de waterdiepte volgens [21]:

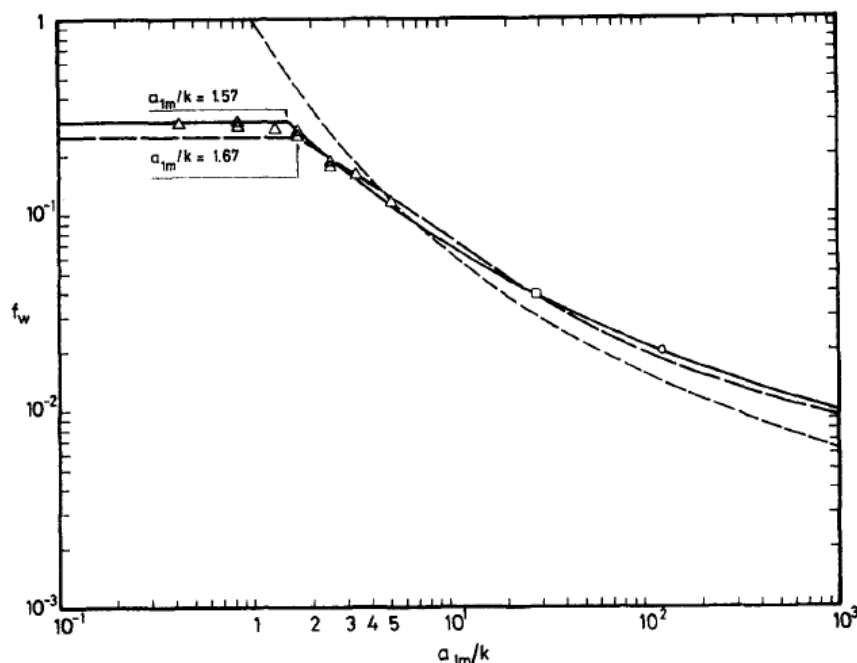
$$a_b^2 = 2 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{1}{(\sinh kd)^2} E(\sigma, \theta) d\theta d\sigma$$

De Nikuradse ruwheid is afhankelijk van de aanwezige bodem en mogelijke vegetatie. Deze ruwheid is de enige parameter die afhankelijk is van de bodemcondities en dient dus als parameter ingevoerd te worden in SWAN. De coëfficiënt  $f_w$  wordt geschat als [21]:

$$f_w = 0.30 \quad , \text{ voor } \frac{a_b}{k_N} < 1.57 \text{ (ruwe bodem)}$$

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log_{10} \left( \frac{1}{4\sqrt{f_w}} \right) = m_f + \log_{10} \left( \frac{a_b}{k_N} \right) \quad , \text{ voor } \frac{a_b}{k_N} \geq 1.57 \text{ (gladde bodem)}$$

waarin  $m_f = -0.08$ . Hieruit volgt dat er een limiet van  $f_w$  is op 0.30, wat betekent dat na een bepaalde Nikuradse ruwheidslengte de frictie in het model niet meer verandert. Volgens Jonsson [28] vervalt voor kleine  $a_b/k_n$  de aanname voor een logaritmisch grenslaag profiel, wat gebruikt is in de formule voor  $a_b/k_n > 1.57$ . Voor kleinere ratio's komt een constante waarde van  $f_w = 0.30$  overeen met experimenten van Bagnold [28], zie Figuur 16.



Figuur 16 Frictiecoëfficiënt,  $f_w$ , tegen  $a_b/k_N$ ,  $\Delta$  geven de metingen van Bagnold [28]

De ruwheid kan als grid worden opgegeven in SWAN. Tabel 7 geeft een overzicht van de  $k_N$  waardes voor verschillende oppervlaktetypes. Deze zijn gebaseerd op Manning waardes,  $n$ , verkregen uit Amerikaanse voorlandstudies [29]. Aan de hand van de vergelijking van Brettschneider [30] zijn de Manning waardes omgerekend naar  $k_N$ , hierbij geldt  $k_N = f(n, R)$ . Aangenomen dat de hydraulische straal  $R$  gelijk is aan de waterdiepte, aangezien de breedte  $\gg$  diepte, is de ruwheidslengte gelijk aan:

$$k_N = d \exp \left( - \left( 1 + \frac{\kappa d^{\frac{1}{6}}}{n \sqrt{g}} \right) \right)$$

met  $\kappa$  de Von Karman constante gelijk aan 0.41. Voor een gladde bodem wordt het gemiddelde van de slibbodem en open water genomen, met een waarde van  $k_N = 0.001$  m. dit is voor alle beschouwde waterdieptes gelijk.

Tabel 7 Nikuradse ruwheden voor verschillende oppervlaktetypes en waterdieptes, gebaseerd op ref. ([29]; [30])

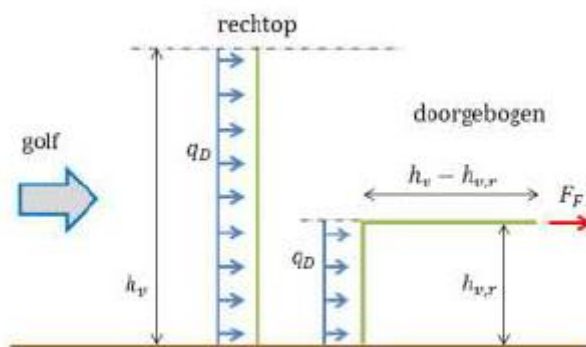
Oppervlaktetype	Manning n	$k_N$ per waterdiepte [m]				
		2 m	3 m	4 m	5 m	6 m
Slibbodem	0.012	0	0	0	0	0
Open water	0.025	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Kaal	0.03	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007
Pionierzone	0.035	0.012	0.014	0.015	0.016	0.016
Grasland	0.042	0.024	0.029	0.032	0.035	0.037
Lage kwelder	0.045	0.030	0.037	0.041	0.045	0.048
Middenkwelder	0.05	0.042	0.051	0.059	0.065	0.071
Hoge kwelder	0.055	0.054	0.068	0.079	0.088	0.096

### 4.3.2 Vegetatie

Een alternatieve manier om vegetatie mee te nemen in SWAN is afhankelijk van de stengeldiameter en -hoogte. Dit command is vooral van belang bij hogere vegetatie als struiken en riet. Echter, de kans is groot dat deze vegetatie knikt of breekt tijdens een stormvloed. Dit breken is afhankelijk van de orbitaalsnelheid. Bij overschrijding van de kritische snelheid die de vegetatie aankan, zal knikken of breken optreden, zie Figuur 17 voor een schematisatie van een geknikte stengel. De kritische orbitaalsnelheid volgens Vuik et al. [31] is als volgt:

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

Om te bepalen of de kritische snelheid wordt overschreden zijn stengel- en stromingsgegevens nodig. Uit experimenten zijn voor bepaalde plantensoorten de buigtreksterkte,  $\sigma_{max}$ , en diameter bepaald, waardoor de kritische snelheid berekend kan worden. Echter stromingsinformatie over het voorland is nog onbekend. Wel blijkt uit onderzoek van de POV Effectiviteit voorlanden [7] dat voor een herhalingsstijd van 1/4000 per jaar de stroomsnelheid de kritische snelheid voor de meeste vegetatietypes overschreed. Hieruit volgend wordt er in deze studie vanuit gegaan dat de stengels breken en het stoppelige oppervlak alleen zorgt voor verhoogde bodemruwheid.



Figuur 17 Krachten werkend op een rechttopstaande en geknikte stengel [7]

## 5. Case I: Referentie, gladde bodem

Dit onderdeel dient om het model te kalibreren door de aanname van een gladde bodem. De uitvoer locatie van zowel Hydra-NL als SWAN is op 50 m van de dijkteen. Het doel is niet om de waarden exact gelijk te krijgen, mede door de 2D effecten in het WTI SWAN model voor Hydra-NL is dit namelijk niet mogelijk. Ook het feit dat in het WTI model gebruik is gemaakt van andere formuleringen voor white-capping en diepte-geïnduceerde breking zal de uitkomst beïnvloeden. De gebruikte bodemruwheid voor een gladde bodem is  $k_n = 0.001$  m.

### 5.1 Kalibratie op basis van Hydra-NL invoer database

Door de probabilistische aard van Hydra-NL is in de eerder verkregen randvoorwaarden onzekerheid meegenomen. Om het SWAN model goed te kalibreren is deze onzekerheid ongewild, omdat SWAN een deterministisch antwoord geeft. Om de deterministische condities te krijgen, wordt rechtstreeks gebruik gemaakt van de achterliggende database die als invoer dient in Hydra-NL. Langs de rand van het voorland wordt de database WTI2011\_Waddenzee\_voorlanden.mdb gebruikt. De condities op 50 m van de dijkteen komen uit de database WTI2011\_Waddenzee.mdb. Deze database is opgesteld met het SWAN WTI-model waarvoor de HR uit de voorland database zijn gebruikt. De gebruikte randvoorwaarden voor de kalibratie zijn gegeven in Bijlage E. Het resulterende SWAN model is afgestemd met V. Vuik, wie onlangs op eenzelfde onderwerp is gepromoveerd.

Voor twee profielen, 22.3 km en 32.2 km, is een vergelijking gemaakt tussen verschillende constante  $\gamma$  en de variabele  $\gamma$  voor breking. Bijlage G toont dat alle constante  $\gamma$  een onderschatting geven vergeleken met Hydra-NL. Echter de standaardwaarde voor  $\gamma_0$  geeft een overschatting met een grotere deviatie voor grotere waterdieptes. De constante  $\gamma$  geeft juist een grotere deviatie voor kleine waterdieptes. Het resultaat voor variabele  $\gamma$  lijkt meer geschikt voor de situatie doordat de bodem bijna horizontaal loopt. Echter, doordat deze methode erg gevoelig is voor de bathymetrie, varieert de uitkomst bij de dijkteen sterk. Doordat de bodem handmatig is gefilterd, is dit niet altijd even nauwkeurig. Om de uitkomst minder afhankelijk te maken van de filtering en zo een meer robuust model te krijgen, wordt gekozen om met de constante  $\gamma$  verder te gaan. Daarnaast wordt in dit onderzoek vooral gekeken naar de beoordelingscondities met hogere waterstanden, waarvoor de constante  $\gamma$  beter ondervonden wordt.

Verwacht wordt dat de parameter  $\gamma$  onder 0.85 blijft, daarom wordt uitgegaan van  $\gamma = 0.84$  om te voorkomen dat de breking andere processen corrigeert. Dit zal nog steeds een onderschatting geven van de golfhoogte, wat wordt veroorzaakt door optredende 2D processen en andere formuleringen voor white-capping en breking in het WTI-model.

Met deze parameter voor breking worden ook voor de andere locaties de golfcondities bepaald. Tabel 8 geeft een overzicht van de verkregen resultaten. Hieruit blijkt dat voor elke locatie de onderschatting relatief gezien gelijk is, met uitzondering van 27.3 km. Dit kan worden verklaard door de schuine inval van golven op deze locatie, wat door 2D effecten leidt tot een lagere golfhoogte. Doordat het SWAN model een onderschatting geeft en deze 2D effecten niet meeneemt, lijkt de overeenkomst relatief gezien goed. Echter, dit is niet het geval omdat er foutief gecorrigeerd wordt.

Daarnaast valt het op dat de SWAN resultaten beter overeenkomen voor hogere waterstanden. Dit is te verklaren door de gebruikte formulering van Battjes en Janssen, welke over het algemeen minder geschikt is voor lage waterdieptes. De afwijking in golfhoogte is voor alle locaties relatief groot, echter er wordt verwacht dat dit vooral te wijten is aan 2D effecten en verschillende formuleringen voor white-capping. Doordat de  $\gamma$  tegen de limiet zit, wordt besloten dat de onderschatting acceptabel is en dat het model op deze wijze zal worden gebruikt in vervolgberekeningen.



Tabel 8 Vergelijking van Hydra-NL invoer en SWAN model resultaten op 50 m van de dijkteen

locatie [km]	Waterstand [m]	Hydra-NL invoer		SWAN		Verschil golfhoogte	
		H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	[m]	%
22.3	5	1.63	3.99	1.41	4.05	-0.22	-13.7%
	4	1.19	3.11	0.98	3.35	-0.21	-18.0%
27.3	5	1.51	3.75	1.43	4.03	-0.08	-5.4%
	4	1.19	3.01	1.03	3.33	-0.16	-13.3%
32.2	5	1.67	4.00	1.46	4.02	-0.21	-12.6%
	4	1.33	3.27	1.08	3.29	-0.25	-18.6%
33.4	5	1.74	4.13	1.50	3.69	-0.24	-13.9%
	4	1.40	3.40	1.11	3.07	-0.29	-20.5%
36.3	5	1.58	3.97	1.34	4.07	-0.24	-15.0%
	4	1.14	3.08	0.90	3.30	-0.23	-20.6%
39	5	1.63	4.15	1.44	3.98	-0.19	-11.6%
	4	1.29	3.38	1.04	3.33	-0.26	-19.9%
41.9	5	1.58	4.08	1.36	3.94	-0.22	-14.0%
	4	1.26	3.26	0.94	3.21	-0.32	-25.2%

## 5.2 Hydra-NL en SWAN resultaten bij dijkteen

Nu het model is gekalibreerd op de onbewerkte invoer van Hydra-NL, kunnen voor elke herhalingsstijd en locatie de golfcondities op 50 m van de dijkteen bepaald worden met het SWAN model. De HR hiervoor zijn reeds in hoofdstuk 3 bepaald. Met Hydra-NL kunnen voor dezelfde situaties de condities worden berekend, echter dit is dus op probabilistische wijze. Tabel 9 geeft de gevonden resultaten.

Uit Tabel 9 kan worden geconcludeerd dat de afwijking gemiddeld gezien een onderschatting van rond de 15% is, wat ongeveer gelijk is aan de afwijking gevonden in de vergelijking met onverwerkte Hydra-NL invoer, zie Tabel 8. Voor grotere herhalingsstijden neemt de afwijking toe, wat kan worden verklaard door de toenemende onzekerheid naarmate de herhalingsstijd toeneemt. Doordat Hydra-NL probabilistisch is, zal door deze onzekerheid de golfhoogte relatief toenemen. Dit in combinatie met de onderschatting van SWAN zorgt ervoor dat ze verder uiteenlopen bij hogere herhalingsstijden.

## 5.3 Conclusie kalibratie

Uit deze case volgt dat een breker index van  $\gamma = 0.84$  de beste realistische benadering geeft voor het voorland. De afwijking is voor alle locaties en scenario's in dezelfde orde, met een gemiddelde onderschatting van 15%. Er zijn verschillende redenen voor de verschillen, hieronder volgt een samenvatting van de eerder genoemde redenen:

- In het WTI SWAN model is gerekend met een 2D model, waardoor interactie tussen golven en stroming en refractie zijn meegenomen. Dit zit niet in het opgestelde 1D SWAN model.
- In het WTI-model is gebruik gemaakt van een andere SWAN versie (versie 40.72ABCDE in plaats van 41.20AB), waar voor de breking en white-capping de formulering van Van der Westhuysen is gebruikt in plaats van de formulering van respectievelijk Battjes en Janssen en Komen. Dit kan een verklaring zijn voor de verschillen.
- Tot slot is vooral de grotere afwijking bij hogere herhalingsstijden te verklaren doordat de uitkomsten uit Hydra-NL probabilistisch zijn. SWAN geeft een deterministische waarde, waardoor het wel of niet meenemen van onzekerheid een variatie in resultaat geeft.

Door de verschillen tussen de modellen is een zekere afwijking onvermijdelijk en verklaarbaar. De afwijking is constant in dezelfde orde, wat vertrouwen geeft in de robuustheid van het model.

Tabel 9 Vergelijking Hydra-NL en SWAN resultaten op 50 m van de dijkteen voor verschillende locaties en herhalings tijden

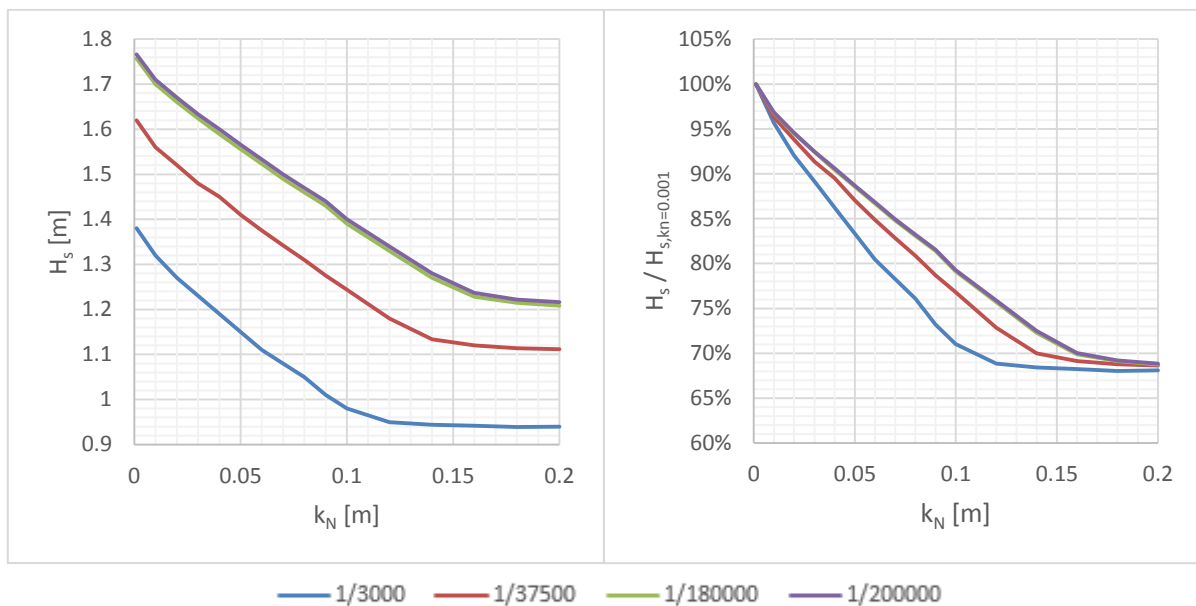
locatie [km]	terugkeer frequentie [/jr]	Hydra-NL		SWAN		Verskil golfhoogte	
		H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	[m]	%
22.3	1/3000	1.52	4.22	1.31	4.02	-0.21	-13.8%
	1/37500	1.85	4.64	1.56	4.30	-0.29	-15.8%
	1/180000	2.05	4.88	1.71	4.39	-0.34	-16.8%
	1/200000	2.06	4.89	1.72	4.40	-0.35	-16.9%
27.3	1/3000	1.50	3.79	1.35	3.90	-0.15	-9.7%
	1/37500	1.79	4.24	1.60	4.31	-0.19	-10.6%
	1/180000	1.97	4.51	1.74	4.45	-0.23	-11.6%
	1/200000	1.98	4.52	1.75	4.47	-0.23	-11.8%
32.2	1/3000	1.63	3.94	1.38	3.90	-0.25	-15.2%
	1/37500	1.95	4.32	1.62	4.21	-0.33	-16.9%
	1/180000	2.15	4.53	1.76	4.39	-0.39	-18.1%
	1/200000	2.16	4.54	1.77	4.41	-0.39	-18.1%
33.4	1/3000	1.67	4.01	1.42	3.99	-0.25	-14.9%
	1/37500	1.97	4.36	1.66	4.29	-0.32	-16.1%
	1/180000	2.17	4.59	1.80	4.49	-0.37	-16.9%
	1/200000	2.18	4.61	1.81	4.50	-0.37	-17.0%
36.3	1/3000	1.47	3.89	1.26	3.96	-0.22	-14.7%
	1/37500	1.80	4.31	1.51	4.25	-0.30	-16.4%
	1/180000	2.00	4.52	1.66	4.46	-0.34	-17.1%
	1/200000	2.01	4.53	1.67	4.47	-0.35	-17.1%
39.0	1/3000	1.58	3.96	1.36	3.91	-0.22	-14.1%
	1/37500	1.88	4.32	1.60	4.20	-0.27	-14.5%
	1/180000	2.06	4.55	1.75	4.40	-0.31	-15.0%
	1/200000	2.07	4.56	1.76	4.40	-0.31	-15.0%
41.9	1/3000	1.49	3.94	1.28	3.84	-0.21	-14.2%
	1/37500	1.79	4.34	1.53	4.13	-0.26	-14.4%
	1/180000	1.98	4.56	1.69	4.29	-0.30	-14.9%
	1/200000	1.99	4.58	1.70	4.34	-0.30	-15.0%

## 6. Case II: Gevoeligheidsanalyse SWAN

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de invloed van variërende ruwheid op de golfhoogte. Er wordt gekozen om de ruwheid tussen  $k_N = 0.001-0.2$  m te variëren, omdat hogere waarden niet voor zullen komen. Alle onderstaande grafieken zijn voor locatie 32.2 km, Bijlage I bevat de resultaten voor locatie 22.3 km.

### 6.1 Verschillende herhalingstijden

De verandering van de golfhoogte door oplopende ruwheid wordt bepaald voor de vier gekozen herhalingstijden met verschillende HR. De ruwheid wordt voor elk scenario gevarieerd tussen  $k_N = 0.001-0.2$  m. Figuur 18 toont de afname in golfhoogte bij de dijkteen met toenemende ruwheid voor de verschillende scenario's.



Figuur 18 Ruwheid tegen golfhoogte bij de dijkteen voor verschillende HR op locatie 32.2 km, links: absolute verandering, rechts: relatieve verandering ten opzichte van  $H_s$  op  $k_N = 0.001$  m

Bij hoge ruwheden wordt een punt bereikt dat de golfhoogte niet verder afneemt, dit kan worden verklaard door de eerder genoemde limiet dat aan de ruwheid vastzit in SWAN. De limiet wordt eerder bereikt voor lage golfhoogtes, aangezien:

$$a_b^2 \propto E(\sigma, \theta) \propto H_s^2$$

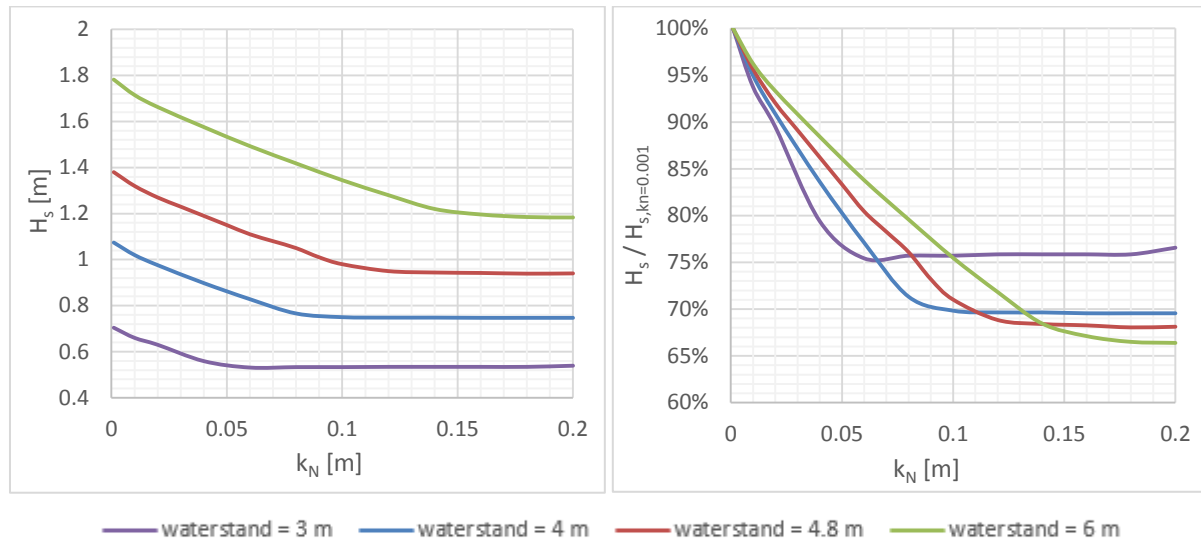
Ofwel bij afnemende golfhoogte neemt de golfenergie af, waardoor de 'representative near-bottom excursion amplitude'  $a_b$  afneemt. Omdat de limiet voor de ruwheidscoëfficiënt wordt bereikt voor  $\frac{a_b}{k_N} < 1.57$ , zorgt een kleinere  $a_b$  voor een eerdere bereiking van de limiet, ook als de  $k_N$  gelijk is.

Relatief gezien is de maximale afname in significante golfhoogte voor alle herhalingstijden rond de 30%. Voor een herhalingstijd van 1/3000 per jaar is de helling van de afname het grootst. De verklaring hiervoor wordt verwacht in de afhankelijkheid tussen de ruwheid en de waterdiepte. Door alleen de waterdiepte te variëren, kan bepaald worden of deze verwachting correct is. Ook de algemene relatie tussen waterdiepte en ruwheid wordt beschouwd.

### 6.2 Waterstandvariatie

Bij het variëren van de waterstand, worden de overige randvoorwaarden gelijk gehouden aan het scenario voor een herhalingstijd van 1/3000 per jaar. De rechter grafiek in Figuur 19 toont de golfhoogte uitgezet tegen de ruwheid voor verschillende waterstanden. Hier is het duidelijk zichtbaar

dat voor lage waterstanden de golfhoogte lager is en de limiet voor  $f_w$  eerder wordt bereikt. De rechter grafiek in Figuur 19 toont de relatie tussen  $k_N$  en  $H_s$  ten opzichte van de  $H_s$  bij  $k_N=0.001$ , ofwel relatieve golfhoogte. Hieruit volgt dat opnieuw de helling van de afname voor een lage waterstand het grootst is. De maximum uiteindelijke reductie is daarentegen aanwezig voor hogere waterstanden.



Figuur 19 *Ruwheid tegen golfhoogte bij de dijkteen voor verschillende waterstanden bij locatie 32.2 km, links: absolute verandering, rechts: relatieve verandering ten opzicht van  $H_s$  op  $k_N = 0.001$  m*

Door de relatie tussen waterdiepte en de ruwheid, neemt de  $k_N$  waarde toe naarmate de waterdiepte toeneemt om tot eenzelfde Manning waarde te komen, zie Tabel 7. Bij een lage waterstand zal dezelfde reductie in golfhoogte dus bij een kleinere  $k_N$  waarde optreden dan bij een hoge waterstand.

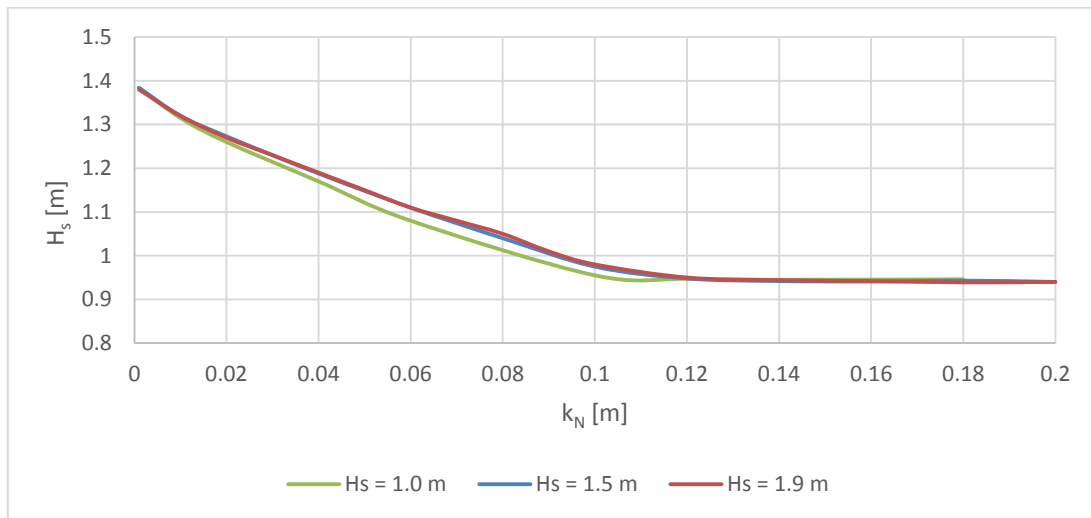
Om dit verder te analyseren wordt voor de ruwheid in de pionierzone, het grasland en de middenkwelder de reductie voor de vier waterstanden vergeleken. Bijlage H geeft de resultaten van deze analyse. Voor alle oppervlaktetypes blijkt dat indien de Nikuradse ruwheid wordt geschaald met de waterdiepte, waardoor de Manning ruwheid gelijk blijft, de afname in golfhoogte binnen een bandbreedte van 3% gelijk is. Een lage waterstand leidt met een bijbehorende kleinere  $k_N$  waarde dus tot eenzelfde orde afname in golfhoogte als een grote waterstand met hogere  $k_N$ . Ofwel, een grotere helling van de afname in relatieve golfhoogte voor lage waterstanden, zoals zichtbaar in Figuur 19. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de golfreductie groter is voor lage waterstanden, echter in het geval de ruwheidslengte  $k_N$  verandert met de waterdiepte is het verschil niet groter dan orde 3%.

### 6.3 Golfhoogtevariatie

Er wordt verwacht dat een hogere golfhoogte leidt tot meer wrijvingsdissipatie, omdat deze de bodem meer zal voelen. Om dit te verifiëren en het verband te analyseren, wordt de ruwheid gevarieerd voor verschillende golfhoogtes als hydraulische randvoorwaarde. De overige randvoorwaarden worden gelijk gehouden aan de herhalingsstijd van 1/3000 per jaar.

Uit Figuur 20 blijkt dat als enkel de golfhoogte aan de voorlandrand wordt aangepast, de golfhoogte bij de dijkteen bij een bepaalde ruwheid voor alle drie de initiële golfhoogtes in dezelfde orde zit. Dit strookt niet met de eerdere verwachting en kan verklaard worden door de balans tussen wind, breking en wrijving en de lengte van het voorland. Door de constante wind zullen lagere golven groeien tot ze de brekingslimiet hebben bereikt. Hogere golven breken waardoor ze verlagen tot de brekingslimiet. Door de lengte van het voorland is een punt bereikt waarop de invloed van de initiële condities niet meer aanwezig is. Bijlage I Figuur 48 geeft het resultaat als in Figuur 20 maar dan voor locatie 22.3 km

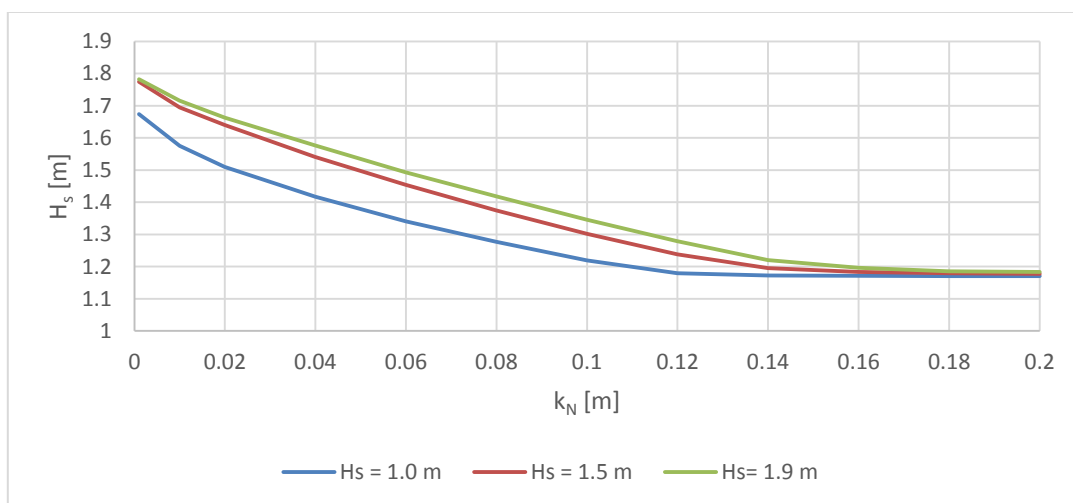
in plaats van 32.2 km. Doordat dit voorland korter is, heeft het dit punt nog niet bereikt, waardoor de inkomende golfhoogte nog wel van invloed is op de golfhoogte bij de dijkteen.



Figuur 20 Golfhoogte bij de dijkteen tegen  $k_N$  voor verschillende initiële golfhoogtes bij locatie 32.2 km

Om puur de relatie tussen golfhoogte en frictie te bepalen, is het dus noodzakelijk om dit evenwichtspunt te verlengen, bijvoorbeeld door de rol van breking te verkleinen. Daarom is ervoor gekozen om de waterstand tot 6 m te verhogen. Dezelfde drie significante golfhoogtes worden als randvoorwaardes opgegeven, met gelijke windsnelheid.

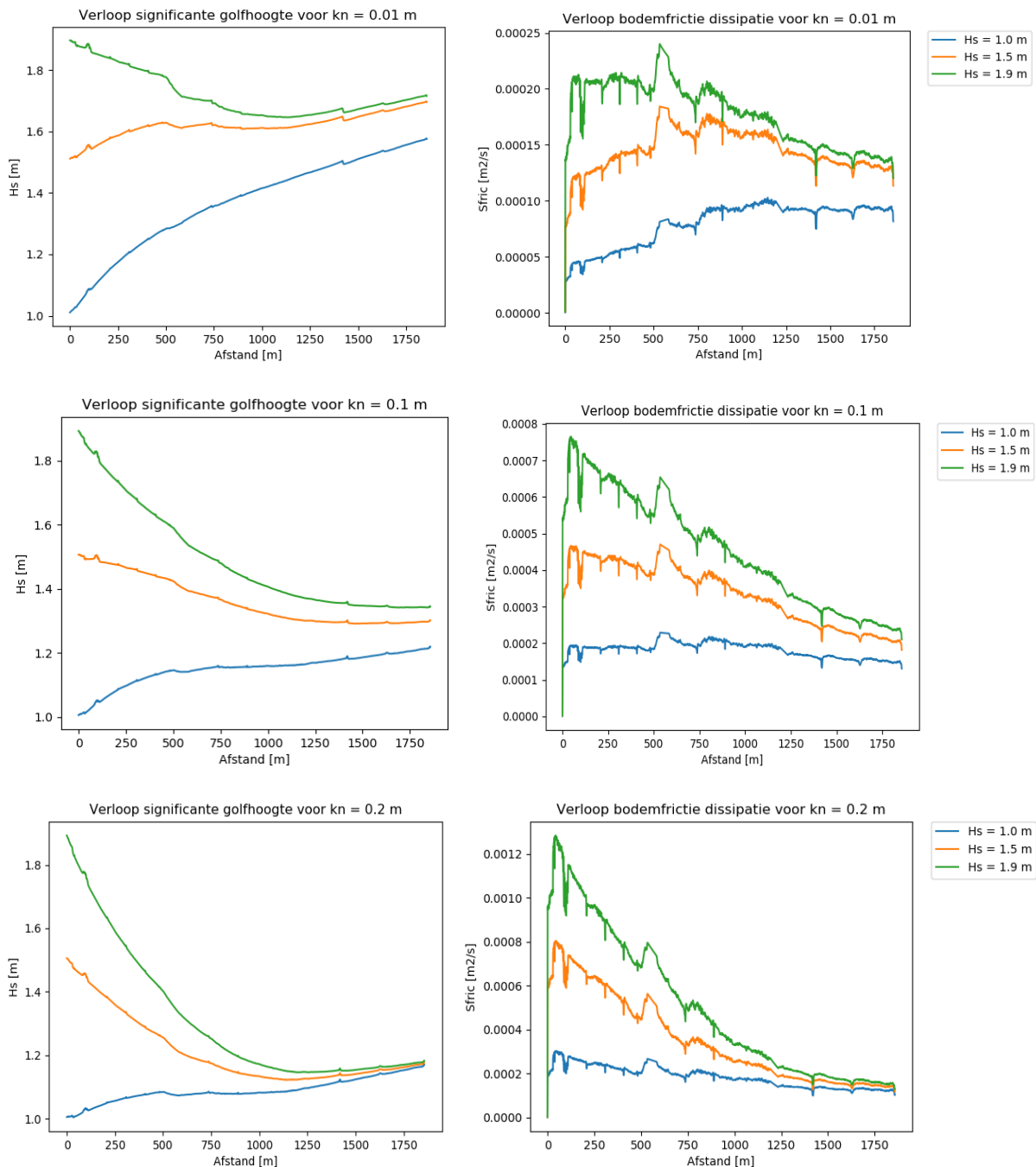
Figuur 21 toont dat de variatie in golfhoogtes bij de dijkteen groter is bij deze grotere waterdiepte. De initiële significante golfhoogte heeft nu dus wel invloed op de golfhoogte bij de dijkteen. Bij hoge ruwheidslengtes wordt de golfhoogte bij de dijkteen voor alle initiële golfhoogtes gelijk, wat verklaart kan worden door de balans tussen wind input en bodemfrictie. Een hogere bodemwrijving zal ertoe leiden dat hogere golfhoogtes sneller afnemen, waardoor de golfhoogtes convergeren.



Figuur 21 Golfhoogte bij de dijkteen tegen  $k_N$  voor verschillende initiële golfhoogtes voor locatie 32.2 km bij waterstand = 6 m

De resulterende golfhoogte bij de dijkteen is voor hoge ruwheden, of een zodanig lang voorland dat de initiële condities geen invloed meer hebben, dus onafhankelijk van de opgelegde initiële golfhoogte. De minimale hiervoor benodigde voorlandlengte is afhankelijk van de ruwheid, waterdiepte en wind. Een herhalingstijd van 1/3000 per jaar met normale waterstand en  $k_N = 0.01$  m leidt tot een minimale voorlandlengte van ongeveer 1200 m, bij  $k_N = 0.2$  m is de minimale lengte rond de 1100 m.

Als de dissipatie door bodemwrijving geplot wordt over de afstand voor de verschillende golfhoogtes, is zichtbaar dat de dissipatie groter is voor grotere initiële significante golfhoogtes, zie Figuur 22. Dit bevestigt dat een grotere golfhoogte meer frictie ondervindt, wat ook kon worden afgeleid uit de formule voor bodemfrictie,  $S_{bfr}$ , in sectie 4.3.1. De linker grafieken in Figuur 22 tonen het verloop van de golfhoogte voor verschillende initiële golfhoogtes en ruwheden. Hierin is voor hoge ruwheid duidelijk het convergerende karakter zichtbaar, waardoor bij de dijkteen de golfhoogte onafhankelijk is van de randvoorwaarde. Het opgestelde SWAN model is in zekere mate conservatief, doordat de significante golfhoogte onderschat wordt en dus ook de invloed van frictie. Een onderschatting van de golfhoogte geeft dus een kleine onderschatting van de golfdemping door wrijving, wat als conservatief kan worden gezien.

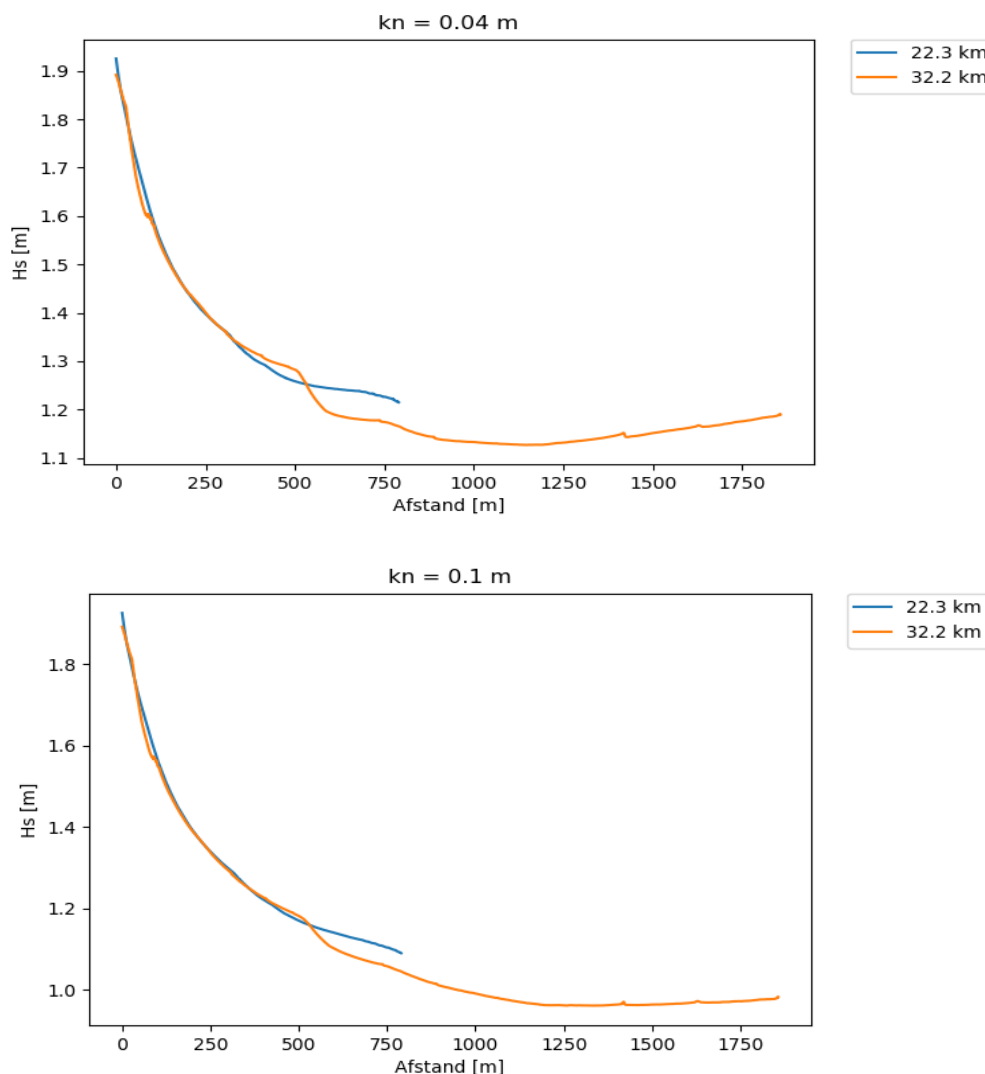


Figuur 22 Verloop significante golfhoogte en bodemwrijvingsdissipatie bij verschillende initiële golfhoogtes en een waterstand van 6 m bij locatie 32.2 km voor respectievelijk  $kn = 0.001$  m, 0.1 m en 0.2 m

#### 6.4 Lengte-effect voorland

Als de bodemvariatie klein is, ontstaat de situatie dat de wind input en bodemwrijving in balans komen. Hiervoor is een zekere voorland lengte nodig om het balans te bereiken. Bij nagenoeg gelijke windcondities en een vergelijkbaar bodemprofiel, zouden de verschillende profielen eenzelfde orde evenwichtssituatie hebben. Indien ook de randvoorwaarden overeenkomen, zal het verloop nagenoeg hetzelfde moeten zijn.

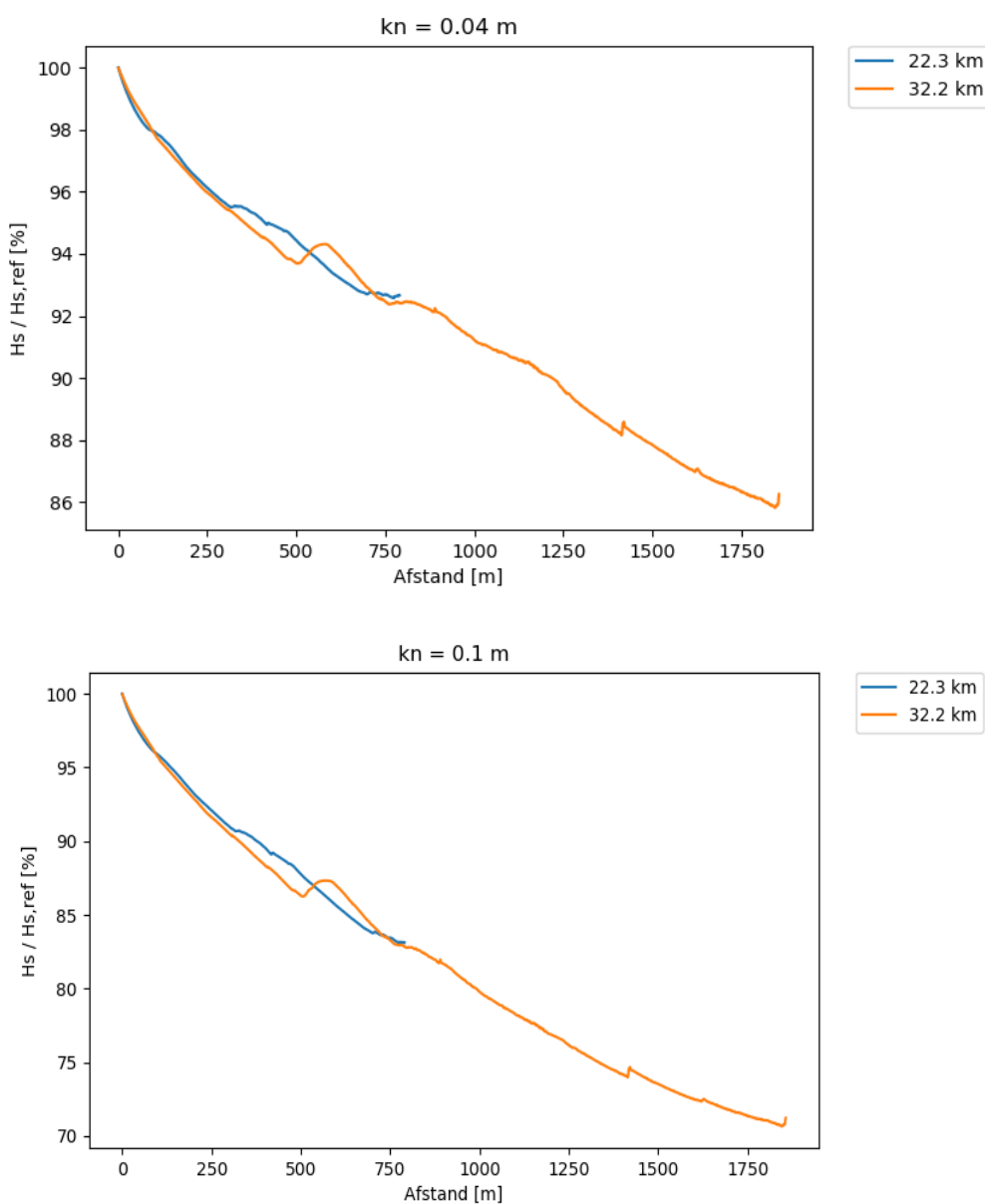
Om dit te testen zijn in Figuur 23 de verlopen van de significante golfhoogte voor profiel 22.3 km en 32.2 km geplot. Hieruit volgt dat het verloop voor 22.3 en 32.2 km grotendeels gelijk loopt, mede doordat de hydraulische randvoorwaarden in dezelfde orde zijn. Vanaf 550 m is er een dip zichtbaar in de golfhoogte op profiel 32.2 km, welke kan worden verklaard door de verhoogde oever van een kweldersloot in dit profiel. Deze is er deels uitgefilterd, echter een bodemverhoging is nog wel aanwezig. Deze verandering is niet aanwezig in profiel 22.3 km, waardoor deze geen dip in golfhoogte vertoont. Voor profiel 32.2 km neemt de golfhoogte vanaf 1000 m toe tot de dijkteen, deze toename in golfhoogte tot de dijkteen is groter voor lage ruwheidslengte. De toenemende golfhoogte wordt veroorzaakt door een toenemende waterdiepte. De lagere bodemligging nabij de dijk kan worden verklaard door de aanwezigheid van de zomerkade, welke verhindert dat het voorland achter de kade mee kan groeien met de zeespiegel. De kwelder buitendijks van de zomerkade heeft deze aangroei wel, waardoor dit land hoger ligt.



Figuur 23 Verloop van de significante golfhoogte voor locaties 22.3 km en 32.2 km voor respectievelijk  $k_N = 0.04$  m en  $k_N = 0.1$  m

Omdat voor het gehele voorland de HR relatief gelijk zijn, kan de afname in significante golfhoogte voor een bepaalde ruwheid worden geschat op basis van profiel 32.2 km, welke nagenoeg de grootste lengte heeft. Ook kan worden geschat wat de lengte en ruwheid moet zijn voor het bereiken van een bepaalde afname in golfhoogte. Echter, dit is geldig in het geval dat de deviatie in bodemprofiel en randvoorwaarden ten opzichte van 32.2 km klein is.

Figuur 24 geeft het verloop van de golfhoogte over afstand relatief aan de situatie met een gladde bodem. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de relatieve afname groter wordt met toenemende voorlandlengte. In dit geval zorgt een meer dan twee maal zo lang voorland voor 6-11% meer reductie. De relatieve golfhoogtereductie bij de dijkteen voor 32.2 km is dan ook 1.5-1.8 maal zo groot als voor 22.3 km. Dit is fysisch gezien logisch; omdat de golf langer beïnvloed wordt door bodemwrijving zal het effect groter zijn. Tot slot is het golfhoogteverloop voor de verschillende profielen ook relatief gezien nagenoeg gelijk.



Figuur 24 Relatieve verloop van de significante golfhoogte voor locaties 22.3 km en 32.2 km voor respectievelijk  $k_N = 0.04$  m en  $k_N = 0.1$  m



---

## 6.5 Conclusie gevoeligheidsanalyse

Uit bovenstaande analyse kunnen de volgende punten worden geconcludeerd:

- **Invloed waterstand:**

Een grotere waterstand leidt tot een hogere significante golfhoogte bij dijkteen. Dit is mede het effect van breking, wat eerder optreedt bij lage waterstanden. Uit de analyse en de formulering van Brettschneider volgt dat de ruwheid afhankelijk is van de waterdiepte. Een lage waterstand leidt met een kleinere  $k_N$  waarde tot dezelfde afname in golfhoogte als een hoge waterstand met grotere  $k_N$  waarde. Ofwel, lagere ruwheidslengtes hebben een groter effect bij kleine waterstanden. In het geval de  $k_N$  waarde per waterstand wordt geschaald, leidt een lage waterstand van 3 m tot een zelfde orde reductie als een hoge waterstand van 6 m.

Tot slot wordt de limiet in ruwheid in SWAN eerder bereikt voor lage waterstanden, door de afhankelijkheid van de golfenergie en de waterdiepte. Hierdoor is de maximale relatieve golfhoogtereductie in SWAN kleiner voor lage waterstanden.

- **Invloed golfhoogte:**

Een hogere significante golfhoogte voelt de bodem meer, waardoor dissipatie door bodemwrijving groter is. Voor hoge ruwheden of grote voorlandlengtes, in de orde  $L > 1200$  m, is de resulterende golfhoogte bij de dijkteen tijdens maatgevende HR condities nagenoeg onafhankelijk van de initiële significante golfhoogte. Dit is het gevolg van de balans tussen de fysische processen. In het geval breking een dominante rol speelt, ofwel voor relatief lage waterstand, zal dit de golfhoogte zodanig beïnvloeden dat de balanssituatie eerder wordt bereikt. Als dit punt is bereikt, is de golfhoogte bij de dijkteen onafhankelijk van de inkomende golfhoogte op de buitenrand van het voorland.

- **Lengte-effect:**

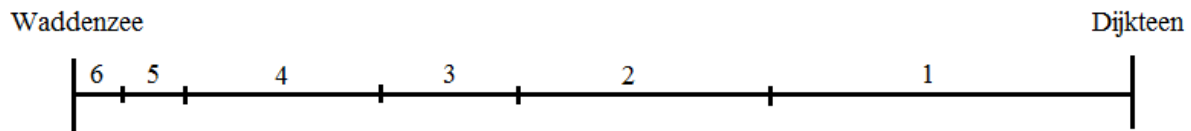
De lengte van het voorland is bepalend of een situatie wordt bereikt die onafhankelijk is van de initiële condities. Bij gelijke randvoorwaarden zal het verloop van de significante golfhoogte nagenoeg gelijk zijn. Hierdoor kan de afname in golfhoogte bij een bepaalde ruwheid en voorlandlengte worden geschat op basis van een langer voorland. Een langer voorland zal een grotere afname in golfhoogte tot gevolg hebben, omdat de golf langer beïnvloed wordt door de bodem.

## 7. Case III: Implementatie vegetatie

Om een beeld te krijgen van de optredende golfdemping van de vegetatie, wordt voor locatie 32.2 km de aanwezige vegetatie zo realistisch mogelijk gemodelleerd in dit hoofdstuk. De resultaten voor locaties 22.3 km, 36.3 km en 39.0 km zijn in Bijlage J ingevoegd. Er wordt uitgegaan van de situatie tijdens de wintermaanden, omdat in deze periode de maatgevende omstandigheden optreden.

### 7.1 Ruwheidsvariatie per locatie

Aan de hand van de vegetatiekaart in paragraaf 2.4 en eigen observaties is de volgende verdeling aangemaakt. Het profiel is opgedeeld als gegeven in Figuur 25, waarin elk lengtestuk een verandering in vegetatie aangeeft. Tussen 1 en 2 is de zomerkade aanwezig.



Figuur 25 Opdeling van profiel 32.2 km op basis van vegetatietype

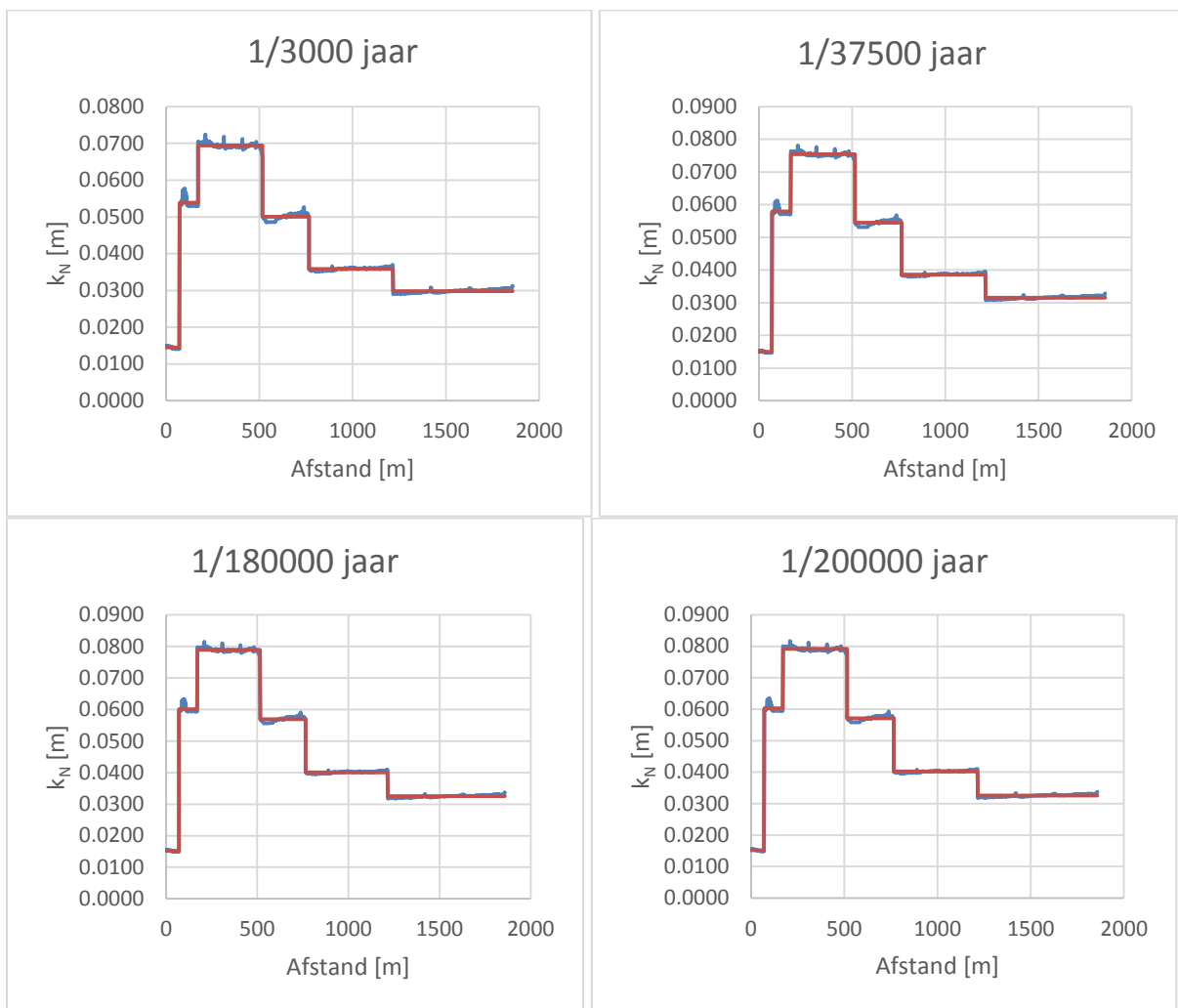
De kenmerken en ruwheden van de stukken zijn in Tabel 10 weergegeven. Aan de hand van de waterdiepte en Manning waarde wordt per locatie de ruwheidslengte  $k_N$  bepaald met de vergelijking van Brettschneider, als aangegeven in sectie 4.3.1.

Tabel 10 Oppervlaktetypen per lengtestuk voor profiel 32.2 km

Locatie	Lengte	Kenmerken	Oppervlaktetype	Manning n
1	642	Kort gras	Grasland	0.042
2	450	Kort gras, schorrenkruid	Lage kwelder	0.045
3	250	Lang gras	Middenkwelder	0.05
4	345	Lang gras, zeeaster	Hoge kwelder	0.055
5	100	Lang gras, zoutmelde	Middenkwelder	0.05
6	70	Slijkgras en zeekraal	Pionierzone	0.035

Lengtestuk 1 wordt gebruikt als weiland, in de wintermaanden is het gras kort gegeten door vee en ganzen. Daarom zal dit stuk als grasland worden geschematiseerd. Stuk 2 is zichtbaar wilder, met aanwezigheid van schorrenkruid en kweldergras. Dit heeft geleid tot een schematisatie als lage kwelder. Stuk 3 lijkt op het voorgaande stuk, echter de gemiddelde vegetatie is dichter en hoger, daarom zal dit als middenkwelder worden gezien. Lengtestuk 4 bevat vermoedelijk zeeaster en dicht, lang gras wat wordt geschematiseerd als hoge kwelder. Vervolgens zijn op lengtestuk 5 lange grashalmen aanwezig met bosjes zoutmelde. Door de hoogte van de vegetatie wordt gekozen om het als middenkwelder te schematiseren. Tot slot bevat stuk 6 slijkgras en zeekraal, welke kenmerkend zijn voor de pionierzone.

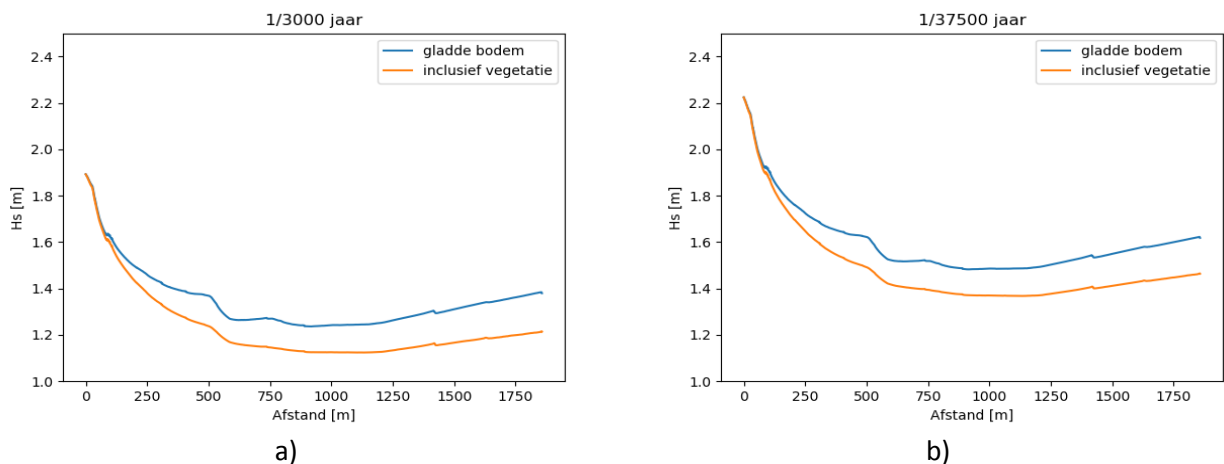
De golfreductie wordt bekeken voor de vier scenario's, ofwel de maatgevende HR, als eerder bepaald. De gemiddelde waterdiepte voor een lengtestuk wordt genomen om locatiespecifieke variaties te vermijden. Dit levert de ruwheidsverlopen voor de verschillende HR als gegeven in Figuur 26. Hier valt op dat de gemiddelde ruwheidswaarde voor een lengtestuk ook een goede representatie geeft, omdat de bodemvariatie relatief klein is.

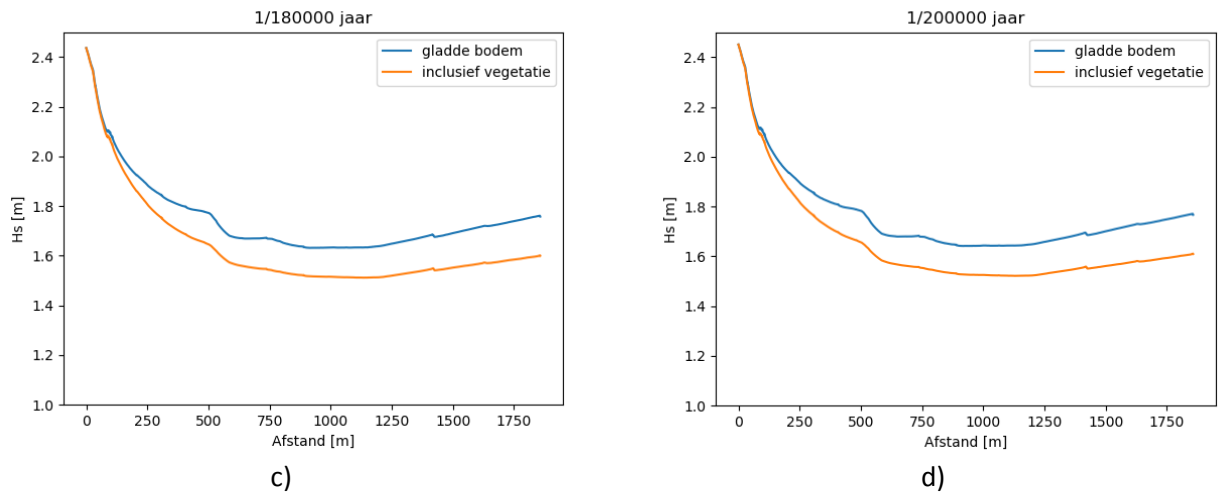


Figuur 26 Variatie van de ruwheidslengte geschaald aan de aanwezige waterdiepte voor de verschillende HR scenario's bij locatie 32.2 km; blauw: per grid punt, rood: gemiddeld over een lengtestuk

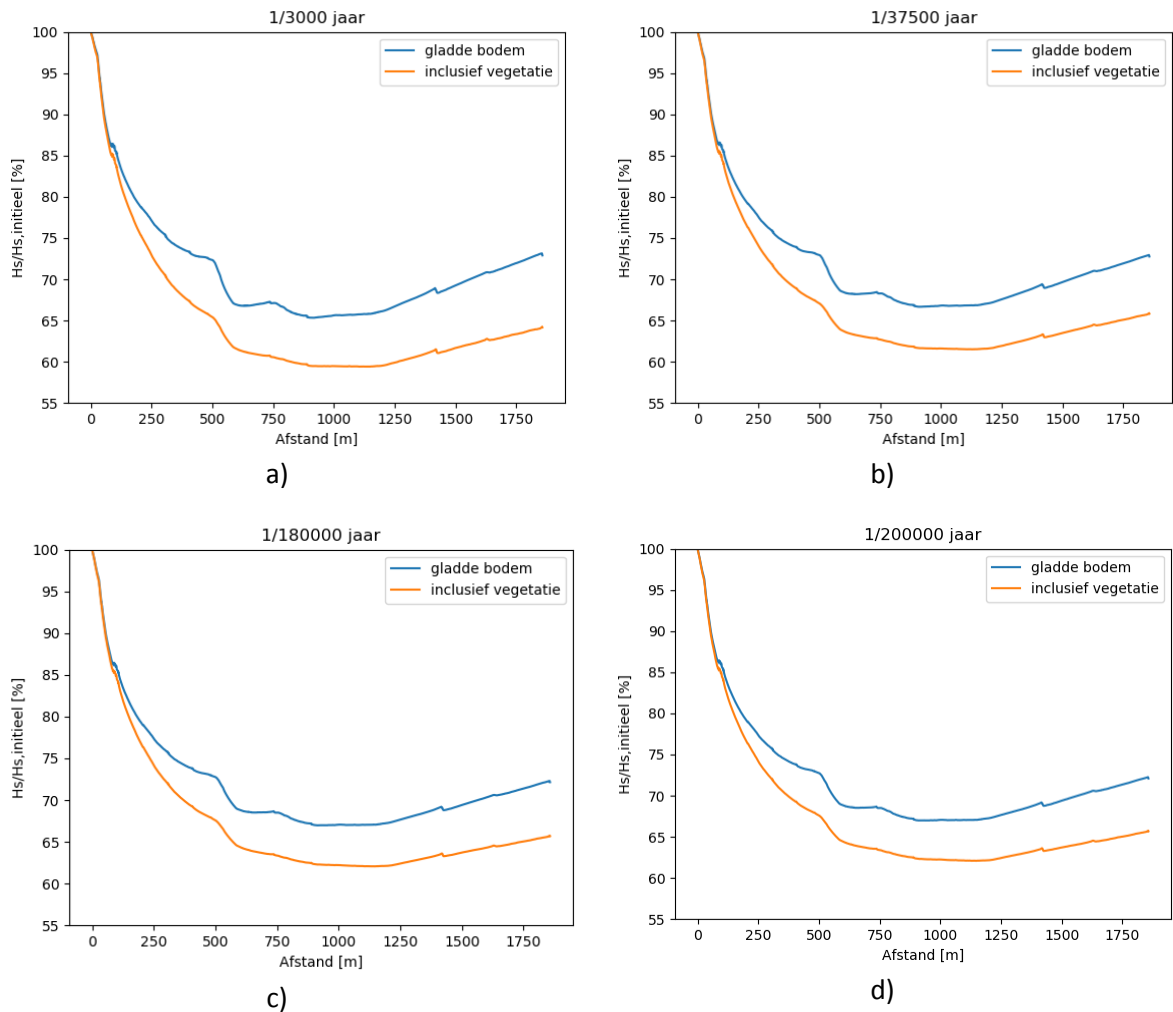
## 7.2 SWAN resultaten inclusief vegetatie

De grafieken in Figuur 27 en 28 geven de absolute en relatieve significante golfhoogte voor de vier HR bij een gladde bodem, met  $k_N=0.001$  m, en de geschatte aanwezige ruwheid. Hieruit blijkt dat het verloop en de afname voor ieder scenario in de zelfde orde is. Dit bevestigt de eerder getrokken conclusie dat bij een dergelijk diepte-gelimitoerd en lang voorland de inkomende golf minder van belang is voor de relatieve golfreductie. De waterstand zorgt vooral voor een hogere absolute golfhoogte bij hogere waterstand, de invloed op de relatieve reductie is beperkt.





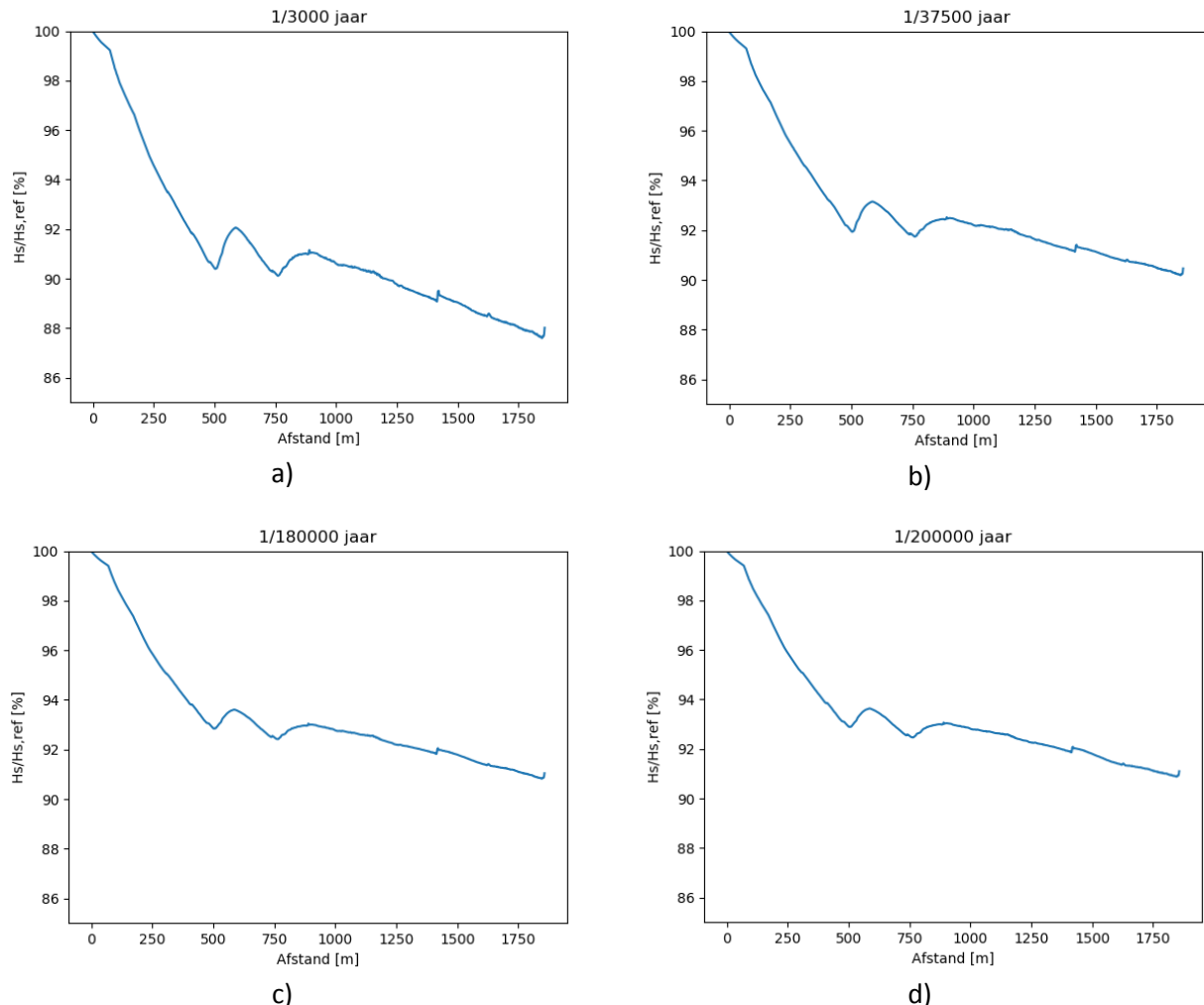
Figuur 27 Verloop van de significante golfhoogte tot de dijkteen voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar



Figuur 28 Verloop van de significante golfhoogte ten opzichte van de initiële golfhoogte voor gladde bodem en vegetatie voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

Het effect van enkel de vegetatie is gegeven in Figuur 29, waarin de golfhoogte relatief aan de situatie bij een gladde bodem is geplot. Dit geeft dus de extra reductie over het voorland door vegetatie. De

knikken bij 500-800 m worden veroorzaakt door een combinatie van een bodemvariatie en de ruwheid. Op 500 m neemt de waterdiepte af wat golfbreking veroorzaakt. Vegetatie dempt als het ware deze breking, waardoor de golfhoogte bij vegetatie ten opzichte van de referentie case groter is. In het geval de waterdiepte toeneemt, 600-700 m vanaf de voorlandrand, zorgt de vegetatie voor snellere afname van de golfhoogte.



Figuur 29 Verloop van de significante golfhoogte inclusief vegetatie ten opzichte van een gladde bodem voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

De resultaten zijn verwerkt in Tabel 11. De eerste kolom geeft voor elk van de HR de reductie van de initiële golfhoogte over het voorland met gladde bodem. Dit is dus de reductie hoofdzakelijk veroorzaakt door de verhoogde bodemligging. De toevoeging van vegetatie met min of meer realistische ruwheid leidt tot een totale golfhoogtereductie als gegeven in de tweede kolom. De ruwheid zorgt dus voor ongeveer 6-9% extra reductie van de initiële golfhoogte. De golfhoogte bij de dijkteen is via Hydra-NL reeds bekend, daarom is het van belang wat de reductie in golfhoogte bij de dijkteen is door de ruwheid. Dit is gegeven in de laatste kolom, waar een reductiefactor is gegeven voor de golfhoogte bij de dijkteen. Deze factor is bepaald door de verhouding tussen de SWAN berekening met ruwheid en gladde bodem:

$$Reductiefactor = \frac{H_{dijkteen,SWAN,ruw}}{H_{dijkteen,SWAN,glad}}$$

Het SWAN model geeft een onderschatting van de golfhoogte vergeleken met Hydra-NL. Er wordt aangenomen dat de reductiefactor voor beide resultaten in dezelfde orde zal zitten, omdat hier het

relatieve verschil wordt bekeken. De verschillen tussen de maatgevende HR bij locatie 32.2 km zijn klein, met een gemiddelde waarde gelijk aan 0.9.

Tabel 11 Reductie door geschatte vegetatie, laatste kolom: reductiefactor voor de golfhoogte uit Hydra-NL

HR [per jaar]	Totale reductie gladde bodem	Totale reductie inclusief vegetatie	Extra reductie vegetatie t.o.v. gladde bodem	Reductiefactor voor golfhoogte bij dijkteen uit Hydra-NL
1/3000	27%	36%	9%	0.88
1/37500	27%	34%	7%	0.90
1/180000	28%	34%	6%	0.91
1/200000	28%	34%	6%	0.91

### 7.3 Conclusie implementatie vegetatie

Uit SWAN volgt dat de relatieve golfhoogtereductie over een gladde bodem voor alle vier HR in dezelfde orde is. De extra ruwheid is afhankelijk van het type vegetatie en de waterstand. Doordat de ruwheidslengte is geschaald met de waterstand, is de extra reductie door vegetatie voor de HR relatief gelijk. Een andere belangrijke conclusie uit de analyse is dat de golfhoogtereductie door de verhoogde ligging van het voorland significant meer impact heeft dan het toevoegen van vegetatie. Door de reductie voor de verschillende locaties te vergelijken valt het volgende op:

- Een hogere ruwheid in combinatie met een grote lengte leidt tot de grootste afname in golfhoogte, zoals voor locatie 32.2 km.
- Een langer voorland geeft niet per definitie een grotere reductie, wat kan worden gezien in de vergelijking tussen 22.3 km en 36.3 km. Het bodemprofiel bij locatie 36.3 km loopt voor de dijkteen plots sterk op, waardoor de golfhoogte afneemt door golfbreking. Relatief gezien is deze breking voor een gladde bodem groter dan voor een ruwe bodem, wat in feite leidt tot minder reductie voor een ruwe bodem vergeleken met een gladde bodem. Dit bevestigt dat de omstandigheden vlak voor de dijkteen bepalend zijn en zelfs het reducerende effect van een lang voorland deels kan tegenwerken.
- Daarnaast is de locatie van de ruwheid van belang, al dan niet met een relatief kleine invloed. Meer ruwheid bij de dijkteen leidt tot een iets grotere reductie in golfhoogte.

Door de significante golfhoogte op 50 m van de dijkteen uit Hydra-NL te vermenigvuldigen met de reductiefactor, kan een inschatting gegeven worden voor de golfhoogte indien vegetatie wordt meegenomen. De resultaten hiervan zijn gegeven in de laatste kolom van Tabel 12. De golfhoogtes zijn exclusief de modelonzekerheden conform het WBI, welke volgens de wettelijke normen hierbij moeten worden opgeteld.

Tabel 12 implementatie vegetatie in golfhoogte op 50 m van de dijkteen uit Hydra-NL voor locatie 32.2 km

HR [per jaar]	Hydra-NL	Reductiefactor	Hydra-NL incl. vegetatie
	H <sub>s</sub> [m]	[-]	H <sub>s</sub> [m]
1/3000	1.63	0.88	1.43
1/37500	1.95	0.90	1.76
1/180000	2.15	0.91	1.96
1/200000	2.16	0.91	1.97

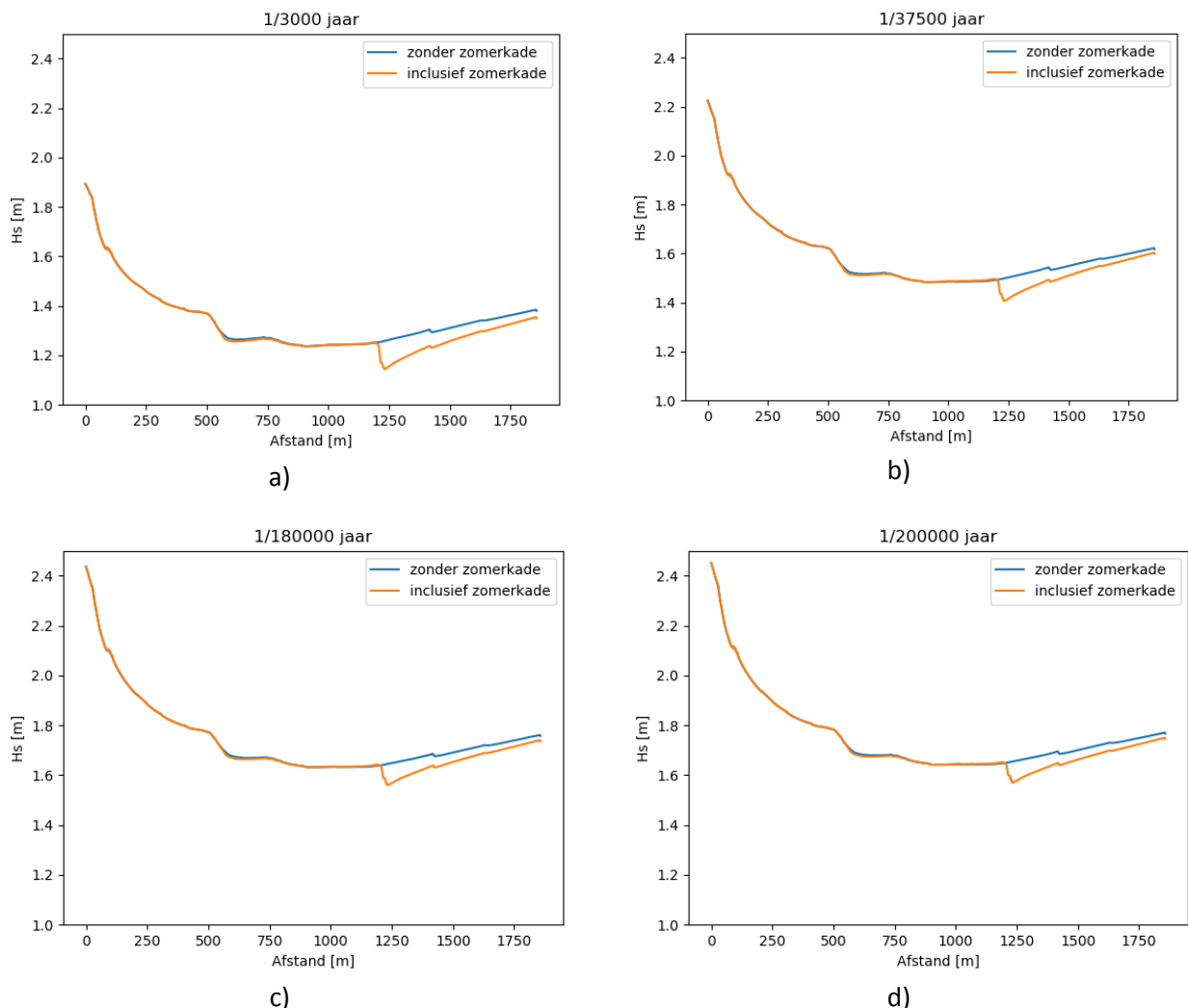
## 8. Case IV: Effect zomerkade

Nu een schatting is gemaakt voor de invloed van vegetatie, wordt gekeken of het mogelijk is om het effect van de zomerkade in SWAN te bepalen. Hiervoor wordt het originele bodemprofiel alleen gefilterd op sloten, de zomerdijk blijft in het profiel aanwezig. Zoals eerder aangegeven is de zomerkade niet over het gehele voorland aanwezig, daarom is dit alleen van invloed op locaties 27.3 km, 32.2 km, 33.4 km en 36.3 km. In het vervolg van dit hoofdstuk is de situatie voor locatie 32.2 km uitgewerkt, de resultaten voor de overige locaties zijn gegeven in Bijlage K.

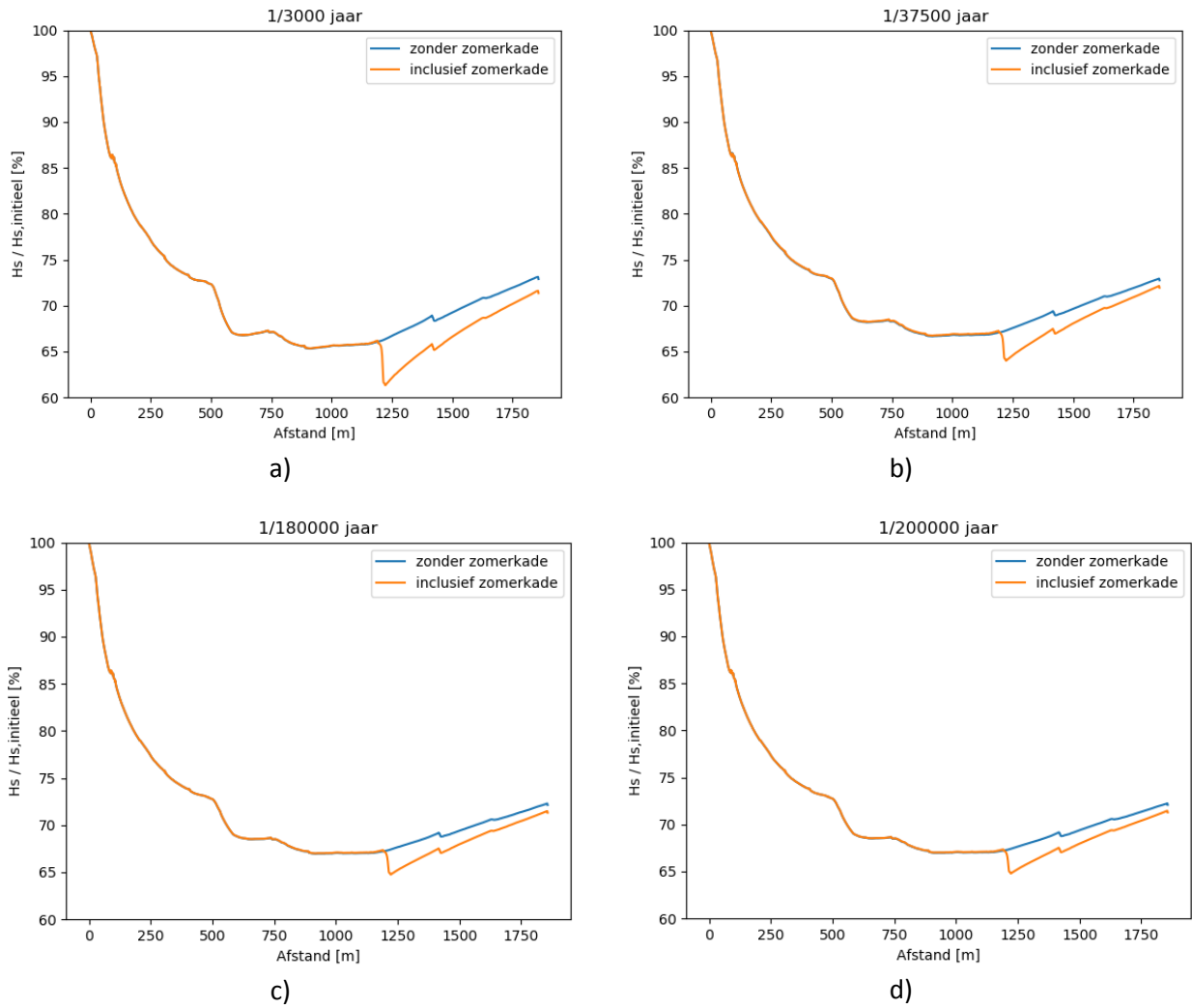
### 8.1 SWAN resultaten inclusief zomerkade

Figuur 30 toont het verloop van de significante golfhoogte voor locatie 32.2 km. De zomerkade is aanwezig rond 1210 m vanaf de rand van het voorland. Hier is een dip zichtbaar in de oranje lijn veroorzaakt door de zomerkade. Door wind input en grotere waterdiepte neemt de golfhoogte richting de dijk toe. Bij het meenemen van de zomerdijk is deze toename groter, wat tot gevolg heeft dat het verschil in golfhoogte op 50 m van de dijkteen nihil is. Bij de dijkteen is de reductiefactor gelijk aan:

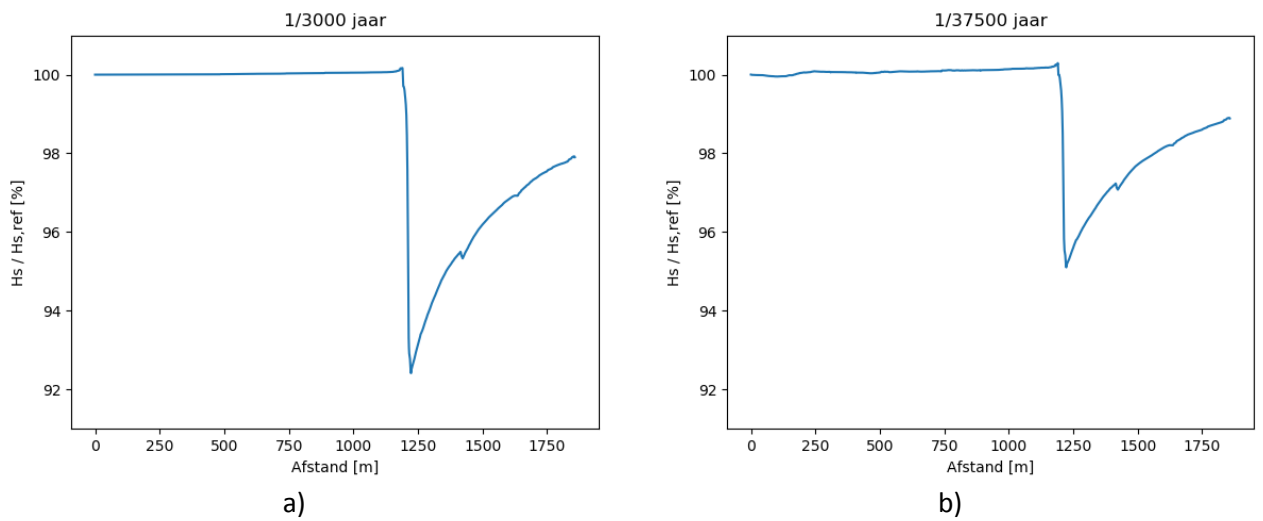
$$reductiefactor = \frac{H_{dijkteen,kade}}{H_{dijkteen,geen kade}} = \frac{1.35}{1.38} = 0.98$$



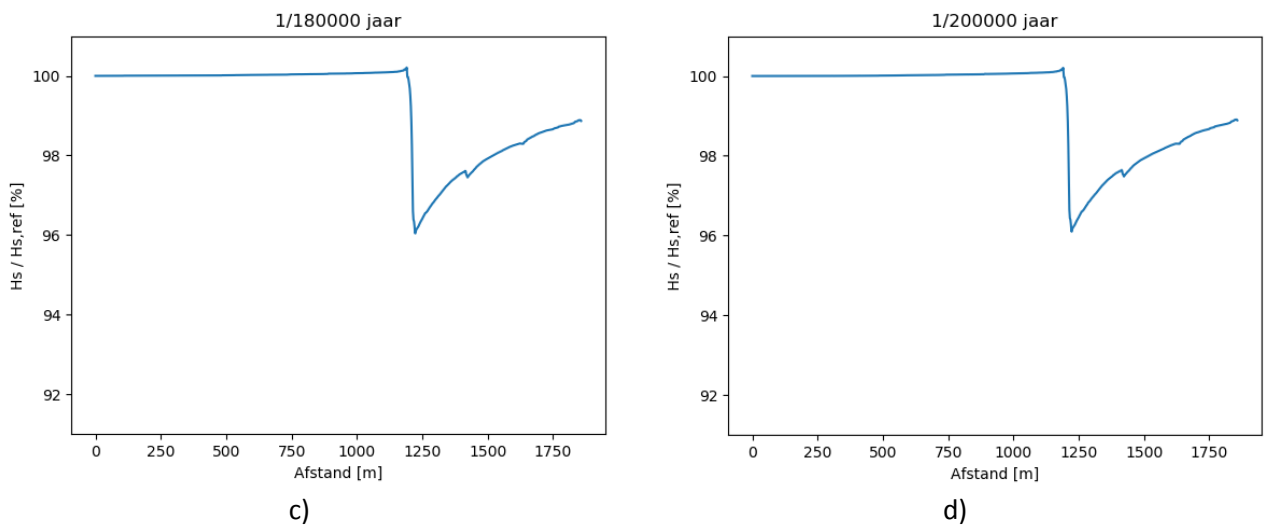
Figuur 30 Verloop van de golfhoogte over het voorland met en zonder zomerdijk voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar



Figuur 31 Verloop van de golfhoogte ten opzichte van de initiële golfhoogte met en zonder zomerkade voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar







Figuur 32 Verloop van de significante golfhoogte inclusief zomerkade ten opzichte van een gefilterd bodemprofiel voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

## 8.2 Conclusie effect zomerkade

Aan de hand van de hiervoor besproken resultaten lijkt het effect van de zomerkade klein te zijn. De reductie in golfhoogte direct achter de kade is in de orde van 5-10%. De reductie is het grootst voor een terugkeertijd van 1/3000 per jaar, omdat hier de waterstand het laagst is. Opvallend is dat de reductie voor locatie 27.3 km een factor drie hoger is dan voor alle overige profielen, zie bijlage. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de aanwezige zomerkade hier enkele decimeters hoger ligt dan bij de andere doorsnedes. Dit is getest door de kade bij doorsnede 27.3 km te verlagen tot een maximum van NAP+2.8 m, waarna de reductie in dezelfde orde kwam als bij de overige profielen, met een maximale reductie van 14% bij een herhalingstijd van 1/3000 per jaar. Echter, ook hier is de reductie bij de dijkteen nihil.

De wind input zorgt voor een dusdanige toename van de golfhoogte dat de golfhoogte op 50 m van de dijkteen slechts in de orde van 2% lager is dan zonder zomerkade. Dit is een gevolg van het feit dat tussen de zomerkade en de dijkteen voor locatie 32.2 km een afstand van 500 m aanwezig is, dit is ongeveer een derde van het voorland. Ook voor de overige locaties is de afstand significant. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de zomerkade effectiever wordt naarmate de afstand tot de dijkteen afneemt en de kruinhoogte toeneemt.

Uit eerder onderzoek naar de effectiviteit van zomerkades voor het POV [32] bleek de reductie groter, zowel direct achter de kade als bij de dijkteen. Dit heeft verschillende oorzaken:

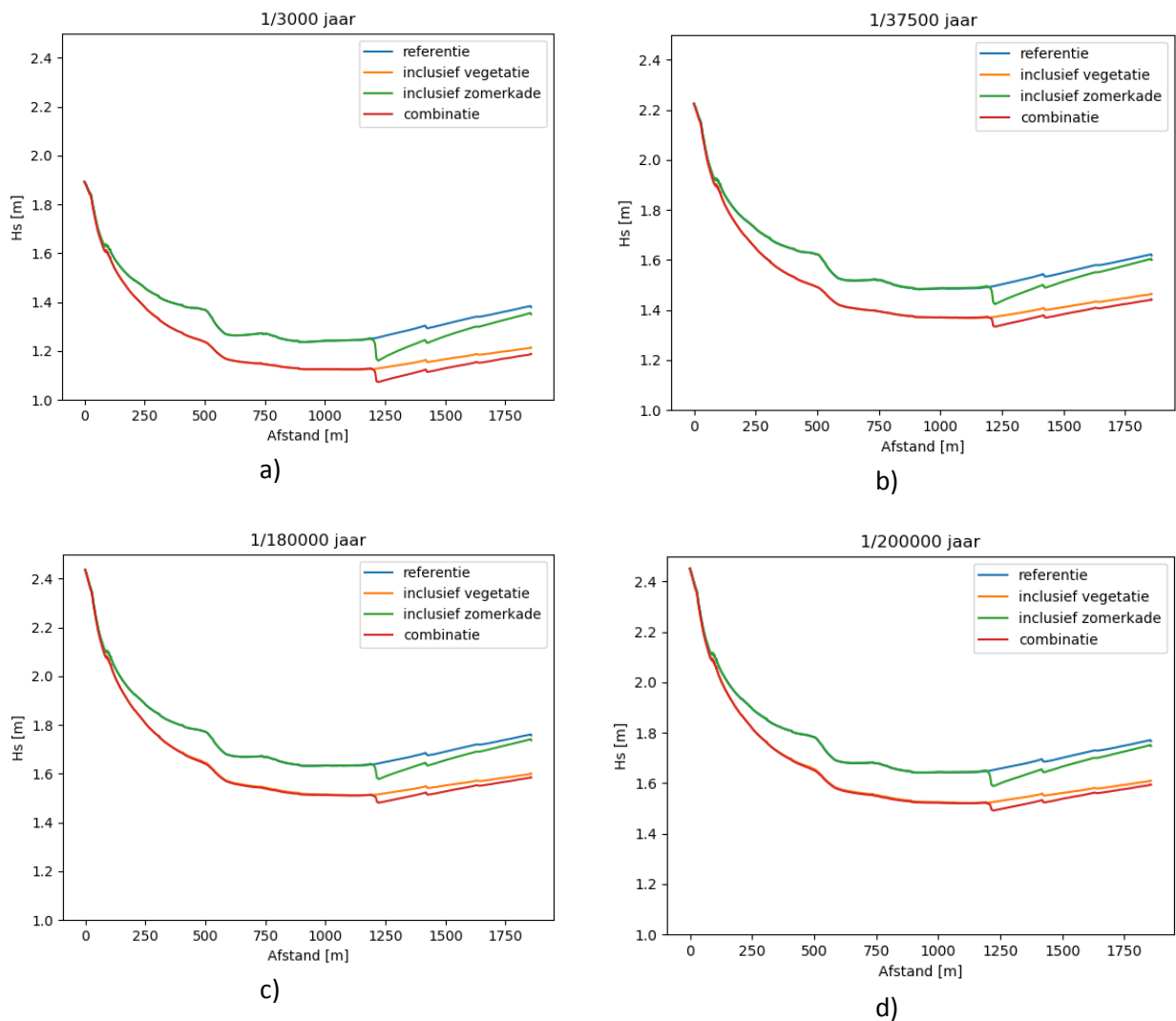
- In het POV is de bodem vlak aangenomen met een kwelder op +1.6 m. De in dit onderzoek gebruikte bodemprofielen hebben over het algemeen een hogere ligging waardoor de golfhoogte voor de zomerdijk al een grotere reductie ondervindt door breking. Hierdoor is de golfhoogte voor de zomerkade lager dan bij het POV.
- Ten tweede is de gebruikte waterstand lager in het POV, waardoor breking op de zomerkade eerder optreedt. Dit in combinatie met een hogere golfhoogte resulteert in een versterking van het effect.
- Daarnaast is er in het POV geen golfgroei door wind meegenomen na de zomerkade. Uit bovenstaande grafieken volgt dat de golfgroei na de zomerkade zodanig is dat het effect van de dam klein is bij de dijkteen.

## 9. Case V: Combinatie vegetatie en zomerkade

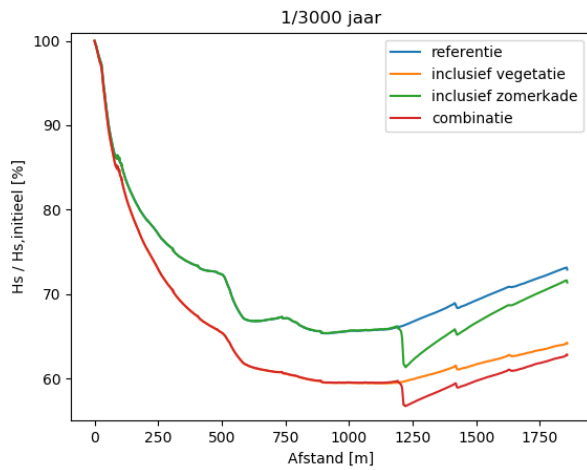
Tot slot wordt er gekeken naar het effect van de vegetatie gecombineerd met de zomerkade. Hierbij wordt gekeken naar locatie 32.2 km, omdat voor deze locatie de vegetatie het meest betrouwbaar is bepaald en een zomerkade aanwezig is.

### 9.1 SWAN resultaten

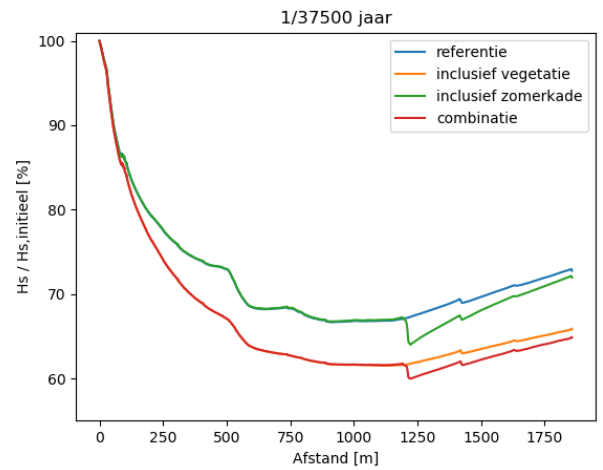
De simulatie wordt opnieuw voor de vier maatgevende HR uitgevoerd. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 33, Figuur 34 en Figuur 35. Eerst wordt het absolute verloop van de golfhoogte weergegeven, vervolgens het verschil ten opzichte van de initiële golfhoogte over afstand en tot slot het verloop ten opzichte van de referentie met gladde bodem. De grafieken bevatten mede de resultaten uit de eerdere cases voor enkel vegetatie of zomerkade. Hierdoor is goed het verschil zichtbaar tussen de verschillende componenten en de combinatie van vegetatie en zomerkade.



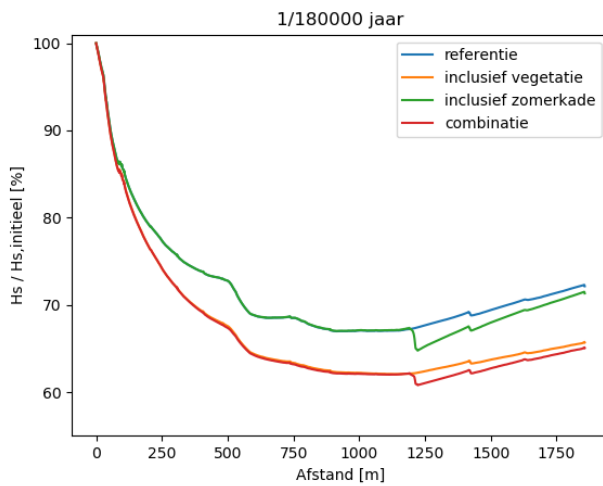
*Figuur 33 Verloop van de golfhoogte over het voorland voor een gladde bodem (referentie), met vegetatie, met zomerkade en een combinatie van vegetatie en zomerkade; voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar*



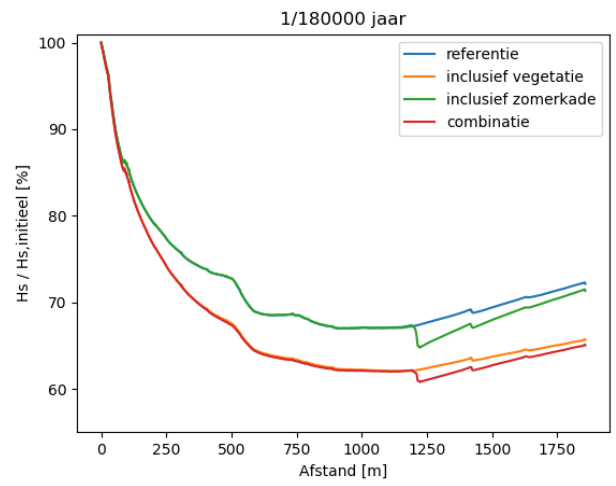
a)



b)



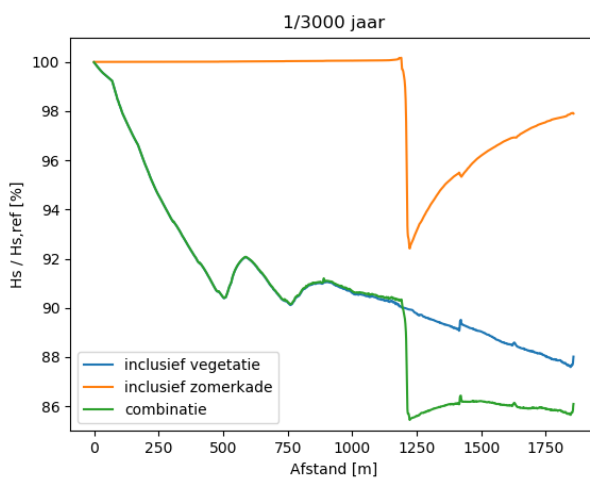
c)



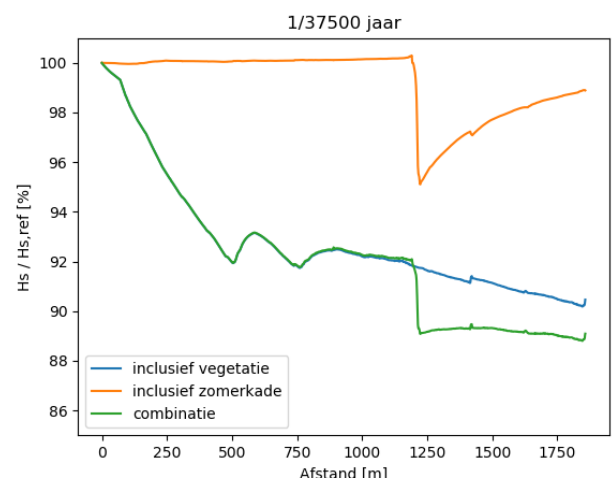
d)

Figuur 34

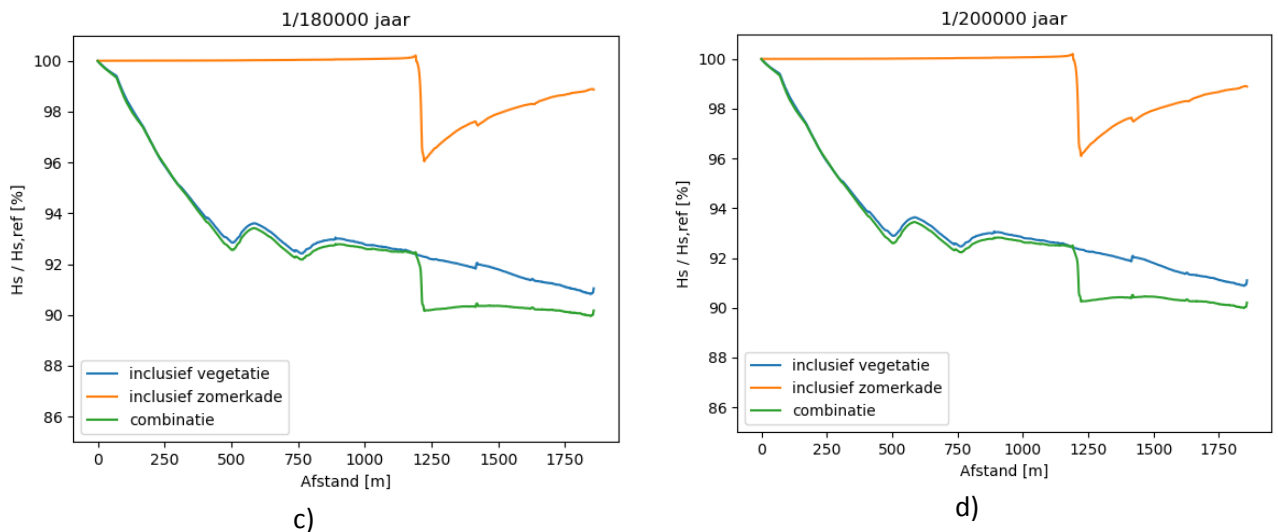
Verloop van de golfhoogte ten opzichte van de initiële golfhoogte voor een gladdie bodem (referentie), met vegetatie, met zomerkade en een combinatie van vegetatie en zomerkade; voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar



a)



b)



**Figuur 35** Verloop van de significante golfhoogte ten opzichte van de referentie voor de case met vegetatie, met zomerkade en een combinatie van vegetatie en zomerkade; voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

Figuur 35 toont voor hogere herhalingstijden dat de golfhoogte, voor de case met vegetatie en de combinatie, voor de zomerkade niet exact gelijk lopen. Een verschil is niet direct logisch, omdat het zou betekenen dat de golf de kade voelt voordat het deze heeft bereikt. Doordat de deviatie echter klein is, kan het een gevolg zijn van bijvoorbeeld numerieke error.

### 9.2 Conclusie combinerend effect

Uit bovenstaande resultaten volgt dat de grootste reductie veroorzaakt wordt door de vegetatie. Wel is het effect van de zomerkade bij de dijkteen groter in het geval vegetatie wordt meegenomen. Daarentegen is de reductie in golfhoogte direct achter de zomerkade kleiner. Dit wordt verklaard doordat de inkomende golfhoogte lager is, waardoor het verschil tussen de inkomende golf en de brekingslimiet kleiner is.

Het grotere effect bij de dijkteen is het resultaat van een verminderde golfgroei tussen de zomerdijk en de dijkteen. De golfgroei wordt bepaald door de wind input en de ruwheid, waarin een hogere ruwheid leidt tot een kleinere golfgroei.

Tabel 13 geeft een overzicht van de resultaten en de daaruit volgende golfhoogtereductie voor Hydra-NL. Hieruit volgt dat een herhalingstijd van 1/3000 per jaar de grootste reductie laat zien. Voor hoge herhalingstijden is de reductie in golfhoogte nagenoeg gelijk aan de situatie zonder zomerkade.

**Tabel 13** golfhoogtereductie door combinatie van vegetatie en zomerkade op 50 m van de dijkteen voor locatie 32.2 km

HR [per jaar]	Hydra-NL	Reductiefactor combinatie	Hydra-NL incl. vegetatie en zomerkade
	H <sub>s</sub> [m]	[-]	H <sub>s</sub> [m]
1/3000	1.63	0.86	1.40
1/37500	1.95	0.89	1.74
1/180000	2.15	0.90	1.94
1/200000	2.16	0.90	1.95

## 10. Case VI: Effect op beoordeling

Om het effect van de verminderde golfbelasting door vegetatie op de Gras Erosie Kruin Binnentalud (GEKB) te beschouwen, wordt het Hydraulisch Belasting Niveau (HBN) bepaald. Het HBN geeft aan hoe hoog de dijk moet zijn om te voorkomen dat het gemiddelde overslagdebiet groter wordt dan 10 l/s/m. Dit maximale debiet is gekozen voor dit traject omdat uitgegaan wordt van een gesloten zode. Daarnaast is er gekeken naar het effect van de gereduceerde golfhoogte op de GEBU beoordeling. Deze is doorgerekend door Emma Sirks van Witteveen+Bos.

### 10.1 GEKB beoordeling

De groene dijk is op het moment niet afgekeurd op GEKB, echter, deze berekening dient om het effect van het wel of niet meenemen van vegetatie te kwantificeren. De berekening is gedaan aan de hand van Hydra-NL met de functie 'Narekenen illustratiepunt'. Dit is een deterministische berekening waarbij uitgegaan wordt van het slechtste scenario. Er wordt in deze berekening geen rekening gehouden met de vraag of waterstand en golfhoogte gecorreleerd zijn. In dit geval zijn ze sterk gecorreleerd, omdat ze beide maximaal zijn bij een Noordwesterstorm. Dit heeft tot gevolg dat het HBN bij een probabilistische benadering nagenoeg gelijk is aan het slechtste scenario. Er wordt uitgegaan van de gereduceerde golfhoogte en de originele spectrale periode. De terugkeertijd conform de norm voor GEKB is gelijk aan 1/37500 per jaar, zie Tabel 14 voor het resultaat.

Tabel 14 Resultaten van de HBN berekening voor referentie (gladde bodem) en met vegetatie voor locatie 32.2 km

HR [per jaar]	Hydra-NL H <sub>s</sub> [m]	HBN [m]	Hydra-NL incl. vegetatie H <sub>s</sub> [m]	HBN [m]
1/37500	1.95	6.31	1.76	6.25

Hieruit volgt dat de dijkhoogte met 6 cm kan worden gereduceerd. Dit lijkt in eerste instantie niet een grote afname, maar kan door de grote lengte van de dijk toch een significante financieel gunstige invloed hebben.

### 10.2 GEBU beoordeling

Voor de beoordeling van gras erosie buitentalud (GEBU) voor de groene dijk is gebruik gemaakt van de formule van Mourik [33] voor het bepalen van het klei-erosievolume volgens:

Voor  $H_s > 0.4$  m:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = c_e \cdot \left( 1.32 - 0.079 \frac{V_e}{H_s^2} \right) \cdot [16.4 \cdot (\tan \alpha)^2] \cdot \min \left( 3.6; \frac{0.0061}{s_{op}^{1.5}} \right) \cdot (1.7 (H_s - 0.4)^2)$$

Voor  $H_s < 0.4$  m:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0$$

De erosiediepte van de kleilaag kan vervolgens worden gedefinieerd als [34]:

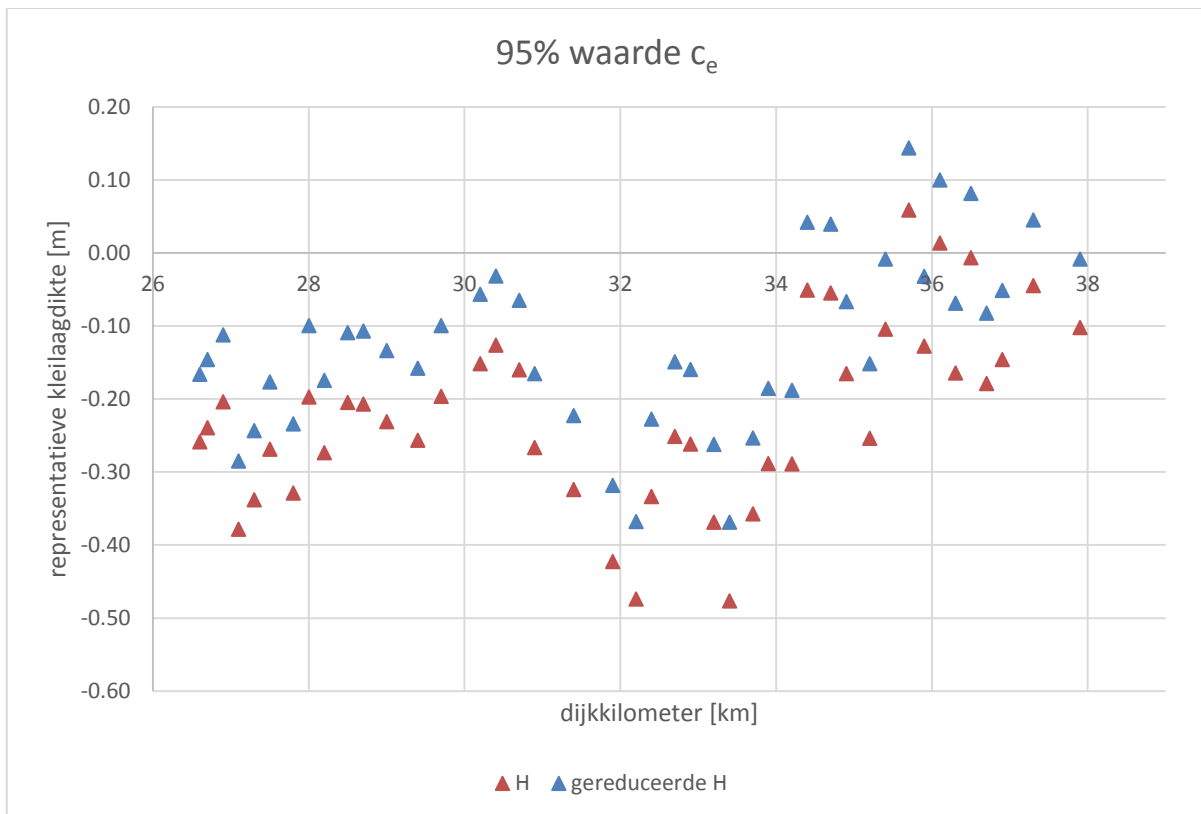
$$d_e = \sqrt{V_e \tan \alpha} - 0.14$$

Met:

$\frac{\partial V_e}{\partial t}$	=	Erosiesnelheid per meter dijk en per uur [m <sup>3</sup> /m/h]
$V_e$	=	Erosievolume per meter dijk [m <sup>3</sup> /m]
$c_e$	=	Erosiecoëfficiënt, klei: 95%-onderschrijdingswaarde = 0.78 [-]
$\alpha$	=	Taludhelling van dijkprofiel
$s_{op}$	=	Golfsteilheid voor piekperiode

De formule van Mourik is toepasbaar voor een vastgestelde range voor de golfhoogte en taludhelling. De omstandigheden bij de groene dijk wijken af van deze range, waardoor het onzeker is of de formule een goed resultaat geeft. Door Deltares wordt een onzekerheidsfactor vastgesteld, waardoor de formule voor de juiste waardes toepasbaar zou kunnen zijn. Echter, deze is op het moment van schrijven nog onbekend. Daarom wordt in de berekening uitgegaan van een taludhelling van 1:5 en 1:4, wat de limiet voor de formules is, terwijl het talud in werkelijkheid niet steiler wordt dan 1:6. Dit heeft tot gevolg dat het resulterende erosievolume wordt overschat.

De berekening wordt uitgevoerd met de 95% waarde voor  $c_e$ , waardoor de benadering semi-probabilistisch is. Voor de golfhoogte  $H_s$  is de reductiefactor van 0.92 toegepast. Voor het bepalen van het erosievolume wordt gebruik gemaakt van het golfhoogteverloop over tijd. Er is aangenomen dat de reductiefactor van 0.92 geldt voor het gehele golfhoogteverloop tijdens een storm. Dit is een redelijk grove benadering waarmee alleen een eerste inschatting kan worden gegeven voor het effect van de gereduceerde golfhoogte. De resultaten zijn weergegeven in Bijlage L. Hieruit blijkt dat de resterende kleilaagdikte gemiddeld 10 cm groter is dan bij de oorspronkelijke golfhoogte, zie Figuur 36. Door de 'foutieve' taludhelling is de kleilaagdikte voor het overgrote deel ook bij gereduceerde golfhoogte onvoldoende.



Figuur 36 Resterende kleilaagdikte voor de 95%  $c_e$  waarde voor originele en gereduceerde golfhoogte per dijk kilometer van de groene dijk

---

## Discussie

De hiervoor beschreven cases hebben de volgende inzichten verschaft. De resultaten en onzekerheden worden per case bediscussieerd.

### **Case I: Referentie**

Het verschil tussen het SWAN WTI-model gebruikt in Hydra-NL en het in dit onderzoek opgestelde SWAN model is in de orde van 15%. Doordat de gebruikte methodes van elkaar verschillen, is een betere benadering in dit geval moeilijk te verkrijgen. Er wordt verwacht dat een 2D model tot een beter resultaat leidt. De formuleringen gebruikt in het WTI komen voort uit een oudere SWAN versie, welke in de huidige versie niet altijd meer aanwezig zijn. Beide modellen rekenen met de standaardwaarden als input voor de formuleringen, met uitzondering van de breking in het hier opgestelde model. De gekozen breker index,  $\gamma$ , is aan de hoge kant, met een waarde van 0.84. Het is goed mogelijk dat in het geval een 2D model wordt gebruikt deze parameter lager is. Doordat het huidige 1D model een onderschatting geeft van de golfhoogte wordt het effect van ruwheid onderschat, waardoor het model als conservatief kan worden gezien. Een betere inschatting bij een 2D model zal leiden tot een gunstigere uitkomst, waarbij het effect van de vegetatie groter is.

Daarnaast moet benadrukt worden dat de kalibratie is uitgevoerd op theoretische data. In dit onderzoek is ervan uitgegaan dat het WTI-model de waarheid representeert, omdat deze voor de huidige veiligheidsbeoordeling ook wordt gebruikt. Het is niet gezegd dat dit ook daadwerkelijk een goede representatie geeft, daarvoor is het toepassen van meetgegevens essentieel. Hierbij komt echter het probleem dat meetgegevens niet de maatgevende situatie bevatten. Het systeem kan ander gedrag vertonen bij deze extreme omstandigheden. Bij waterschap Noorderzijlvest wordt een twaalf jarig meetplan gestart met als doel de HR modellen, zoals Hydra-NL, te verbeteren. Door de lange tijdsduur is de kans groter dat extreme omstandigheden zich voordoen. Echter, doordat dit project nog moet starten, blijft de kalibratie op de huidige Hydra-NL data de best mogelijke oplossing.

### **Case II: Gevoeligheidsanalyse**

Opvallend is dat de limiet in de bodemruwheid in het algemeen vanaf een ruwheidslengte  $k_N = 0.1-0.15$  m optreedt. Nadat de limiet is bereikt is de frictie constant, waardoor een toename in ruwheidslengte geen extra reductie in golfhoogte tot gevolg heeft. Zoals eerder vermeldt blijkt uit onderzoek van Bagnold dat deze constante frictie ook in experimenten voorkomt. Dit getuigt dat de limiet niet alleen een limitatie in SWAN is, maar ook fysisch van aard. De gevolgen van de limitatie aan de bodemfrictie hebben tot gevolg dat de reductie in golfhoogte voor de hier beschouwde gevallen niet groter dan 35% kan worden.

De golfhoogtereductie door vegetatie is afhankelijk van de significante golfhoogte,  $H_s$ , waterstand,  $d$ , en lengte van het voorland,  $L$ . Het effect van de initiële golfhoogte is alleen van belang bij korte voorlanden of grote waterdieptes, waarbij de invloed van de randvoorwaarden nog aanwezig is op 50 m van de dijkteen. Daarnaast is het effect van bodemruwheid groter voor lage waterstanden. Fysisch kan dit worden verklaart doordat de orbitaalsnelheid bij de bodem verkleint naarmate de waterdiepte toeneemt. Een kleinere orbitaalsnelheid bij de bodem heeft minder bodemwrijvingsdissipatie tot gevolg, indien de ruwheidslengte  $k_N$  gelijk blijft. Als de Manning waarde constant wordt gehouden, neemt volgens de Brettschneider formule de ruwheidslengte toe bij toenemende waterstand. Dit verhoogt de wrijvingsdissipatie en heft dus het eerder genoemde effect deels op. Fysisch gezien zou het echter logischer zijn om de Nikuradse ruwheidslengte constant te houden, doordat deze diepte-onafhankelijk is. Om de conversie van Manning waardes uit Amerikaanse studies naar Nikuradse ruwheid te maken, is besloten om de Brettschneider formule toe te passen. Deze keuze is meer uit praktisch dan fysisch perspectief. Fysisch zou het correcter zijn om de  $k_N$  waarde voor bijvoorbeeld 2-3 m waterdiepte te nemen voor de hele doorsnede. Omdat deze diepte nagenoeg gelijk is aan de

voorkomende waterdiepte is het verschil tussen de uitkomsten orde 1%<sup>1</sup>. Bij hoger optredende waterdieptes, groter dan 4 m, kan de golfhoogtereductie door vegetatie wel significant lager zijn dan bij een geschaalde ruwheidslengte.

### **Case III: Vegetatie**

De reductie resulterend van de vegetatie is het grootst voor een herhalingsstijd van 1/3000 per jaar. Hiervoor zijn zowel de waterstand en significante golfhoogte het laagst, waarbij een lage waterstand tot meer reductie leidt en een lage golfhoogte tot minder reductie. Blijkbaar is de relatie tussen  $k_N$ ,  $d$  en  $H_s$  zo dat de lage waterstand maatgevend is, leidend tot een hogere reductie. De verschillen zijn echter klein, alle reductiefactoren op een locatie vallen binnen een interval van 3%.

De effectiviteit van vegetatie wordt bepaald door een samenspel van ruwheids grootte, locatie van de verschillende ruwheden en de lengte waarover de golf wordt beïnvloed door de ruwheid. Dit veroorzaakt dat een plaatselijke hoge ruwheid niet gelijk een grote golfreductie tot gevolg heeft. Door de invloed van de ruimtelijke variatie, is het van belang dit goed in beeld te hebben. De in dit onderzoek gebruikte vegetatiekaart is opgesteld in 2008, momenteel meer dan 10 jaar geleden. Door de dynamiek van een gebied als dit is de kans dat de huidige situatie afwijkt aanwezig. Voor een betrouwbare analyse is het verstandig een meer recente kaart van de vegetatie te gebruiken.

Daarnaast is er onzekerheid in de gebruikte ruwheidslengtes. Deze zijn vastgesteld in eerder theoretisch onderzoek en metingen uitgevoerd in Amerika. Dat de aanwezige vegetatie op het voorland Noorderleech ook echt deze ruwheid bij extreme situaties levert is onzeker.

### **Case IV: Zomerkade**

Het effect van de zomerkade op de golfhoogte is klein doordat de strijklengte groot is, wat leidt tot sterke golfgroei door wind. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat SWAN de golfgroei door wind en de breking door de zomerkade in de goede orde modelleert. Doordat de breker index in de kalibratie is verhoogd, is het mogelijk dat bij een te hoge waarde voor  $\gamma$  het effect van de zomerkade wordt onderschat.

Daarnaast is kort gekeken naar het effect op de golfhoogte als het voorland voor de dijkteen wordt verhoogd. Hieruit blijkt dat de reductie in golfhoogte groter is als het voorland voor de dijk wordt opgehoogd dan bij de zomerkade, doordat de golven diepte-gelimiteerd zijn. Hierdoor kan geconcludeerd worden dat de omstandigheden kort voor de dijkteen bepalend zijn voor de golfhoogte.

### **Case VI: Effect op beoordeling**

Voor het faalmechanisme GEBU is een snelle inschatting gemaakt van het effect van de gereduceerde golfhoogte. Hierbij is de reductiefactor gelijk genomen over het gehele waterstandsverloop in de tijd. Dit is een redelijk grove benadering en is naar verwachting een onderschatting door verschillende factoren.

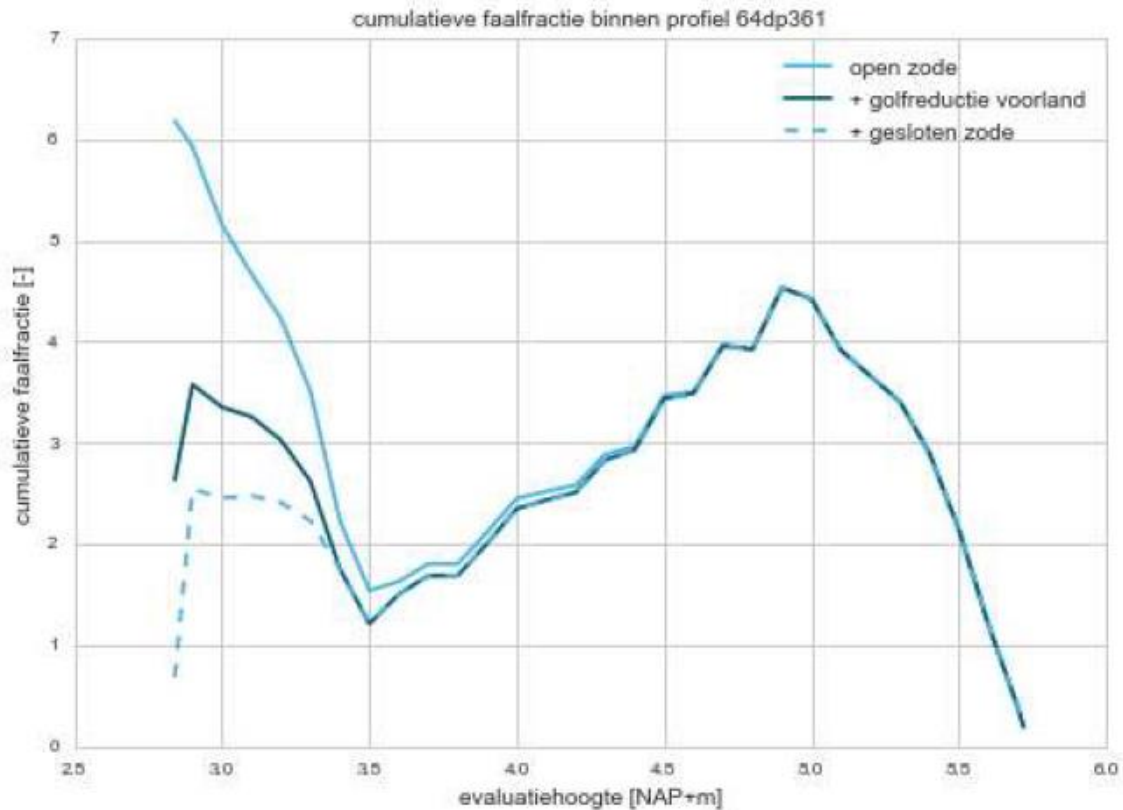
Ten eerste is gebleken dat de reductie groter is voor lagere waterstand, ook als de golfhoogte lager is. Daarnaast zal de aanname dat alle stengels breken of knikken niet per definitie gelden aan het begin van de storm waar de waterstanden laag zijn. Hierdoor zal de weerstand en dus het energieverlies groter zijn in de beginfase van de storm. Tot slot heeft de aanwezige zomerkade voor de groene dijk een hoogte van minimaal NAP+2.8 m. Hierdoor kunnen de golven optredend bij lagere waterstanden de dijk niet bereiken en zullen deze dus ook de kleilaag niet eroderen.

---

<sup>1</sup> Dit is uitgetest voor locatie 32.2 km voor de maatgevende HR. In een te laat stadium van dit onderzoek is vastgesteld dat het fysisch logischer is om de  $k_N$  niet te schalen. Door het kleine verschil worden de uitkomsten in dit rapport nog steeds als betrouwbaar geacht.



Deze effecten gelden echter alleen voor de lagere locaties in het dijkprofiel, waar bij lage waterstand de dijk wordt belast. Uit eerder onderzoek van Witteveen+Bos [34] blijkt dat de grootste cumulatieve faalfractie, waarbij een faalfractie > 1 falen betekent, optreedt bij een waterstand van NAP+5 m. In dit geval was de golfreductie op de lagere dijkprofiellocaties niet van invloed op de maximale cumulatieve faalfractie, zie Figuur 37. Ook als het verloop van het klei-erosievolume wordt beschouwd, is het erosievolume bij lage golfhoogte en waterstand relatief klein ten opzichte van de erosie tijdens de maximale golfhoogte en waterstand [34]. De grootste golfhoogtes hebben dus de grootste invloed, waardoor het onderschatten van de golfhoogtereductie voor lagere golven niet een significant verschil zal maken.



Figuur 37 Cumulatieve faalfractie voor verschillende dijkprofielhoogtes, voor locatie 36.1 km (met taludhelling  $\tan\alpha = 1/3$ , kleilaagdikte = 0.5 m). Golfreductie voorland is de invloed door bodemhoogte [34]

---

## Conclusie en aanbevelingen

In dit onderzoek is het effect van vegetatie op het Friese voorland 'Noarderleech' kwantitatief bepaald, waarbij de bevindingen uit de 'POV Waddenzeedijken: Effectiviteit voorlanden' zijn toegepast. Hiervoor is gebruik gemaakt van het model SWAN, waarin 1D berekeningen zijn uitgevoerd voor meerdere doorsnedes. Er is uitgegaan van een situatie waarbij de stengels knikken of breken, waardoor een stoppelig oppervlak overblijft. Enkel de resulterende verhoogde bodemruwheid door vegetatie is als effect meegenomen.

De hoofdvraag was als volgt opgesteld:

*Wat is het effect van de vegetatie op voorlanden op de golfcondities?*

Met als doelstellingen:

- Het inzichtelijk maken van de gevoeligheid van het model voor verschillende combinaties van ruwheden en randvoorwaarden.
- Inzicht krijgen in het effect van een begroeid voorland op de golfbelasting op de achterliggende waterkering, specifiek voor het traject Koehool-Lauwersmeer.
- Bepalen of de achterliggende 'groene dijk' aan de normen voldoet in het geval dat het voorland geheel worden meegenomen.
- Effect van de op het voorland aanwezige zomerdijk bepalen.

Er is in dit onderzoek enkel naar de effecten op de golfhoogte gekeken, doordat de modelresultaten voor golfperiode niet overeenkomen met veldmetingen.

De eerste doelstelling is behandeld in 'case II: gevoeligheidsanalyse'. Hieruit blijkt dat de voorlandlengte grote invloed heeft op de golfhoogte bij de dijkteen bij variërende ruwheid. Een langer voorland zorgt voor een langere blootstelling aan de bodemruwheid, waardoor de golfreductie groter is. Doordat de golven diepte-gelimiteerd zijn, is de waterstand bepalend voor de aanwezige golfhoogte, waardoor de initiële golfhoogte op de voorlandrand minder van belang is. Een toenemende waterdiepte leidt tot afnemende reductie op de golfhoogte bij de dijkteen.

In alle gevallen reduceert de golfhoogte met toenemende ruwheid, waarbij de reductie voor hogere ruwheden afvlakt tot een reductie van 30%. Dit wordt veroorzaakt door een aanwezig limiet aan de ruwheidscoëfficiënt. Voor lage waterstanden wordt dit limiet eerder bereikt, waardoor de maximale reductie bij hoge ruwheid kleiner is voor lage waterstanden. Daarentegen is de reductie voor lage ruwheden groter bij lage waterstanden dan voor hoge waterstanden.

In 'case III: Implementatie vegetatie' is voor meerdere doorsnedes een inschatting gemaakt voor de aanwezige vegetatie en resulterende bodemruwheid. Hieruit volgt dat de gemiddelde reductie in golfhoogte op 50 m van de dijkteen voor de 'groene dijk' gelijk is aan  $8\% \pm 2\%$  als gevolg van de bodemruwheid. De grootste reductie wordt gevonden bij een lang voorland of hoge bodemruwheid.

De invloed van deze golfhoogtereductie is bepaald op de benodigde dijkhoogte (HBN) en het faalmechanisme Gras Erosie Buitentalud (GEBU). In het geval de reductie door vegetatie wordt meegenomen, kan dit ervoor zorgen dat de kruinhoogte met 6 cm kan worden verlaagd. Daarnaast is de resterende kleilaagdikte voor GEBU 10 cm groter dan zonder het reducerende effect. Desondanks kan de groene dijk ook inclusief golfreductie niet worden goedgekeurd op GEBU.

Tot slot leidt de zomerkade tot een golfhoogtereductie van 2% op 50 m van de dijkteen. Deze minimale reductie is het gevolg van het feit dat de afstand tussen de zomerkade en de dijk orde 500 m bedraagt, waardoor de aanwezige golfgroei door wind significant is.

## Aanbevelingen

Aan de hand van dit rapport worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Afgaand op het verleden is de kans klein dat de vegetatie op het voorland op korte termijn zal verdwijnen. Daarom wordt het meenemen van de vegetatie in de vorm van bodemruwheid in de beoordeling van de primaire kering in dit rapport betrouwbaar geacht. Uit dit rapport blijkt dat een golfhoogte-reductie van 8% gebruikt kan worden voor de groene dijk op het faalmechanisme GEBU. Wel is oplettendheid geboden bij het bepalen van de bodemruwheid, waarbij beter een onderschatting dan overschatting gemaakt kan worden van de ruwheid.
- Er wordt aangeraden om de vegetatie op het voorland pas in beschouwing te nemen indien de primaire kering negatief wordt beoordeeld en de lengte van het voorland significant is. Hierdoor worden geen onnodige onzekerheden en complexiteit in de beoordeling geïntroduceerd.
- Voor het meenemen van golfdemping door vegetatie in de ontwerpcyclus zal het probleem niet bij de techniek liggen maar bij omgevingsfactoren. Door de ontwerplevensduur van 50 jaar moet er garantie zijn dat het voorland inclusief vegetatie gedurende deze periode niet vermindert. De beheersmaatregelen en bijkomende kosten zullen eerst moeten worden onderzocht, waarna bepaald kan worden of de baten de kosten overstijgen.
- Het effect van de zomerkade is in de huidige situatie nihil. Voor een ontwerp waarbij een zomerkade onderdeel is van de waterkering is het noodzakelijk dat de afstand tot de achterliggende dijk beperkt is. Ook het toevoegen van een tweede zomerkade dichter bij de dijk kan van waarde zijn.

Voor verder onderzoek kan naar het volgende worden gekeken:

- Opstellen van een 2D SWAN model, hiervoor is informatie over stromingen en wind nodig. Er kan onderzoek worden gedaan naar het kwantitatieve effect van de vegetatie op de stroming. Ook de afname of de stengels breken bij de aanwezige stroming kan worden geverifieerd.
- Uitvoeren van metingen om het model wellicht beter te kalibreren. Er is nu uitgegaan dat Hydra-NL de waarheid is, echter dit is eveneens afkomstig uit een model waardoor ook dit maar een benadering is.
- Verder onderzoek naar de invloed van vegetatie, en met name de bodemruwheid, op de spectrale periode.
- Onderzoek naar de beheersmaatregelen om vegetatie gevalideerd mee te nemen.
- De relatie tussen golfhoogte, waterdiepte, voorlandlengte en ruwheid verder onderzoeken, waarna een ontwerpformule kan worden opgesteld.
- Mogelijkheden voor ontwerpstandaarden onderzoeken. Welke ruwheid en lengte zijn nodig om bij gegeven randvoorwaarden een bepaalde reductie te krijgen?
- Onderzoeken of SWAN geschikt is om het effect van de zomerkade te bepalen.

---

## Bibliografie

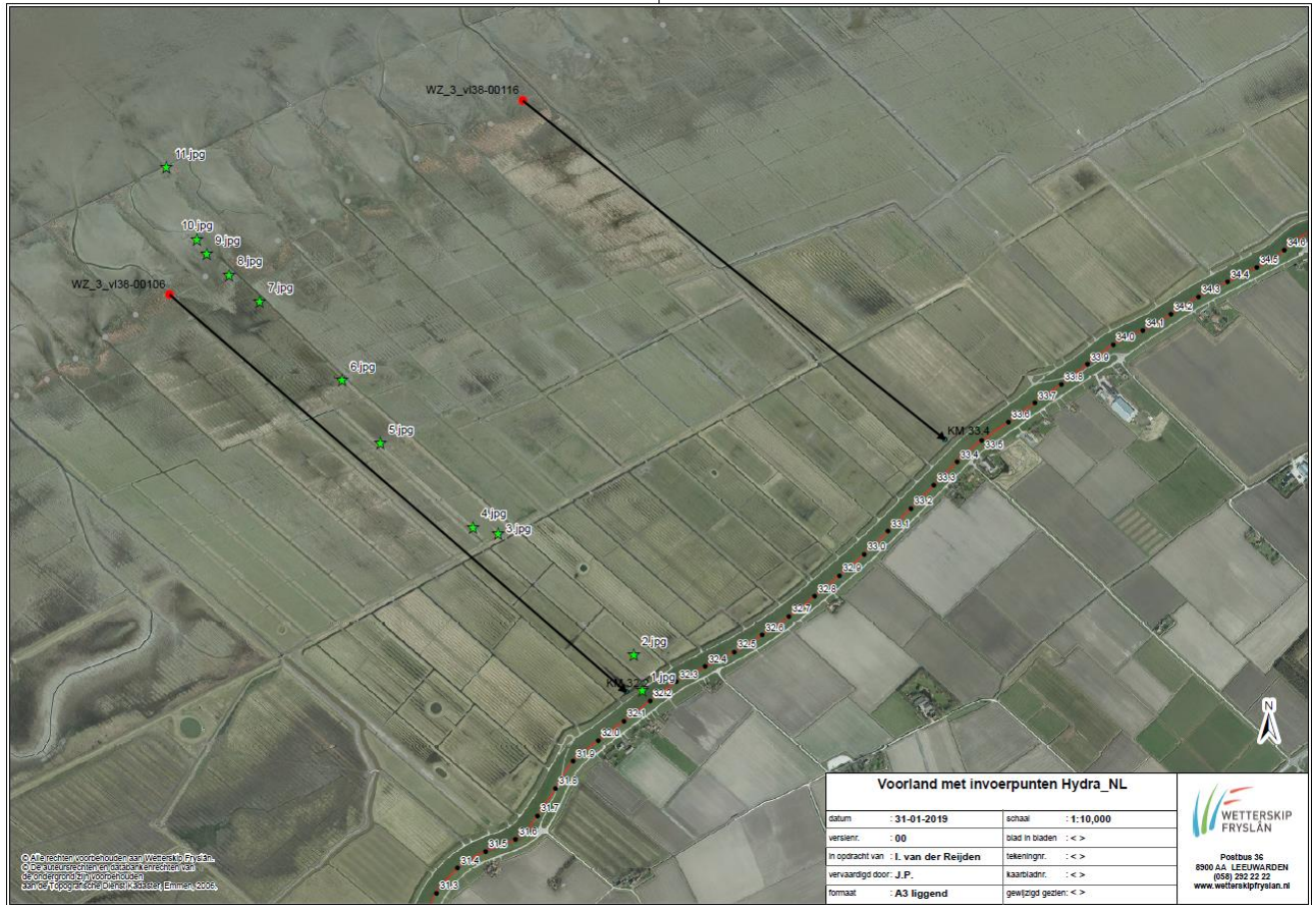
- [1] Rijkswaterstaat, „Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (LIWO),“ [Online]. Available: <https://basisinformatie-overstromingen.nl/liwo/>. [Geopend 12 3 2019].
- [2] Rijksoverheid, „Deltaprogramma: waterveiligheid, zoetwater en ruimtelijke adaptatie,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/deltaprogramma/deltaprogramma-bescherming-tegen-overstromingen-en-zoetwatertekort>, bezocht op 21-1-'19.
- [3] HWBP, „Een introductie,“ 2019. [Online]. Available: <http://www.hoogwaterbeschermingsprogramma.nl/Programma/Een+introductie/default.aspx>, bezocht op 21-1-'19.
- [4] Helpdesk Water, „Beoordelen (WBI),“ 2019. [Online]. Available: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-wbi/>, bezocht op 21-1-'19.
- [5] TU Delft, „SWAN - Simulating WAVes Nearshore,“ 2019. [Online]. Available: <http://swanmodel.sourceforge.net/>, bezocht op 21-1-'19.
- [6] Helpdesk water, „Hydra-NL,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/applicaties-per/omgevings/omgevings/hydra-nl-o/>. [Geopend 23 01 2019].
- [7] H. Steetzel, J. Groeneweg en V. Vuik, „Effectiviteit Voorlanden HR - Onderzoeksrapportage Fase C,“ 2018.
- [8] J. van Loon-Steensma, P. Slim, J. Vroom, J. Stapel en A. Oost, „Een Dijk van een Kwelder,“ Alterra, Wageningen, 2012.
- [9] R. Schuttenhelm, „Experts: dijkverhogingen en zandsuppleties zijn geen oplossing voor de lange termijn,“ Waddenvereniging, 3 december 2018. [Online]. Available: <https://www.onsgetij.nl/experts-zeespiegelstijging-dijkverhogingen-zandsuppleties-geen-oplossing-lange-termijn/>. [Geopend 29 01 2019].
- [10] M. Haasnoot, J. Kwadijk, F. Diermanse, L. Bouwer, A. van der Spek en e. al., *Planning for accelerated sea level rise - An exploratory study for the Delta Program*, Delft: Deltares, 2018.
- [11] V. Vuik, „TU Delft Delta Links,“ februari 2019. [Online]. Available: [http://flowsplatform.nl/#/toekomstbestendig-met-kwelders-en-andere-brede-waterkerende-zones-1548356430559\\_\\_\\_\\_481\\_\\_\\_\\_](http://flowsplatform.nl/#/toekomstbestendig-met-kwelders-en-andere-brede-waterkerende-zones-1548356430559____481____). [Geopend 14 02 2019].
- [12] GeoWeb 5.0, „Primaire Keringen“.
- [13] K. Dijkema, W. van Duin, E. Dijkman en A. e. a. Nicolai, „50jaar monitoring en beheer van de Friese en Groninger kwelderwerken: 1960-2009,“ Imares, Rijkswaterstaat, Texel, Buitenpost, Leeuwarden, 2010.
- [14] V. Vuik en J. Stenfert, *memorandum - POV Waddenzeedijken, Effectiviteit Voorlanden HR*, HKV, 2018.
- [15] STOWA, „Opleidingsprogramma INNW - WBI: Assembleren en rapporteren,“ 2017. [Online]. Available: [http://www.stowavideo.nl/pdf/INNW/M11/INNW\\_M11\\_Po2.pdf](http://www.stowavideo.nl/pdf/INNW/M11/INNW_M11_Po2.pdf). [Geopend 2 25 2019].
- [16] Rijkswaterstaat, „Handreiking ontwerpen met overstromingskansen,“ Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, 2017.
- [17] Navigator, „Bijlage I Primaire waterkeringen en dijktrajecten als bedoeld in artikel 1.3, eerste lid,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.navigator.nl/document/id380d2f9c7301461d9ea7de5342e37173?ctx=688f45f484c62584a668c7c57a267ce9>. [Geopend 27 2 2019].

- 
- [18] A. Mendez Lorenzo, J. van der Meer en P. Hawkes, „Effects of bi-modal waves on overtopping: application of UK and Dutch prediction methods,” 2000.
- [19] SWAN team, *SWAN - Scientific and technical documentation*, Delft: Delft University of Technology, 2019.
- [20] TU Delft, lectures Ocean Waves, *Lecture 01-2018: Waves in oceanic waters; modeling for idealized cases*, Delft, 2018.
- [21] L. Holthuijsen, *Waves in oceanic and coastal waters*, Delft: Cambridge university press, 2007.
- [22] G. Komen en S. H. K. Hasselmann, „On the existence of a fully developed wind-sea spectrum,” *J. Phys. Oceanogr.*, nr. 14,8, pp. 1271-1285, 1984.
- [23] O. Madsen, Y. Poon en H. Graber, „Spectral wave attenuation by bottom friction: theory,” in *Proc. 21st Int. Conf. Coastal Engineering (Malaga)*, New York, ASCE, pp. 492-504, 1988.
- [24] J. Battjes en J. Janssen, „Energy loss and set-up due to breaking of random waves,” in *Proc. 16th Conf. Coastal Engineering (Hamburg)*, New York, ASCE, pp. 569-587, 1978.
- [25] J. Groeneweg, A. van der Westhuysen, G. van Vledder, S. Jacobse, J. Lanssen en A. van Dongeren, „Wave modelling in a tidal inlet: Performance of SWAN in the Wadden Sea,” *Coastal Engineering*, pp. 411-423, 2008.
- [26] J. Battjes en M. Stive, „Calibration and Verification of a Dissipation model for Random Breaking Waves,” *Journal of Geophysical Research*, vol. C5, nr. 90, pp. 9159-9167, 1985.
- [27] R. Nelson, „Height limits in top down and bottom up wave environments,” *Elsevier - Coastal Engineering*, nr. 32, pp. 247-254, 1997.
- [28] I. Jonsson, „A new approach to oscillatory rough turbulent boundary layers,” *Ocean Engineering*, nr. 7, pp. 109-152, 1980.
- [29] T. Wamsley, M. Cialone, J. Smith, J. Atkinson en J. Rosati, „The potential of wetlands in reducing storm surge,” *Ocean Engineering*, nr. 37, pp. 59-68, 2010.
- [30] J. Dietrich, J. Westerink, A. Kennedy, J. Smith en e. al., „Hurricane Gustav (2008) Waves and Storm Surge: Hindcast, Synoptic Analysis, and Validation in Southern Louisiana,” *MWR*, August 2011.
- [31] V. Vuik, H. Suh Heo, B. Borsje en J. Batjes, „Stem breakage of salt marsh vegetation under wave forcing: A field and model study.,” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, nr. 200, pp. 41-58, 2018.
- [32] V. Vuik en J. Stenfert, „Effect van buitendijkse zomerkades op Hydraulische Randvoorwaarden,” HKV, 2018.
- [33] G. Mourik, „Prediction of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack,” *Deltares*, 2015.
- [34] E. Sirks, *Vervolg toets op maat groene dijk - Verkenning Waddenzeedijk Koehool-Lauwersmeer*, Deventer: Witteveen + Bos, LW344-37/19-001.542, 30 januari 2019.

## Bijlage A

### Aanwezige vegetatie:

Foto's zijn gemaakt van de aanwezige vegetatie op het voorland op 15 februari 2019. De locatie van de verschillende foto's is in kaart gebracht in Figuur 38.



Figuur 38 Locaties van de genomen foto's op het voorland

De locaties horen bij de onderstaande foto's:



1



2



3



4



5



6



7



8



9



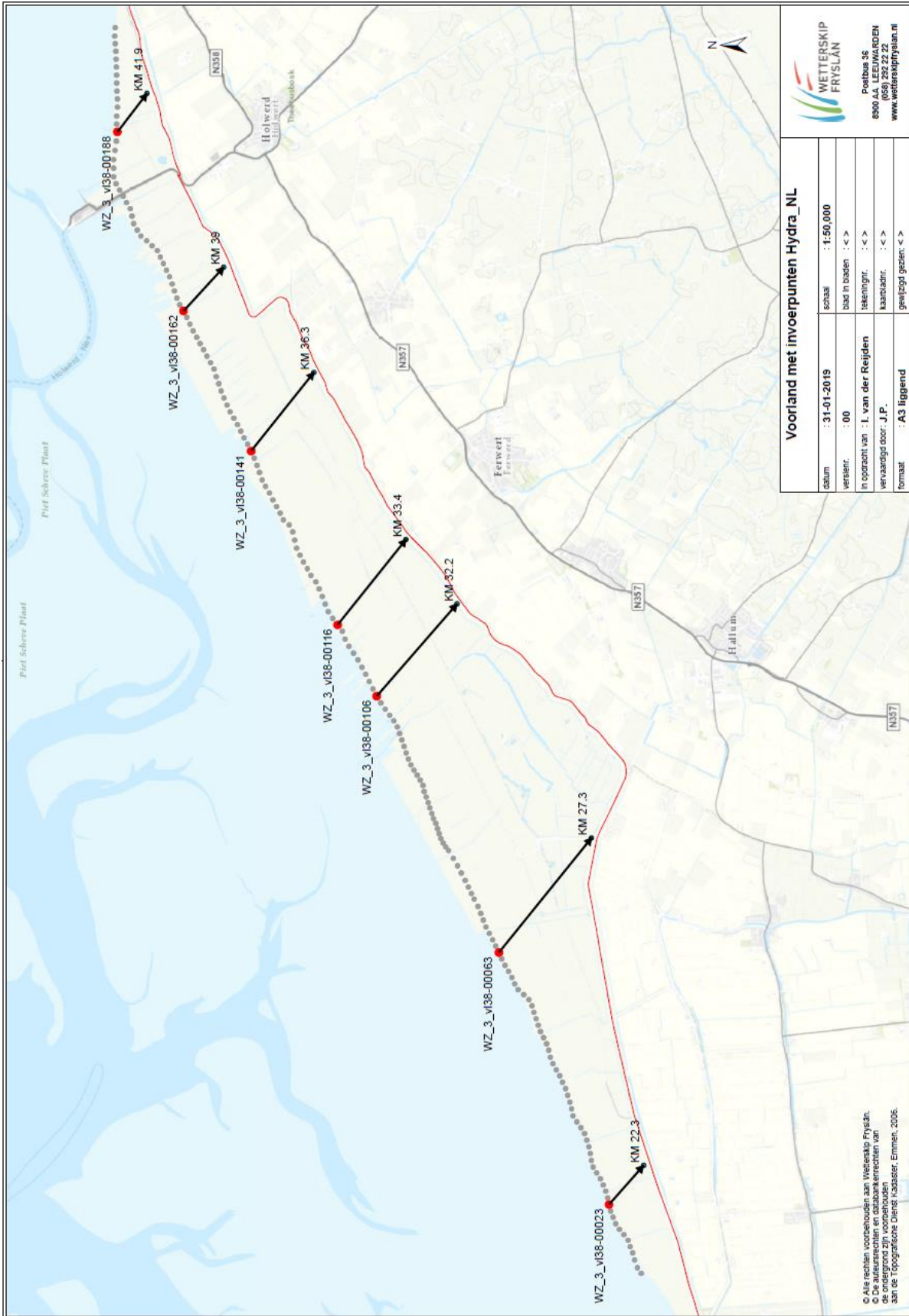
10



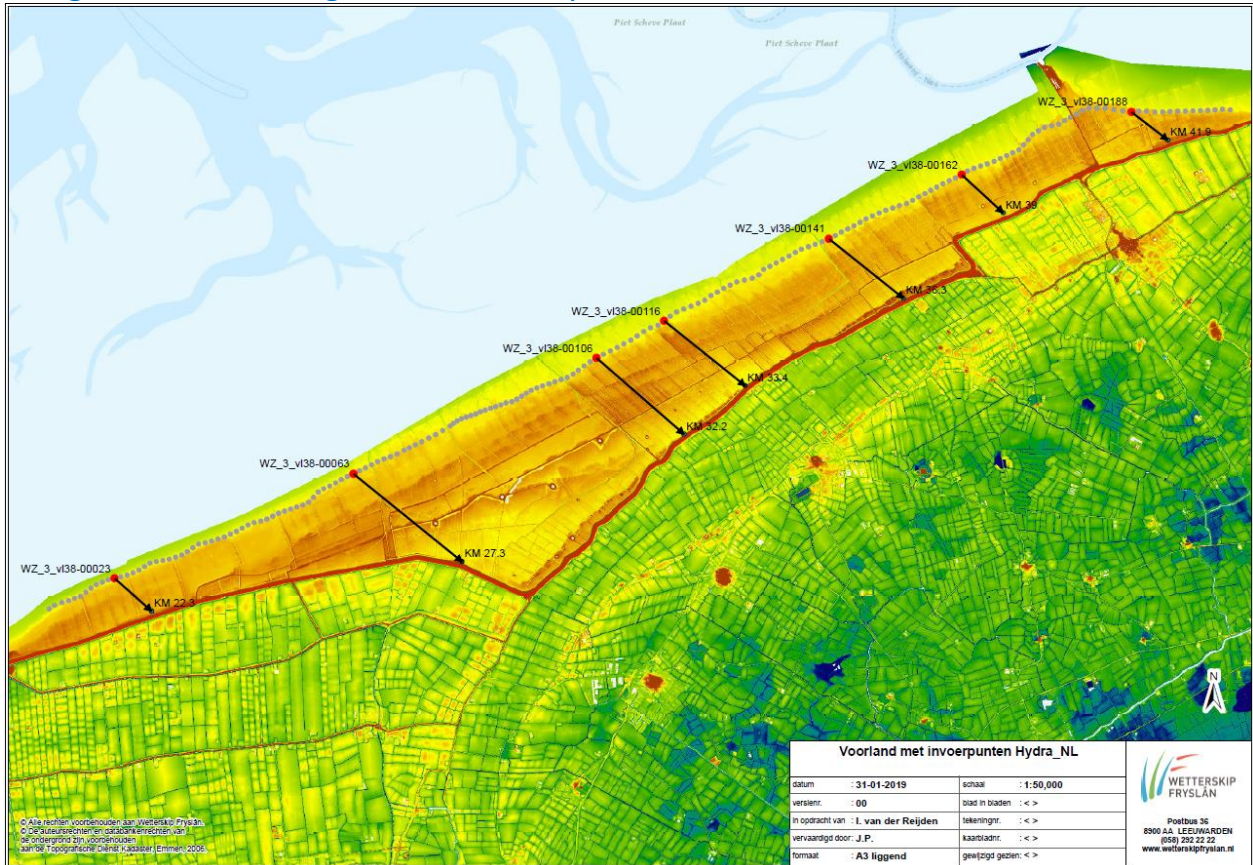
11



**Bijlage B**  
Gebiedskaart inclusief profiellocaties:



Hoogtekaart van het gebied inclusief profiellocaties:

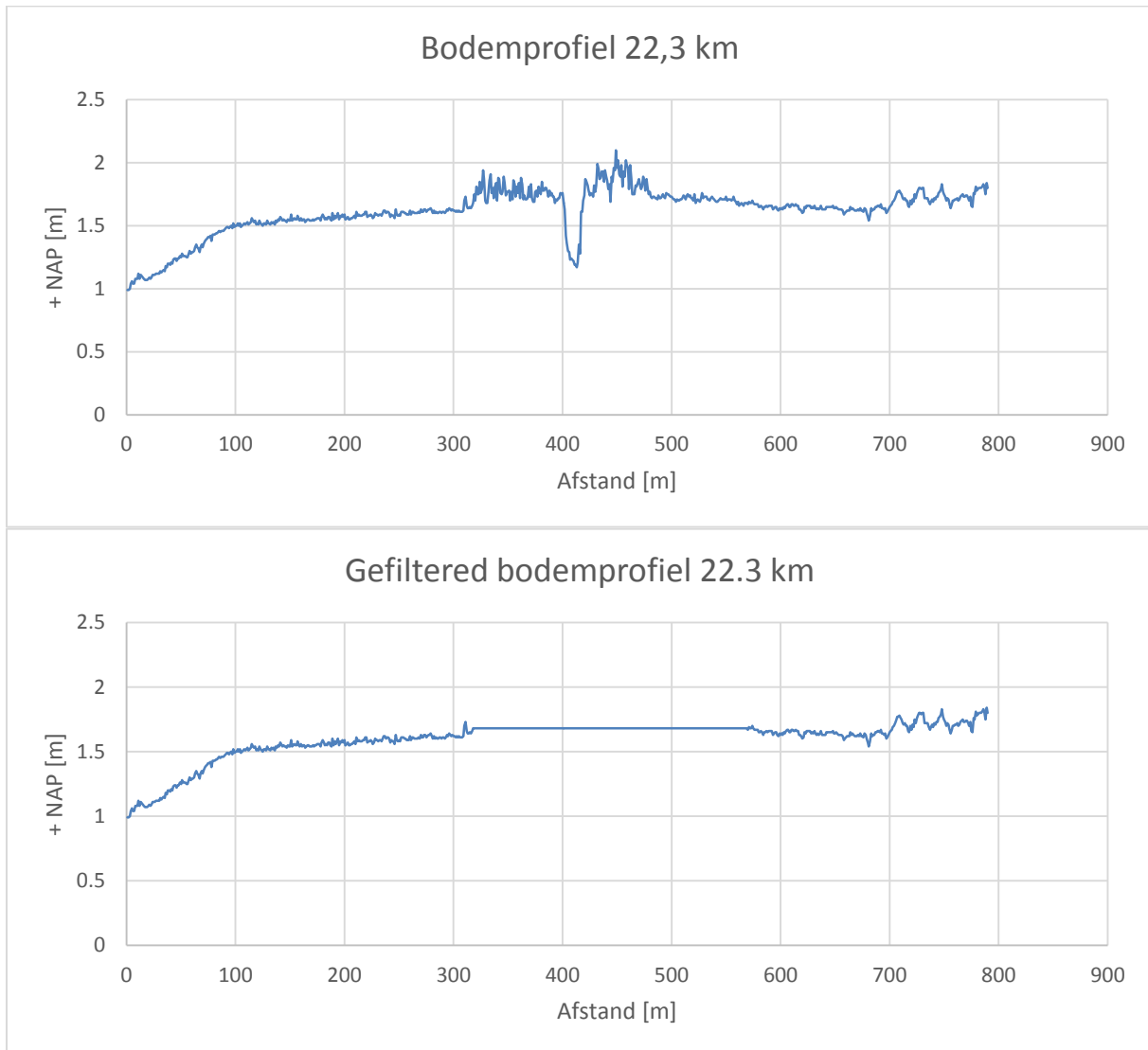


## Bijlage C

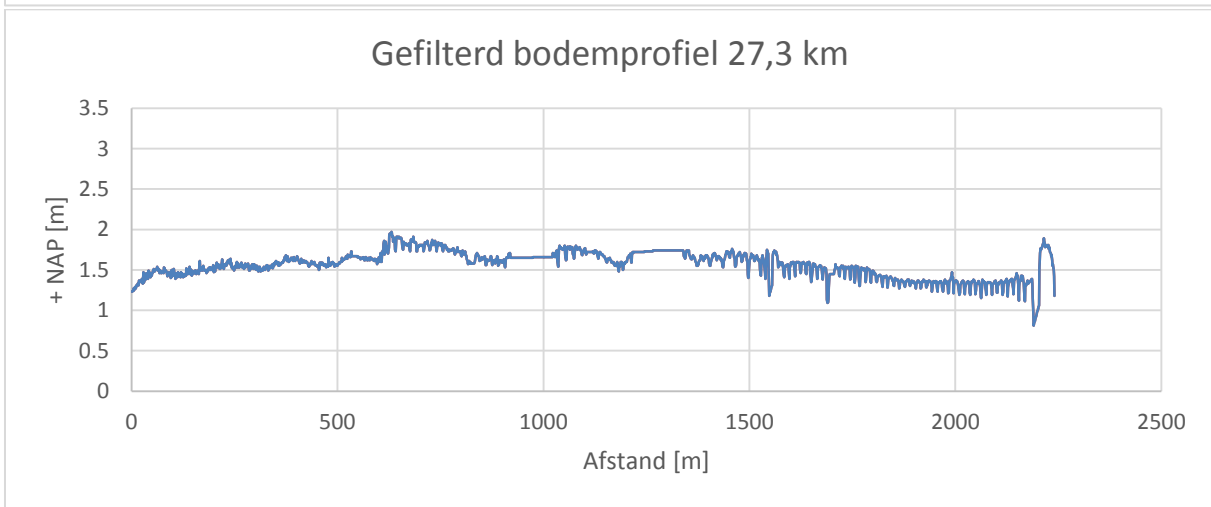
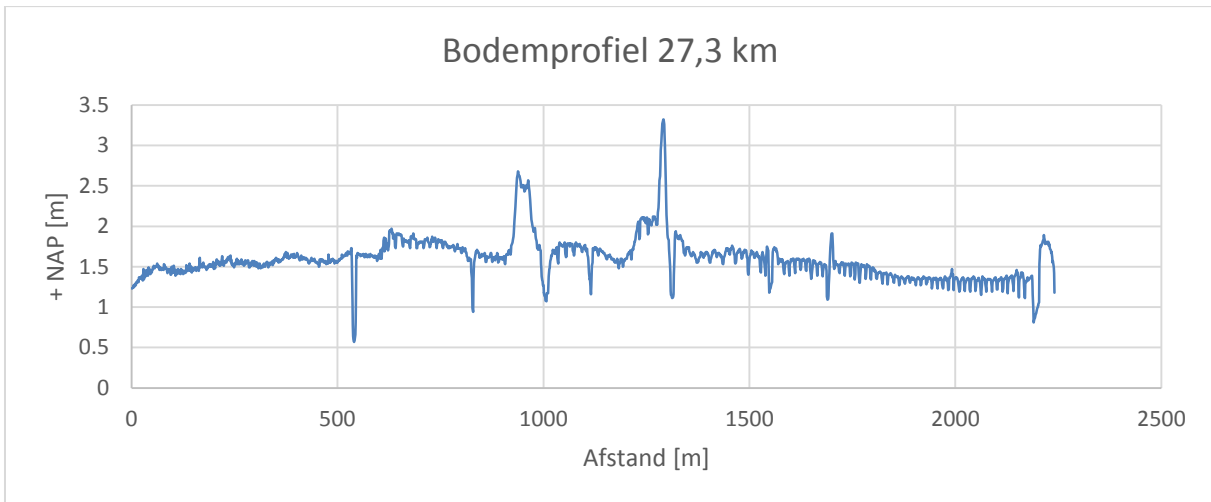
### Bodemprofielen:

Deze bijlage bevat de gebruikte gefilterde en ongefilterde bodemprofielen voor de locaties. De stapgrootte van de datasets is 1 meter en is verkregen uit het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN3) van 2014 [12].

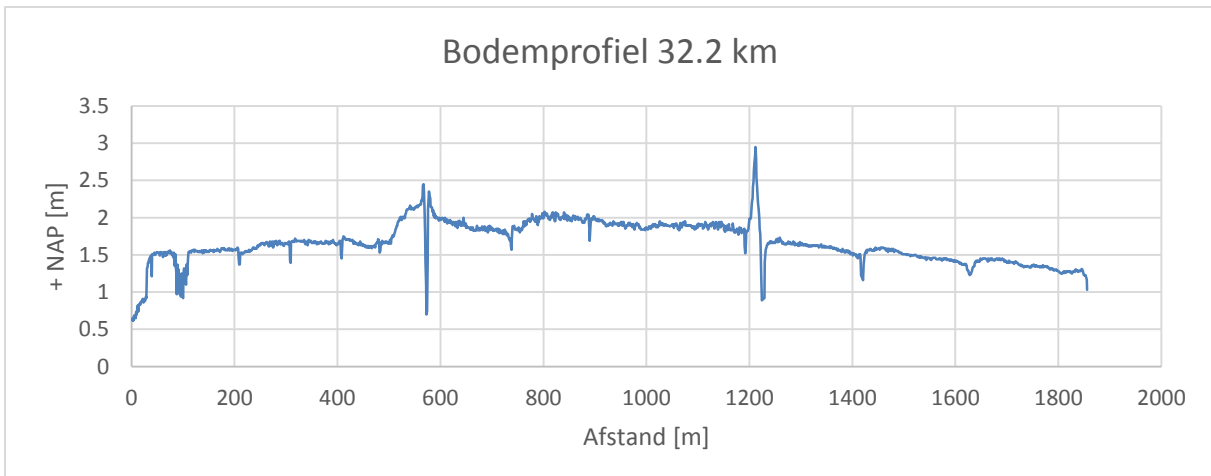
#### Locatie 22.3 km:

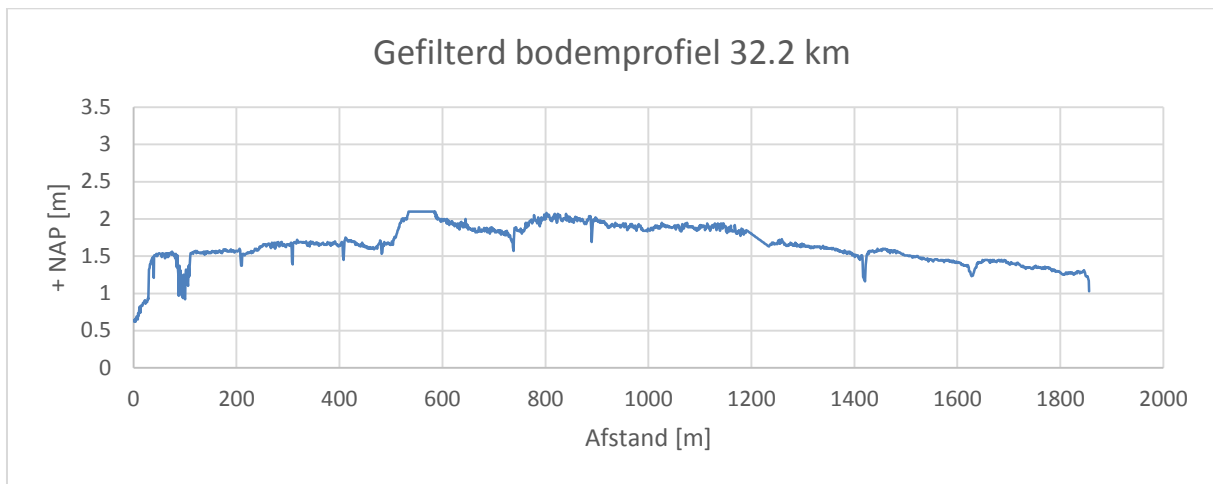


**Locatie 27.3 km:**

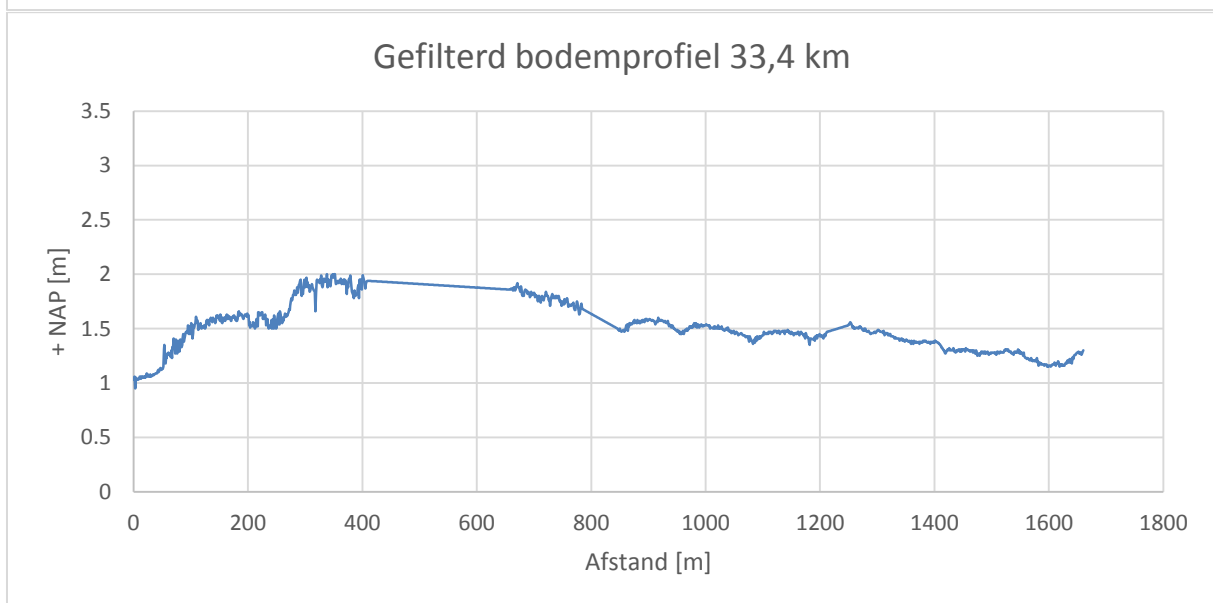
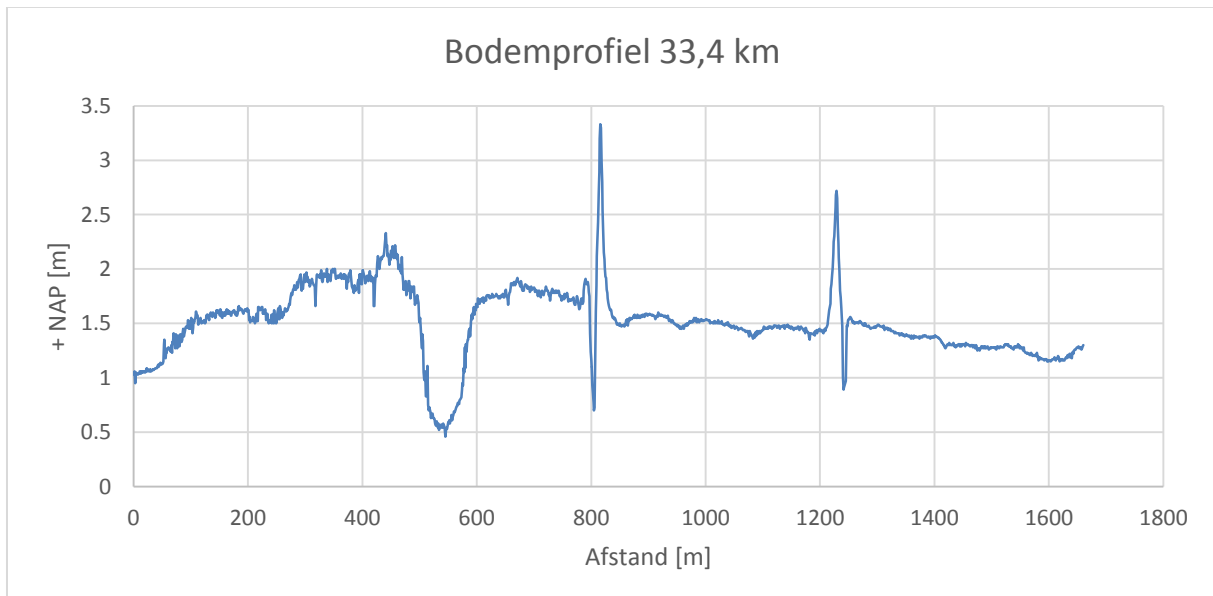


**Locatie 32.2 km:**

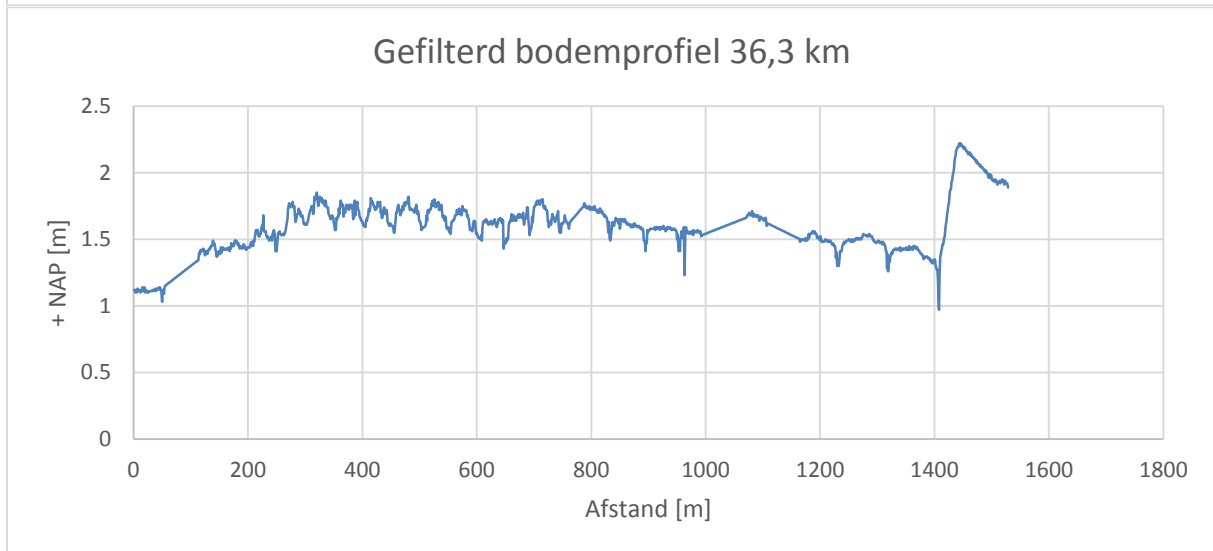
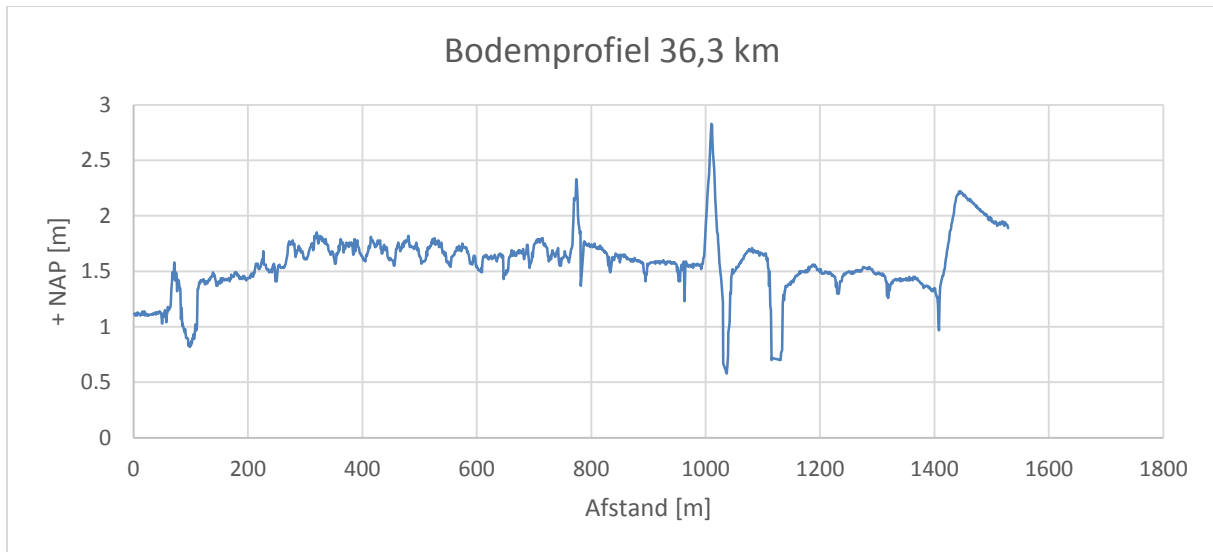




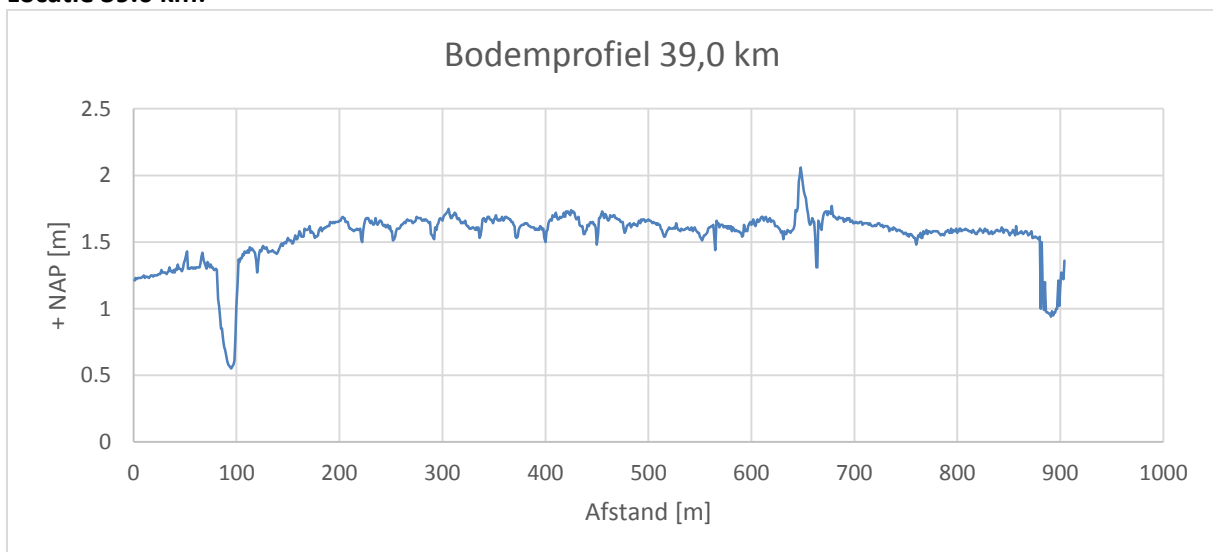
**Locatie 33.4 km:**

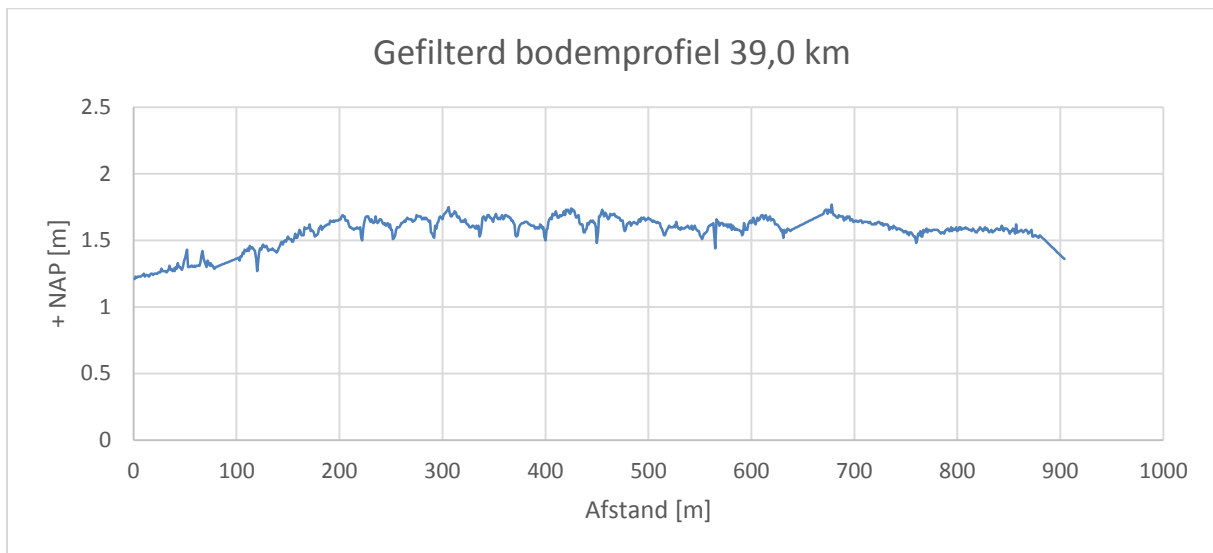


**Locatie 36.3 km:**

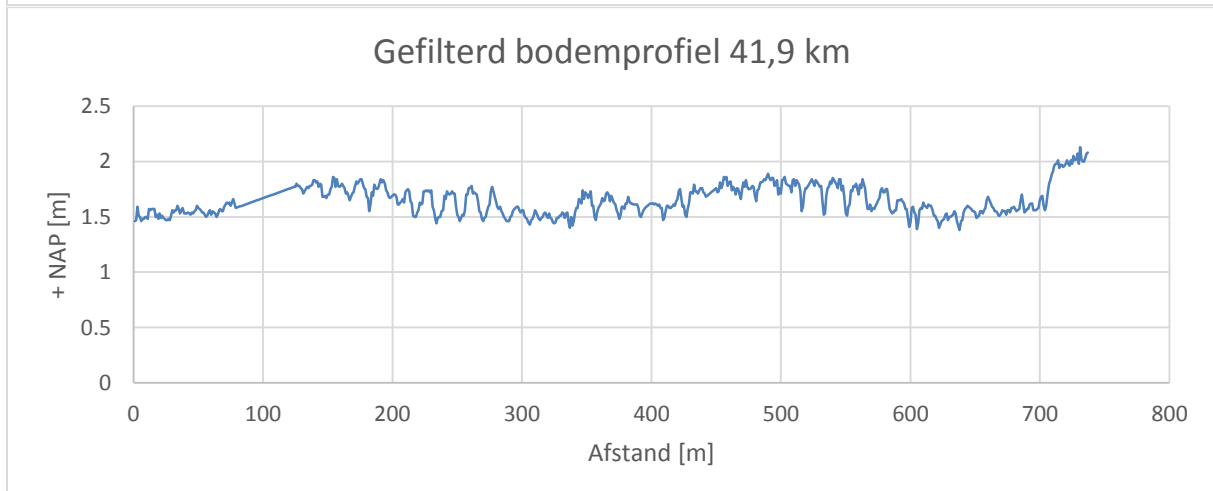
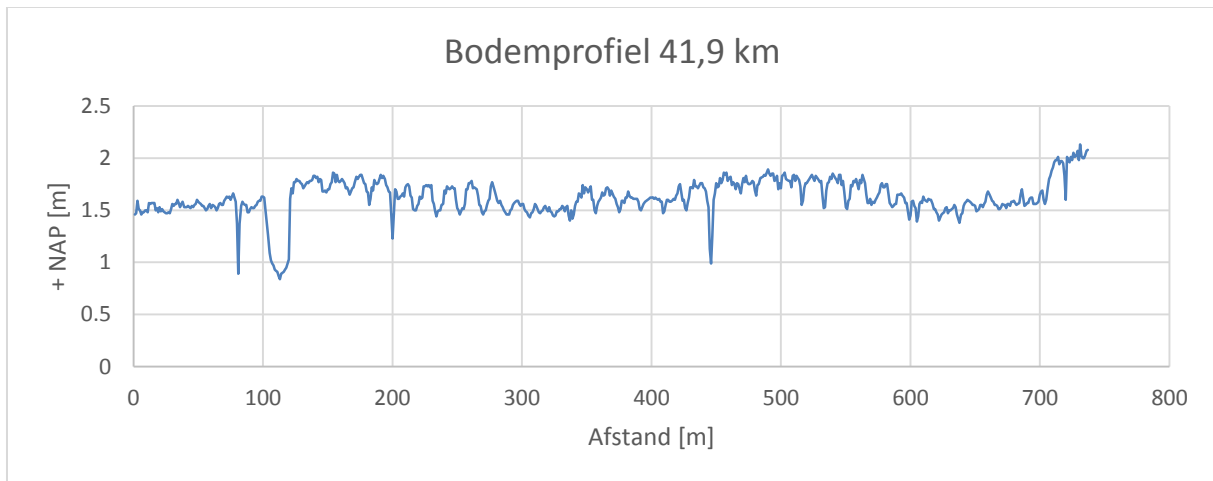


**Locatie 39.0 km:**





**Locatie 41.9 km:**



## Bijlage D

### Script SWAN:

Het volgende script is een voorbeeld gebruikt voor locatie 32.2 km, waarbij de ruwheid is opgegeven als grid:

```

$*****HEADING*****
PROJ 'IR' 'NR1'
$
$ Effect of vegetation roughness on wave conditions - Reference case
$
$*****MODEL INPUT*****
SET NAUT
MODE STAT ONED

$*****GRID*****
CGRID xpc=0. ypc=0. alpc=0. xlenc=1857. ylenc=0. mxc=1856 myc=0 CIRCLE mdc=36 flow=0.03
fhigh=2.

INPGRID BOTTOM xpinp=0. ypinp=0. alpinp=0. mxinp=1856 myinp=0 dxinp=1. dyinp=0
INPGRID WLEV xpinp=0. ypinp=0. alpinp=0. mxinp=1 myinp=0 dxinp=1857. dyinp=0
INPGRID FRIC xpinp=0. ypinp=0. alpinp=0. mxinp=1856 myinp=0 dxinp=1. dyinp=0

READINP BOTTOM -1 '[bathymetry.dep]' 1 0
READINP WLEV 1 '[waterlevel.txt]' 1 0
READINP FRIC 1 '[kn.txt]' 1 0
$*****WIND INPUT*****
WIND [speed] [wind direction]

$*****BOUNDARY CONDITIONS*****
BOU SHAP Jon PEAK DSPR DEGR
BOU W CON PAR hs= [Hs] per= [Tp] dir=[direction] dd=[spreading]

$*****INITIAL CONDITIONS*****
INIT PAR [Hs] [Tp] [Dir] [spreading]

$*****PHYSICS*****
GEN3 KOMEN
WCAPping KOMEN
QUAD iquad=2 lambda=0.25 Cnl4=3.0e+07
LIMITER ursell=10.0 qb=1.0
BREA CON alpha=1.0 gamma=0.84
FRIC MAD

$*****NUMERICS*****
NUM STOPC 0.00 0.01 0.001 99. STAT 100 0.001

$***** OUTPUT REQUESTS *****
CURve 'LINE1' 0. 0. 1857 1857. 0.
TABLE 'LINE1' HEAD '[table_32.2.tab]' XP HS TMM10 TM01 RTP
COMPUTE
STOP

```



## Bijlage E

### Hydraulische randvoorwaarden onverwerkte Hydra-NL invoer:

Tabel 15 bevat de randvoorwaarden bij de rand van het voorland voor het SWAN model op basis van de onverwerkte database voor Hydra-NL (WTI2011\_Waddenzee\_voorlanden.mdb) gebaseerd op boeimetingen. De windcondities zijn voor elke locatie gelijk gehouden. Er is gevarieerd met twee waterstanden, respectievelijk 5 en 4 m, omdat deze bij dijkontwerp en beoordeling het meest relevant zijn. De laatste kolommen bevatten de randvoorwaarden uit de database WTI2011\_Waddenzee.mdb, wat de gegevens bevat op 50 m van de dijkteen. Dit zijn de gegevens waar het SWAN model op moet worden gekalibreerd.

Tabel 15 Invoer SWAN en uitkomsten Hydra-NL bij de dijkteen

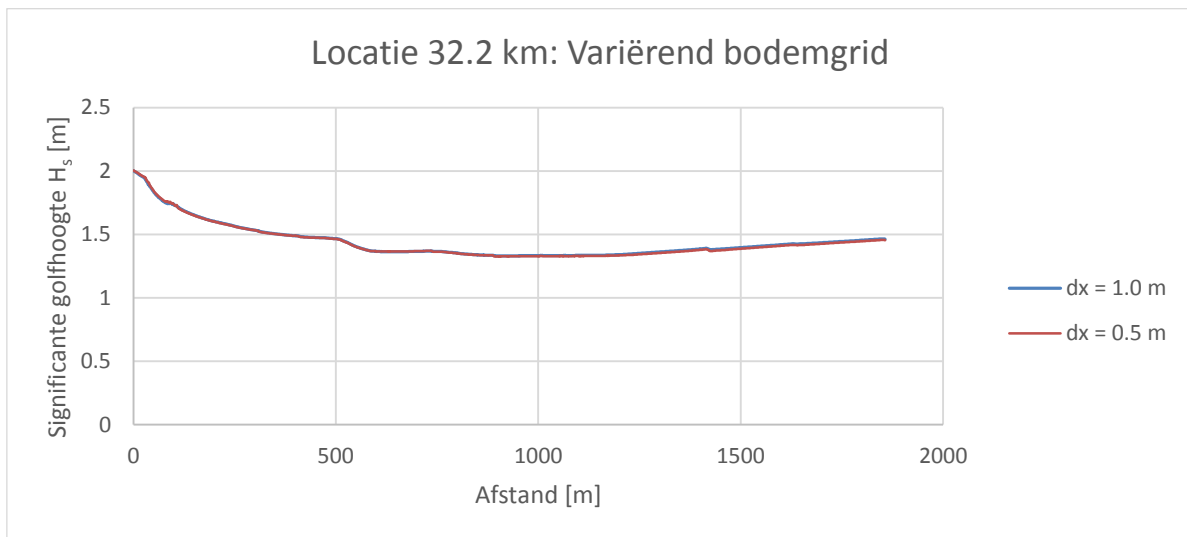
locatie [km]	Windcondities		Hydraulische randvoorwaarden					50 m van Dijkteen	
	Windsnelheid [m/s]	Windrichting [°]	Waterstand [m]	H <sub>sig</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]	T <sub>m01</sub> [s]	H <sub>sig</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]
22.3	35	310	5.0	1.93	4.47	6.41	4.10	1.63	3.99
	35	310	4.0	1.60	3.69	5.32	3.38	1.19	3.11
27.3	35	310	5.0	2.06	4.40	6.40	4.04	1.51	3.75
	35	310	4.0	1.61	3.67	5.32	3.37	1.19	3.01
32.2	35	310	5.0	1.99	4.45	6.47	4.09	1.67	4.00
	35	310	4.0	1.56	3.74	5.40	3.43	1.33	3.27
33.4	35	310	5.0	2.01	4.48	6.53	4.11	1.74	4.13
	35	310	4.0	1.57	3.78	5.51	3.47	1.40	3.40
36.3	35	310	5.0	1.99	4.35	6.16	3.99	1.58	3.97
	35	310	4.0	1.56	3.70	5.24	3.40	1.14	3.08
39	35	310	5.0	2.05	4.24	5.95	3.89	1.63	4.15
	35	310	4.0	1.61	3.63	4.98	3.33	1.29	3.38
41.9	35	310	5.0	1.84	4.13	5.95	3.79	1.58	4.08
	35	310	4.0	1.44	3.55	5.15	3.26	1.26	3.26

## Bijlage F

### Verloop golfhoogte voor verschillende stapgroottes:

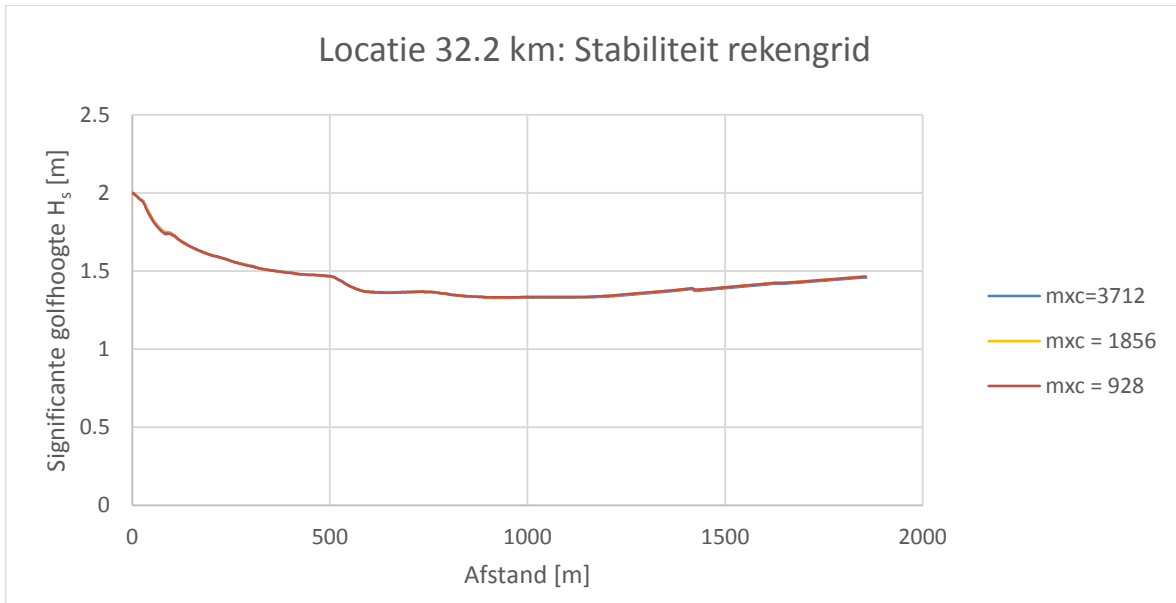
Het AHN heeft een minimale stapgrootte van  $dx = 0.5$  m. Om te testen of een grid met dit kleine formaat nodig is, wordt voor locatie 32.2 km een vergelijking gemaakt tussen het verloop van de golfhoogte met  $dx = 0.5$  m en  $dx = 1.0$  m. De hydraulische randvoorwaarden voor deze berekening komen uit de onverwerkte invoer van Hydra-NL. De waterstand is gelijk genomen aan 5 m en de windsnelheid is 35 m/s met een richting van 270 graden, zie tabel Bijlage E.

Figuur 39 toont aan dat het verschil in golfhoogte tussen de stapgroottes minimaal is. Om deze reden is gekozen om alle berekeningen uit te voeren met  $dx = 1.0$  m.



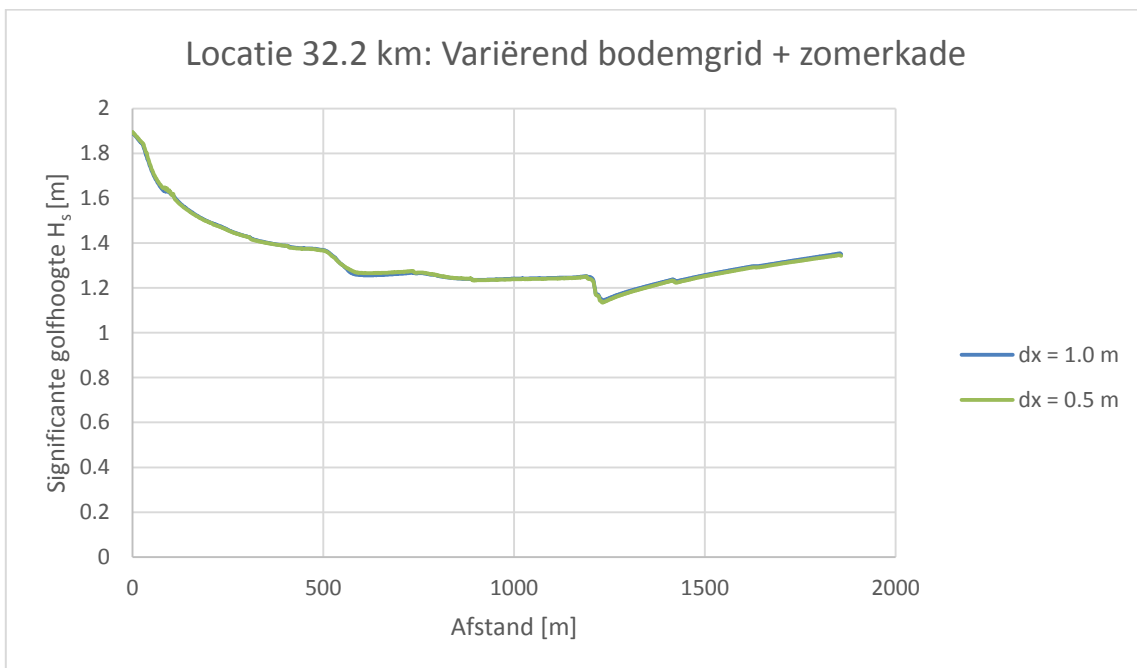
Figuur 39      Verschil in verloop met  $dx = 1.0$  m en  $dx = 0.5$  m

Daarnaast is een test gedaan om de stabiliteit van het model te controleren. Over het algemeen geldt dat een stapgrootte in het rekengrid stabiel is als de uitkomst niet verandert bij een twee maal zo hoog of zo lage stap. Figuur 40 toont het verloop van de golfhoogte voor een rekengrid gelijk aan het bodemgrid, met  $m_{xc} = 1856$  meshes (stapgrootte 1m, lengte 1857 m). De grafiek toont dat de verschillen tussen 3712, 1856 en 928 meshes nihil zijn. Daarom wordt in alle berekeningen gekozen om de rekenstapgrootte gelijk te nemen aan de bodemstapgrootte.



Figuur 40 Invloed van de rekenstapgrootte op de stabiliteit van het model

Doordat de aanwezige zomerkade slechts een breedte heeft van 20 m, wordt gekeken of de stapgrootte van  $dx = 1.0$  m ook hier voldoet. Figuur 41 geeft het verloop van de golfhoogte voor  $dx = 0.5$  m en  $dx = 1.0$  m. Ook hier is het verschil minimaal, waardoor de stapgrootte van 1 m veilig kan worden toegepast.



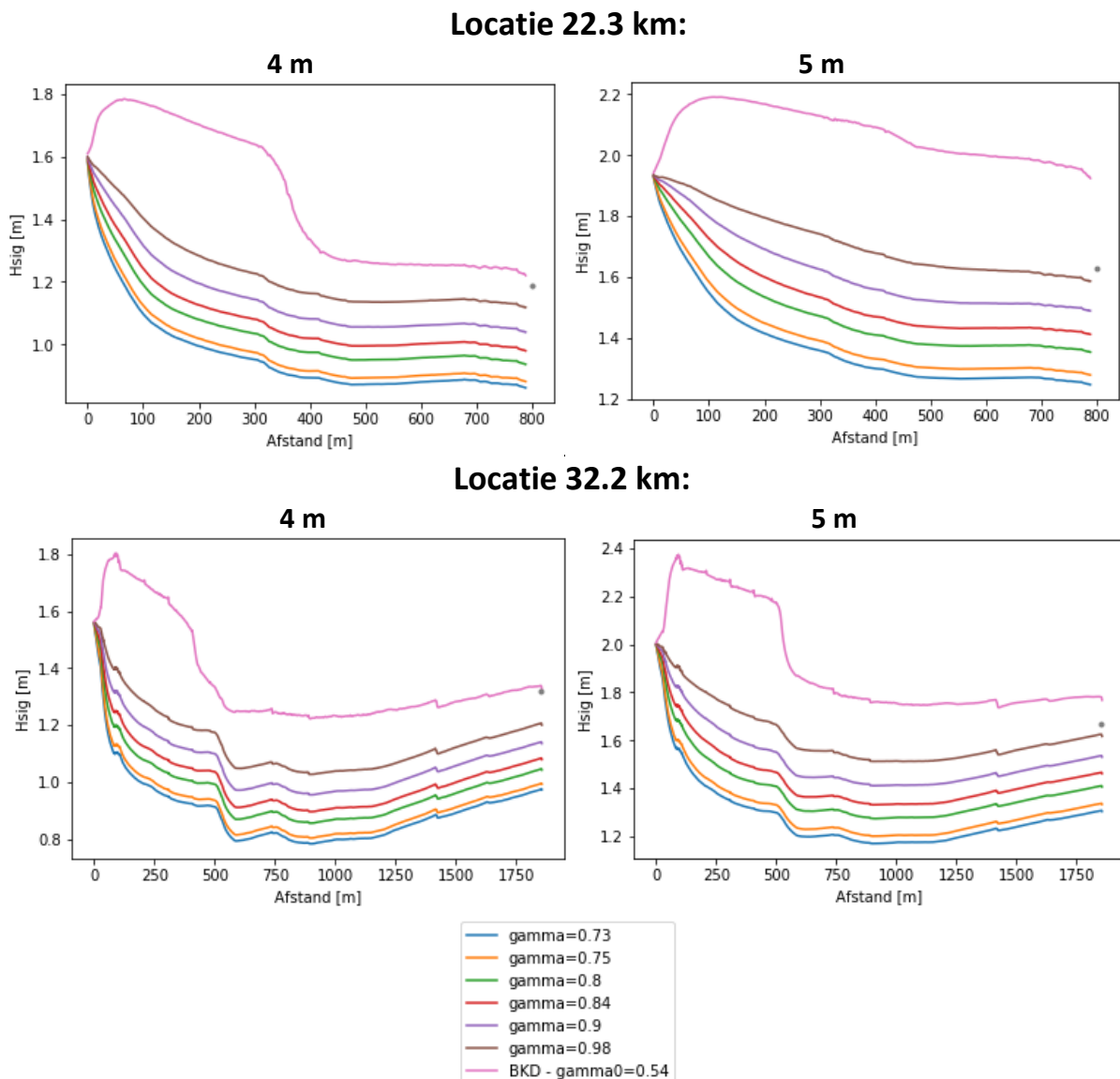
Figuur 41 Verschil in verloop met  $dx = 1.0$  m en  $dx = 0.5$  m met de zomerkade in het bodemprofiel

## Bijlage G

### Verloop golfhoogte voor verschillende breker index:

Voor de kalibratie van het model wordt gevarieerd in de breker index,  $\gamma$ . In deze bijlage wordt voor de onverwerkte invoer van Hydra-NL het verloop van de golfhoogte gegeven voor variërende breker parameter. De geteste locaties zijn 22.3 km en 32.2 km. Om het effect van de waterstand op de breking te analyseren, worden de uitkomsten voor een waterstand van 4 en 5 m vergeleken. De windsnelheid is gelijk aan 35 m/s met een richting van 270 graden, zie tabel Bijlage E.

Figuur 42 toont het verloop van de golfhoogte voor locatie 22.3 km. De blauwe stip geeft de golfhoogte op 50 m van de dijkteen uit de invoer van Hydra-NL.



Figuur 42

Verloop van de golfhoogte voor respectievelijk locatie 22.3 km en 32.2 km voor een waterstand van links: 4 m, rechts: 5 m

## Bijlage H

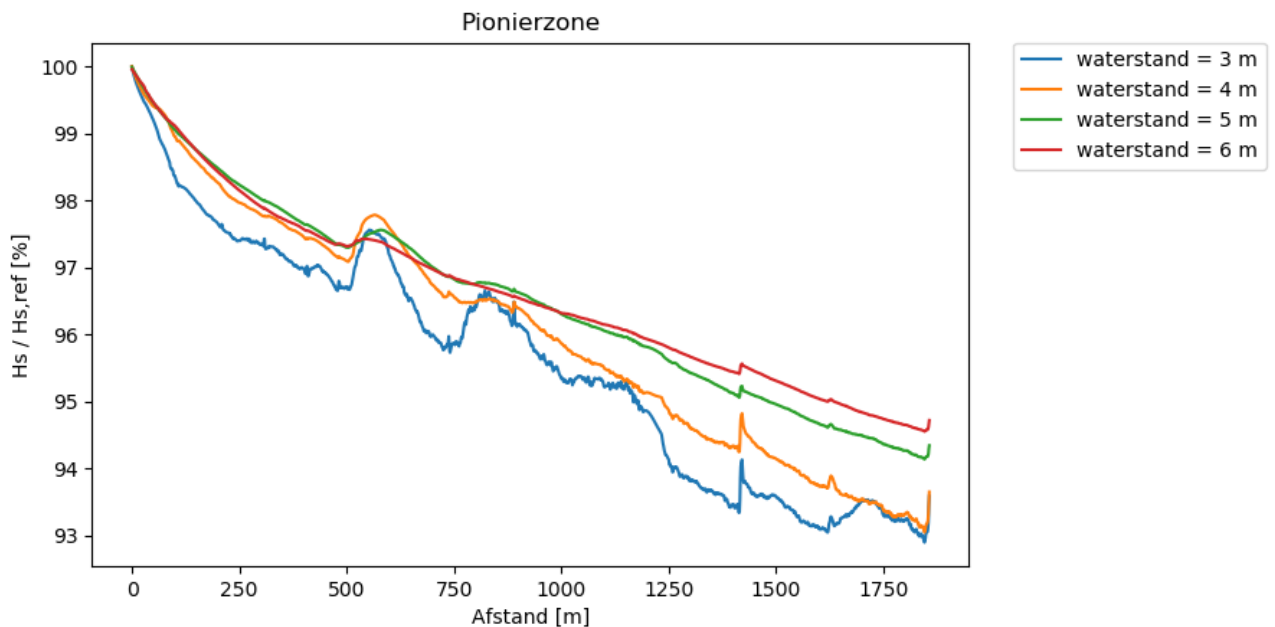
### Verloop golfhoogte voor verschillende waterstanden:

Door het variëren van de waterstand, verandert de Nikuradse ruwheid. Tabel 16 geeft een overzicht van de gebruikte Nikuradse ruwheid voor verschillende oppervlaktetypes en waterstanden. De waterdieptes in de tabel geven de gemiddelde waterdiepte op het voorland voor de gegeven waterstand. De  $k_N$  waarden zijn afgeleid volgens de relatie tussen van Brettschneider et al. [30] tussen de Manning waarde en de Nikuradse ruwheidslengte.

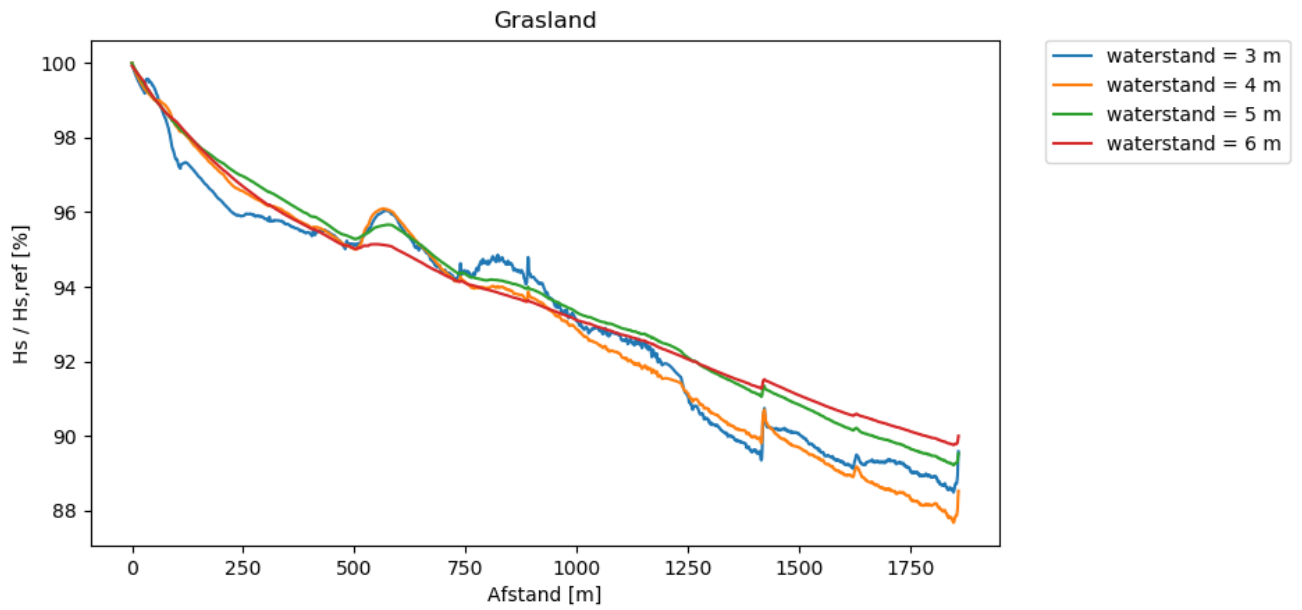
Tabel 16 *Ruwheden van oppervlaktetypes gebruikt voor verschillende waterstanden*

Waterstand	Waterdiepte [m]	Nikuradse ruwheid $k_N$		
		Pionierzone	Grasland	Middenkwelder
3 m	1.34	0.011	0.02	0.034
4 m	2.34	0.013	0.026	0.045
5 m	3.34	0.014	0.03	0.054
6 m	4.34	0.015	0.033	0.061

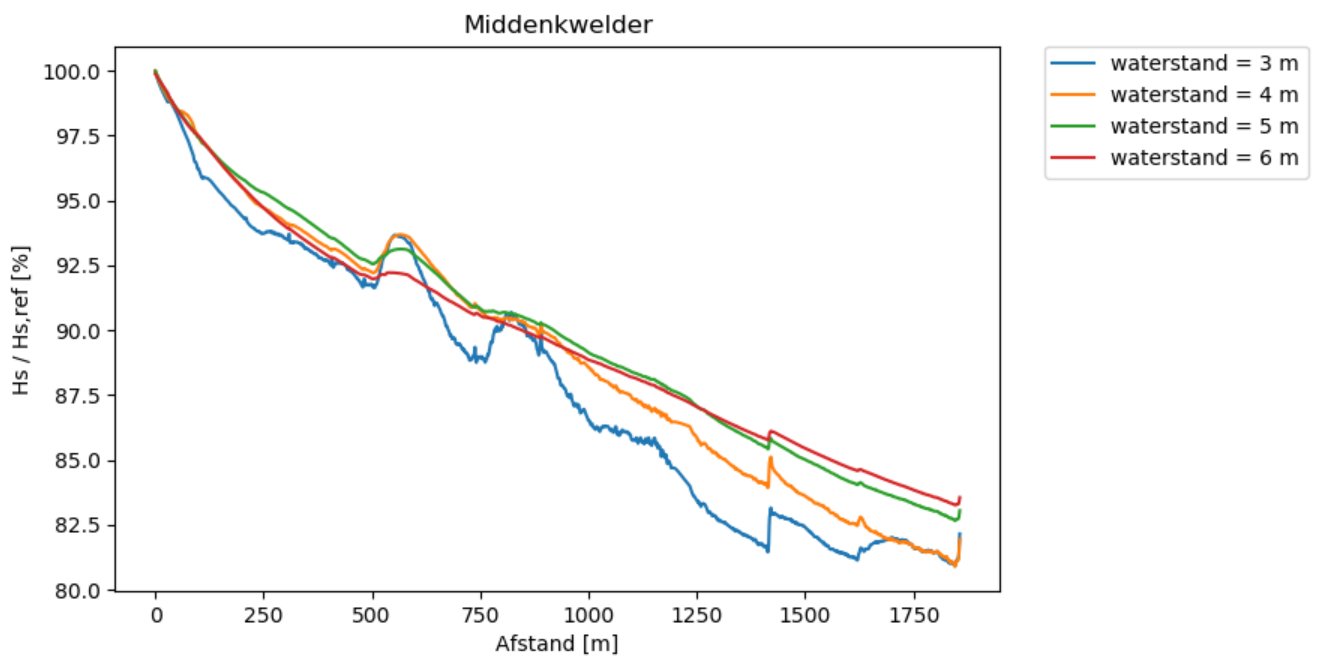
Per oppervlaktetype wordt voor verschillende waterstanden en dus ruwheden het verloop van de golfhoogte bepaald. De onderstaande figuren geven de golfhoogte ten opzichte van de referentie golfhoogte, bepaald met een glatte bodem,  $k_N = 0.001$  m. Uit de figuren blijkt dat als de Nikuradse ruwheid wordt geschaald aan de waterdiepte, de relatieve afname van de golfhoogte voor alle waterstanden nagenoeg gelijk is. Voor alle oppervlaktetypes geldt dat de afname binnen een bandbreedte van 3% ligt.



Figuur 43 *Relatieve verloop van de golfhoogte over het voorland voor pioniervegetatie*



Figuur 44 *relatieve verloop van de golfhoogte over het voorland voor grasland*

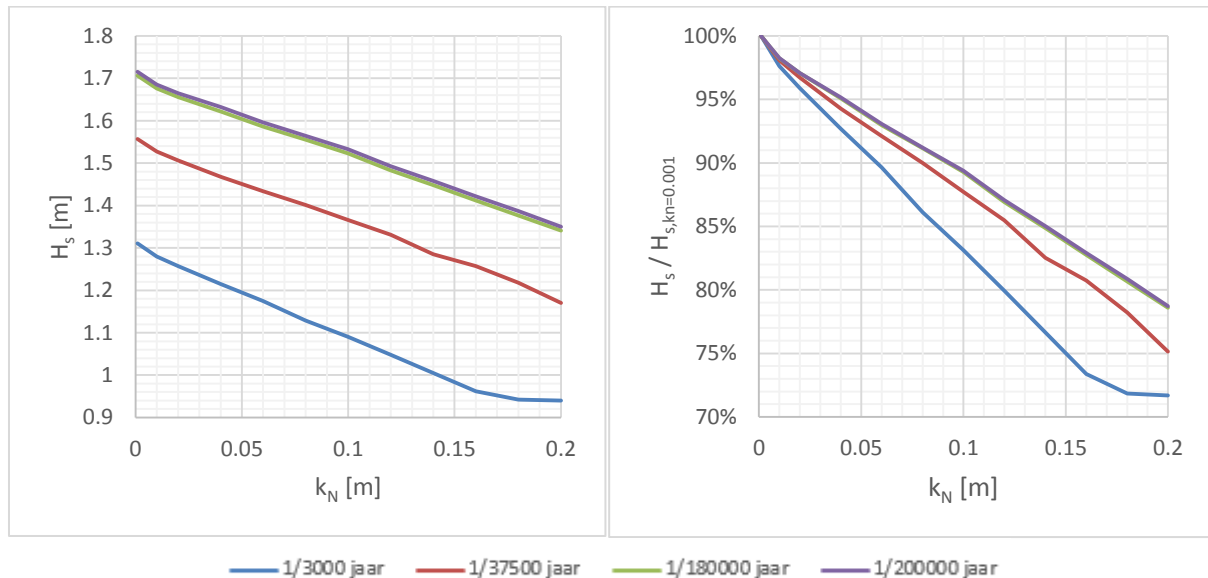


Figuur 45 *relatieve verloop van de golfhoogte over het voorland voor middenkwelder vegetatie*

## Bijlage I

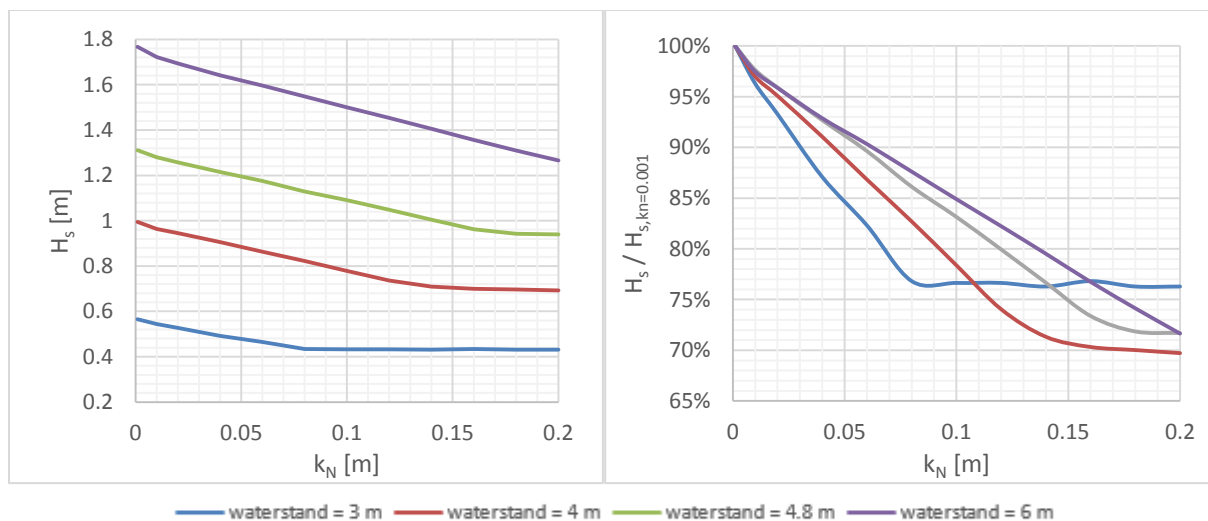
### Relatie golfhoogte en ruwheidslengte voor locatie 22.3 km:

Deze bijlage behoort bij Case II: Gevoeligheidsanalyse. Figuur 46 geeft de relatie tussen golfhoogte en ruwheid voor locatie 22.3 km voor de verschillende HR. Het is duidelijk zichtbaar dat de relatieve afname kleiner is dan voor locatie 32.2 km.



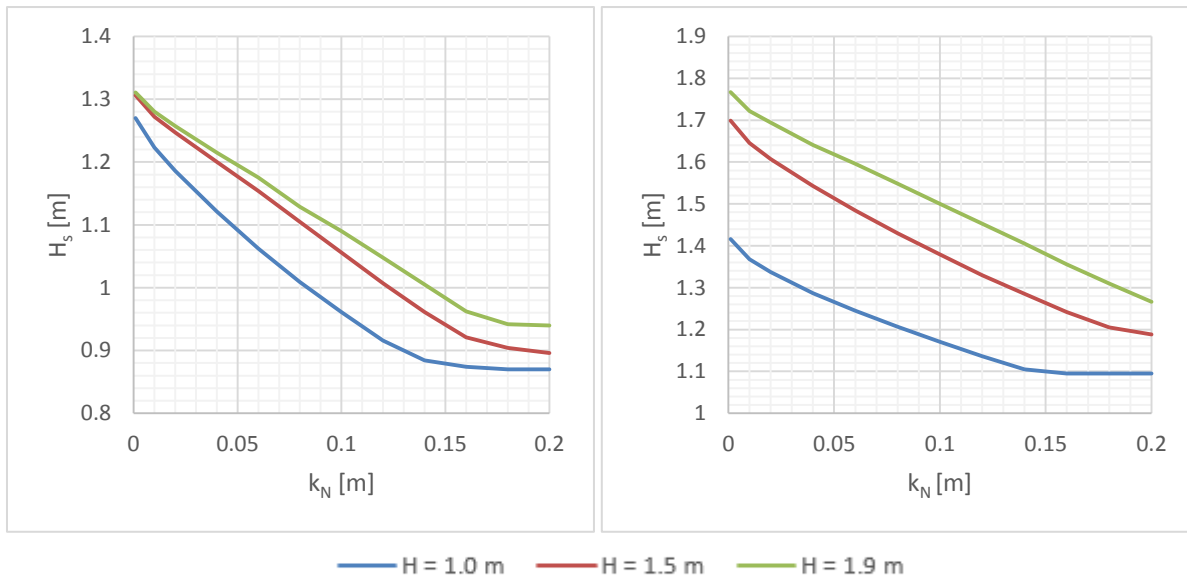
Figuur 46 Links: significante golfhoogte bij de dijkeet tegen ruwheidslengte voor de verschillende HR, rechts: relatieve golfhoogte bij de dijkeet ten opzichte van de situatie met gladde bodem

Figuur 47 toont de verandering in significante golfhoogte met ruwheidslengte voor verschillende waterstanden. De overige randvoorwaarden zijn gelijk aan de situatie voor 1/3000 per jaar. Het verloop is relatief gelijk aan het geval 32.2 km, echter, het moment dat de golfhoogte niet meer verandert treedt op voor hogere ruwheden. De maximale relatieve afname is in dezelfde orde voor beide locaties voor een waterstand.



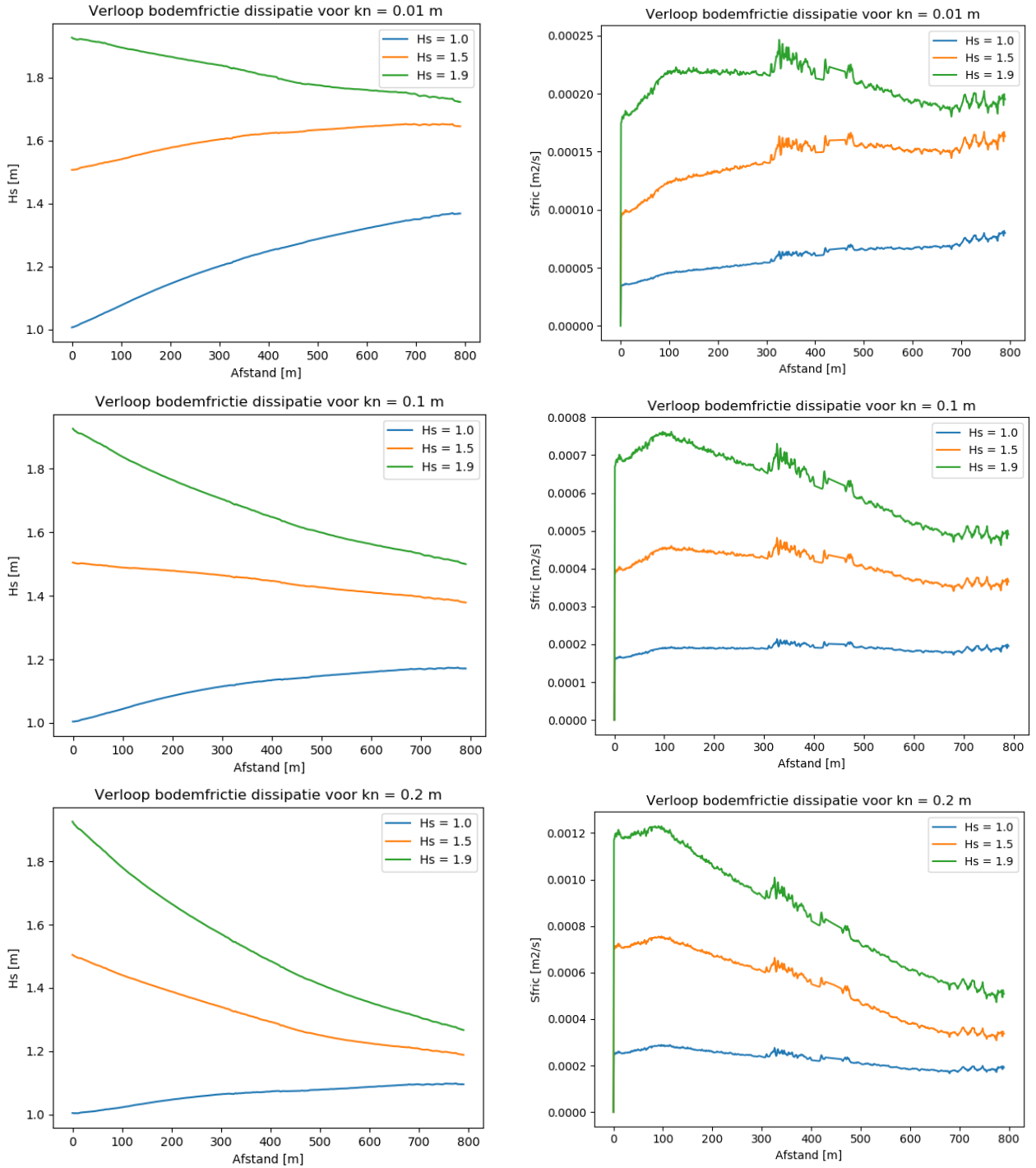
Figuur 47 Links: significante golfhoogte bij de dijkeet tegen ruwheidslengte voor de verschillende waterstanden, rechts: relatieve golfhoogte bij de dijkeet ten opzichte van de situatie met gladde bodem

Figuur 48 geeft de relatie tussen de golfhoogte en de ruweidslengte voor verschillende initiële golfhoogtes. De overige randvoorwaarden zijn gelijk aan de situatie voor 1/3000 per jaar. De deviatie in golfhoogte bij de dijkteen is significant. De rechtergrafiek geeft dezelfde relatie, echter nu bij een waterstand van 6 m. De initiële golfhoogte heeft in dit geval meer invloed op de golfhoogte bij de dijkteen.



Figuur 48 Links: significante golfhoogte bij de dijkteen tegen ruweidslengte voor de verschillende initiële golfhoogtes, rechts: idem voor een waterstand van 6 meter





Figuur 49 Verloop significante golfhoogte en bodemwrijvingdissipatie bij verschillende initiële golfhoogtes voor respectievelijk  $kn = 0.001$  m,  $0.1$  m en  $0.2$  m

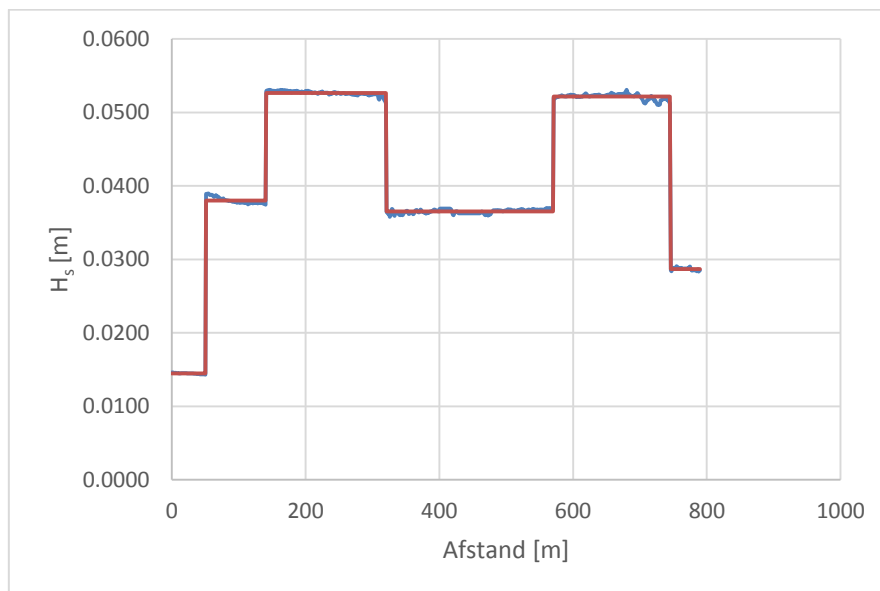
## Bijlage J

### Implementatie vegetatie overige locaties:

Voor locatie 22.3 km is de volgende schatting gemaakt voor het oppervlaktetype op basis van de vegetatiekaart en satellietfoto's:

Lengte	Oppervlaktetype	Manning n
50 m	pionierzone	0.035
90 m	lage kwelder	0.045
180 m	middenkwelder	0.05
250 m	lage kwelder	0.045
175 m	Middenkwelder	0.05
44 m	grasland	0.042

Voor een herhalingstijd van 1/3000 per jaar leidt dit tot de volgende Nikuradse ruwheidslengte:



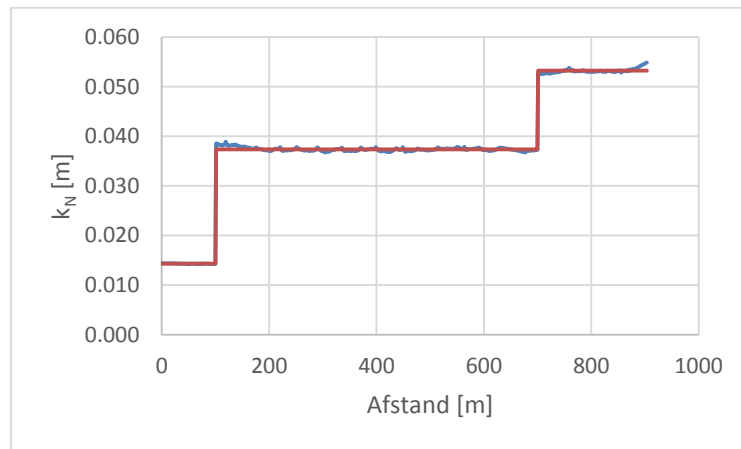
De oppervlaktetypes voor locatie 36.3 km zijn als volgt geschat:

Lengte	Oppervlaktetype	Manning n
340 m	pionierzone	0.035
720 m	lage kwelder	0.045
469 m	grasland	0.042

Deze waarden geven eerder een onderschatting dan overschatting van de werkelijkheid. Voor locatie 39.0 km wordt het oppervlaktetype beginnende vanaf de rand van het voorland als volgt geschat:

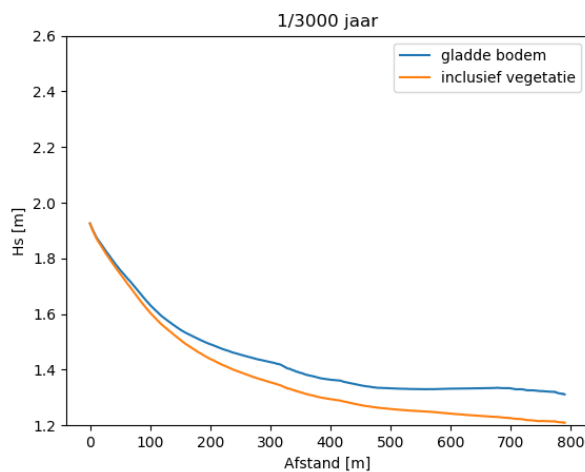
Lengte	Oppervlaktetype	Manning n
100 m	pionierzone	0.035
600 m	lage kwelder	0.045
204 m	middenkwelder	0.05

In het hierop volgende figuur is de resulterende Nikuradse ruwheidslengte voor een herhalings-tijd van 1/3000 per jaar over de afstand geplot.

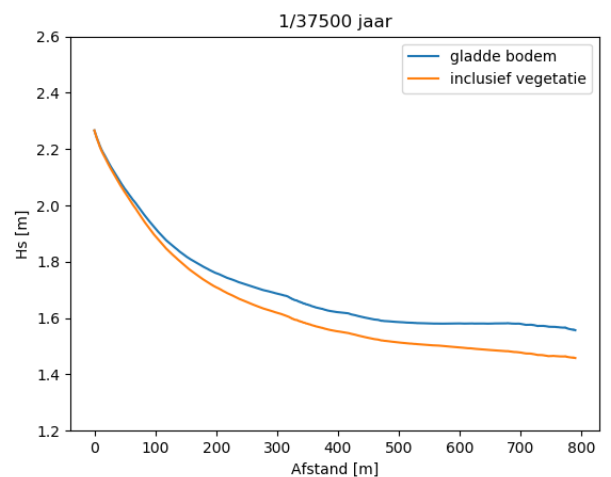


Dit leidt tot de volgende resultaten:

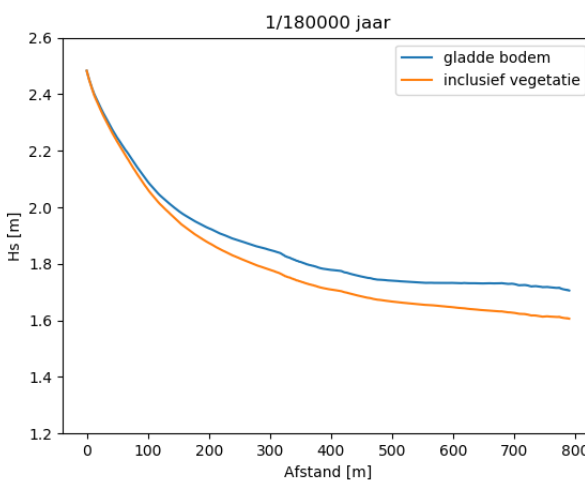
### Locatie 22.3 km



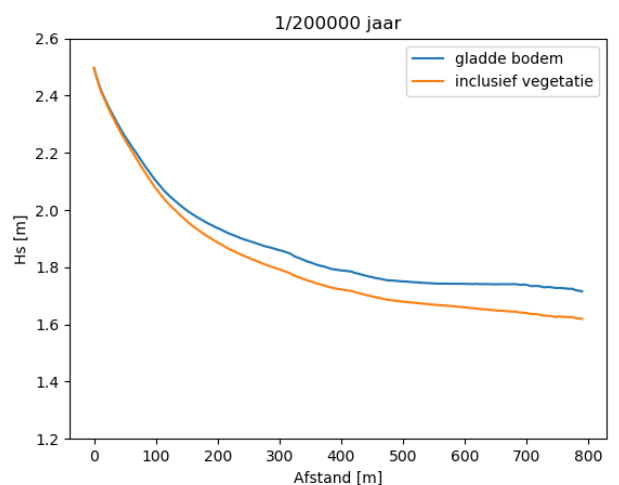
a)



b)



c)

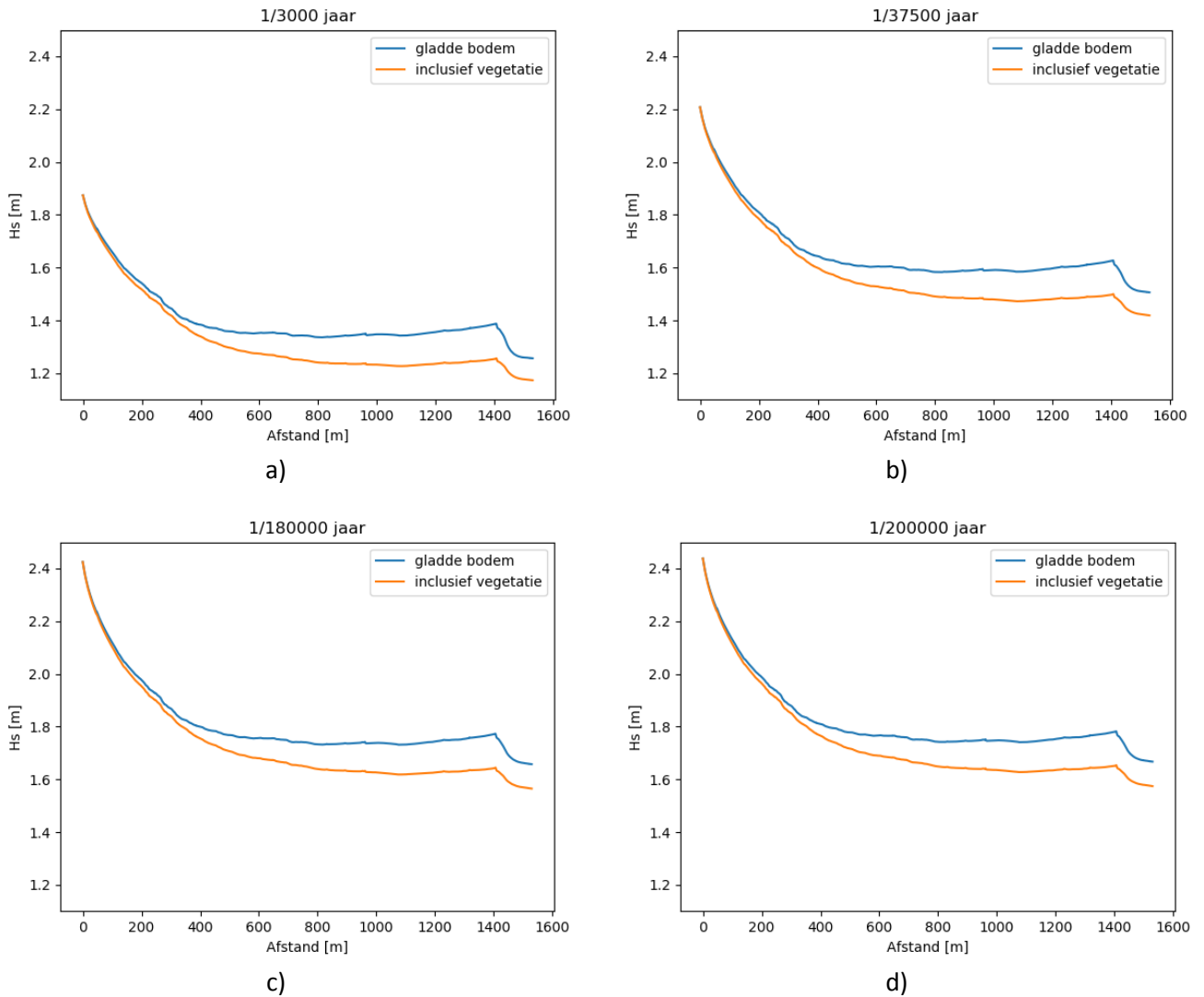


d)

Figuur 50

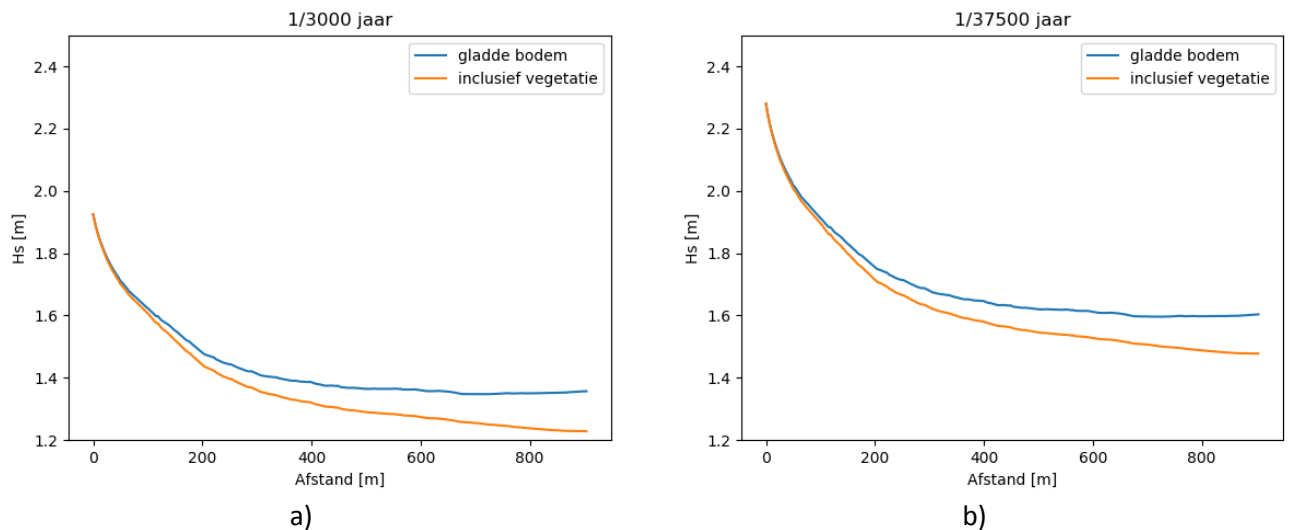
Verloop van de significante golfhoogte tot de dijcteen voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

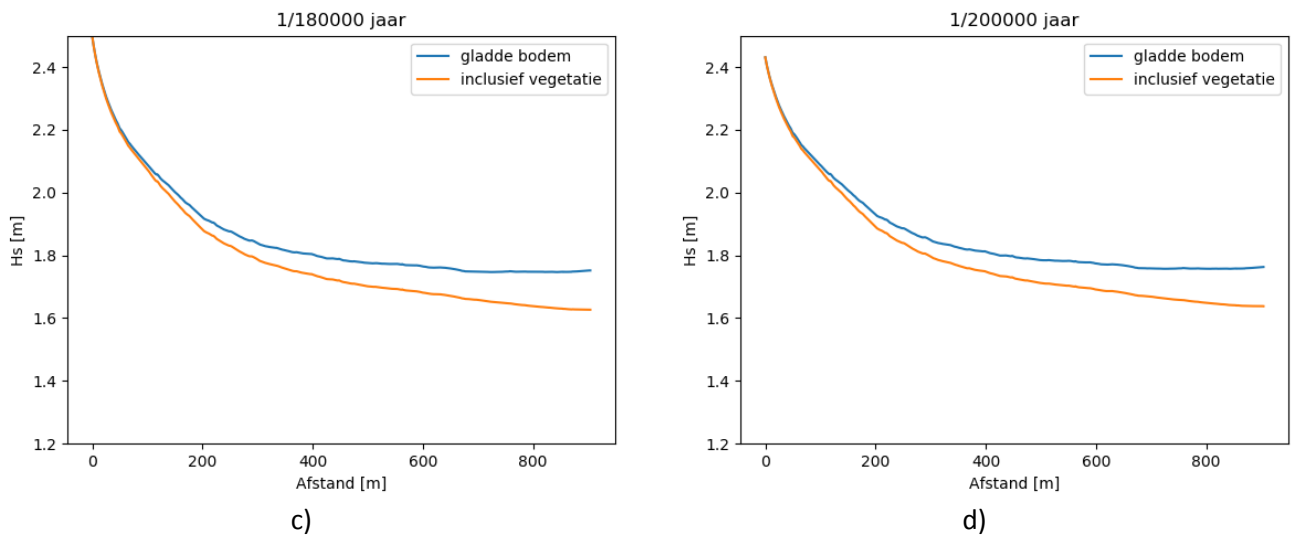
### Locatie 36.3 km



Figuur 51 Verloop van de significante golfhoogte tot de dijkteen voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

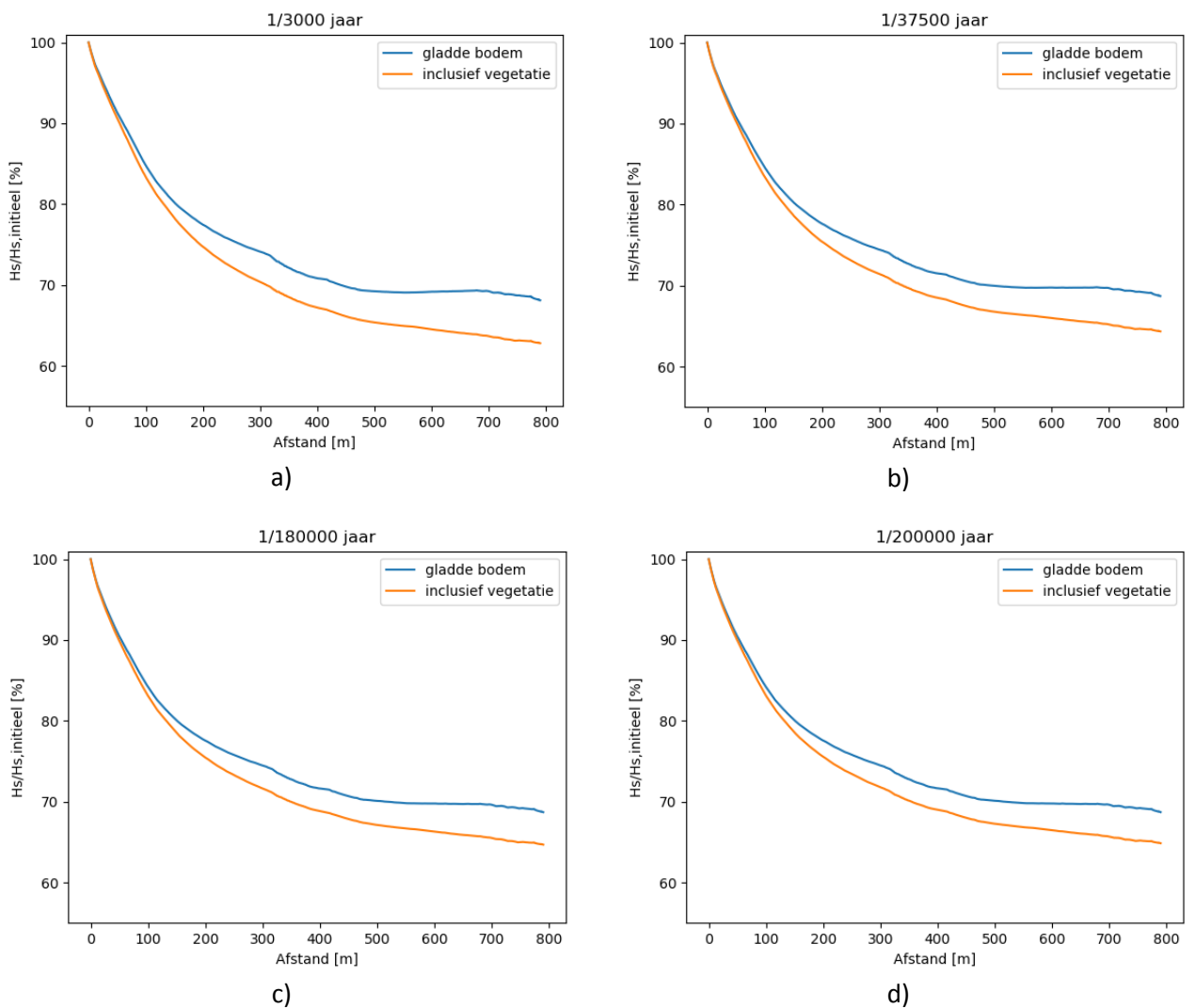
### Locatie 39.0 km





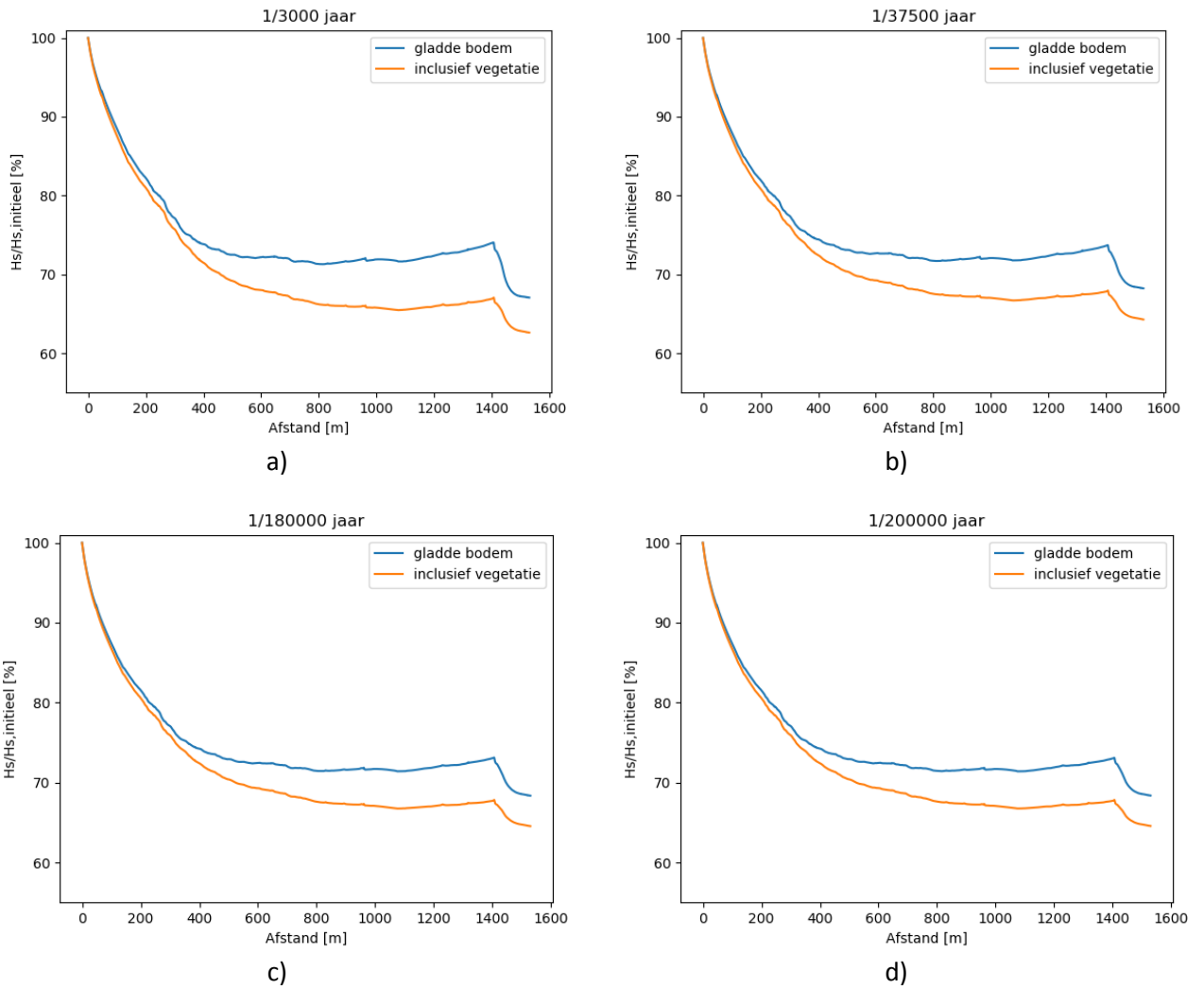
Figuur 52 Verloop van de significante golfhoogte tot de dijkteen voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

### Locatie 22.3 km



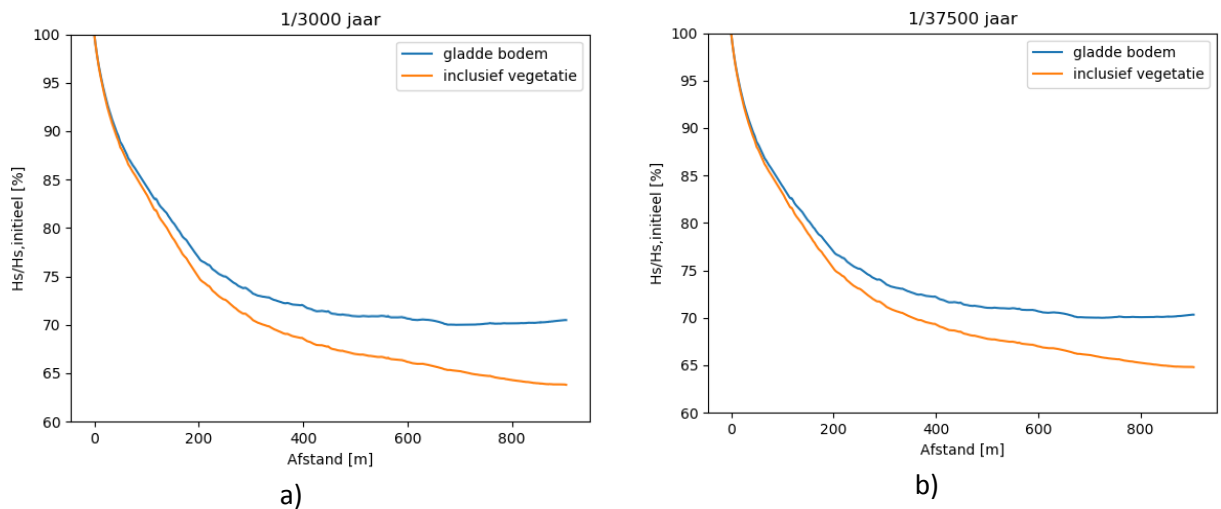
Figuur 53 Verloop van de significante golfhoogte ten opzichte van de initiële golfhoogte voor gladde bodem en vegetatie voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

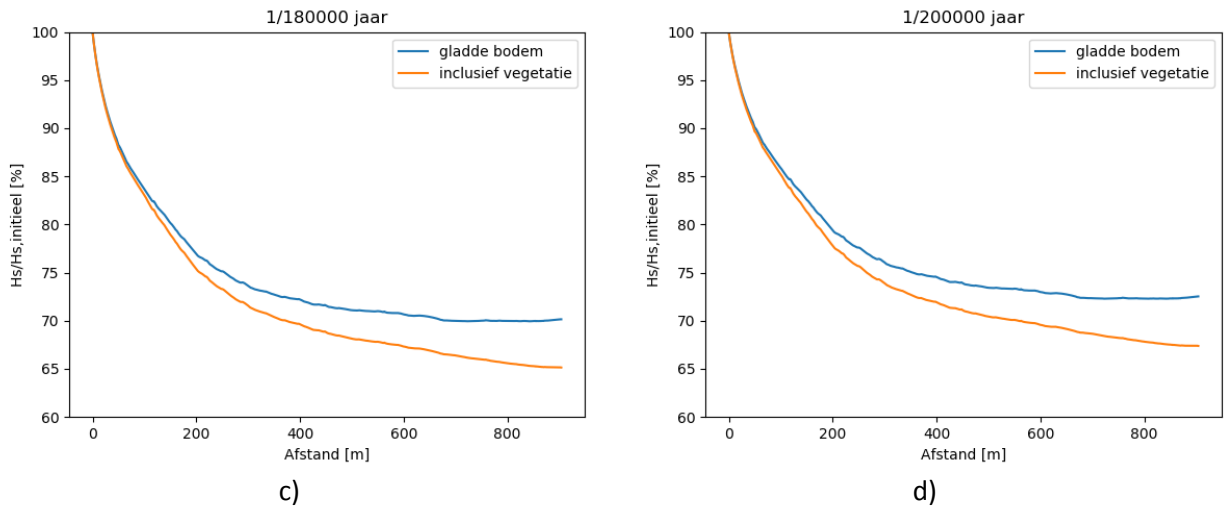
### Locatie 36.3 km



Figuur 54 Verloop van de significante golfhoogte ten opzichte van de initiële golfhoogte voor gladde bodem en vegetatie voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

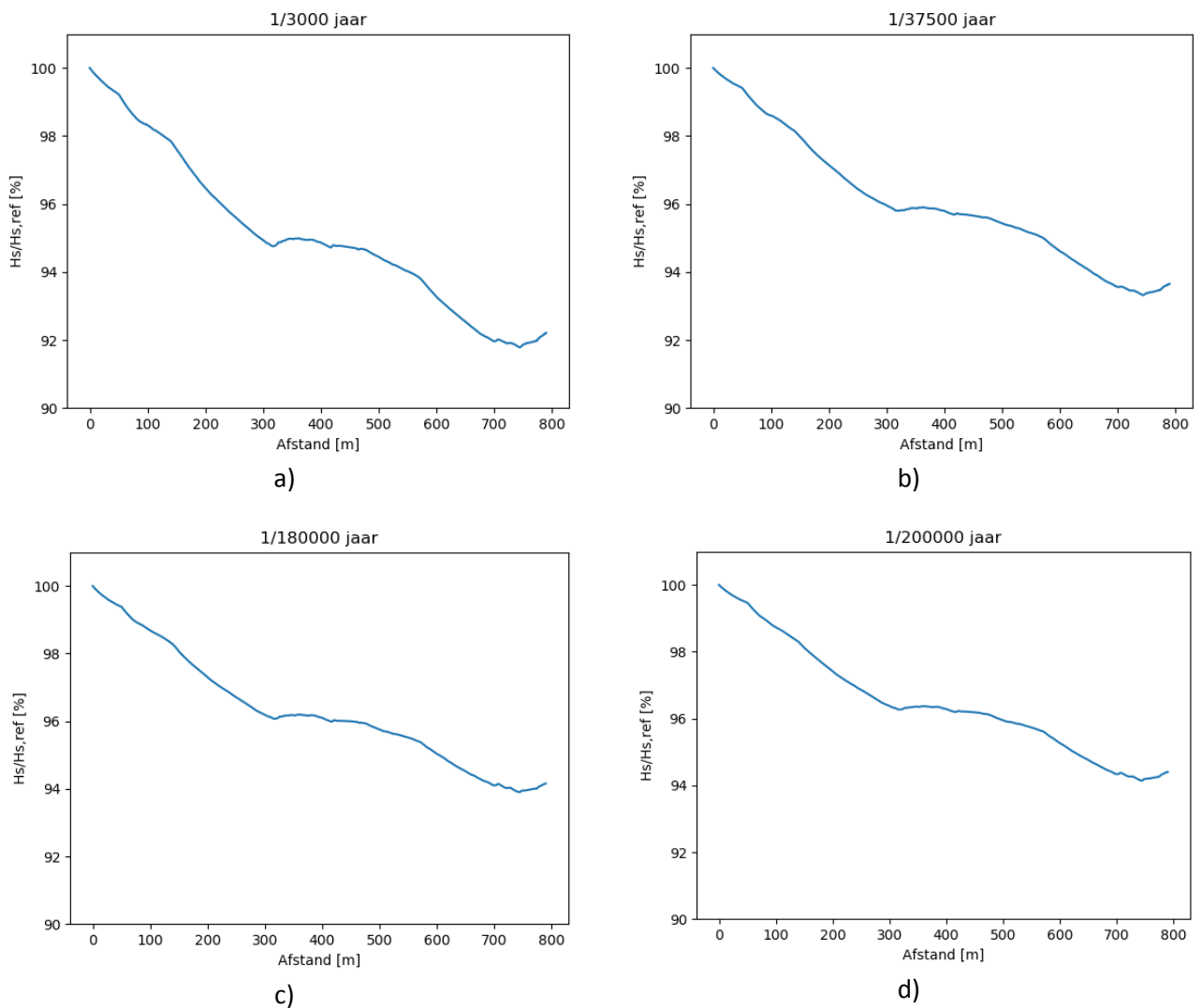
### Locatie 39.0 km





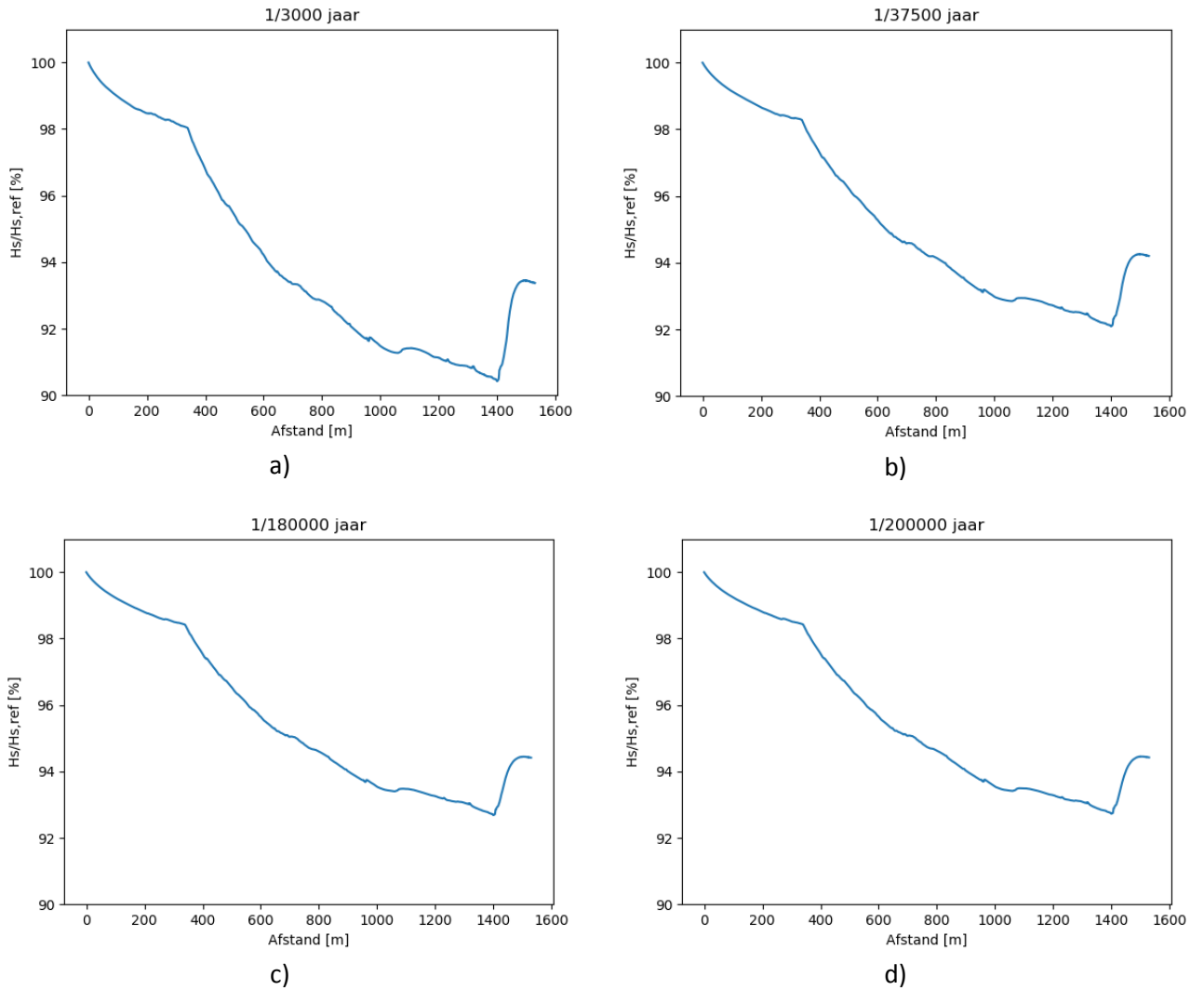
Figuur 55 Verloop van de significante golfhoogte ten opzichte van de initiële golfhoogte voor gladde bodem en vegetatie voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

### Locatie 22.3 km



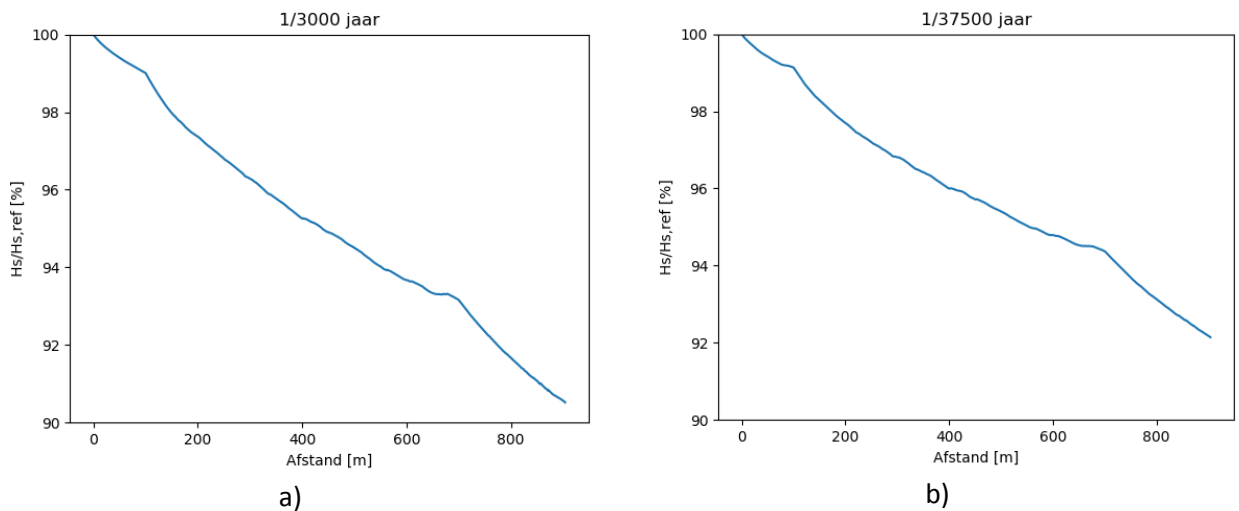
Figuur 56 Verloop van de significante golfhoogte inclusief vegetatie ten opzichte van een gladde bodem voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

### Locatie 36.3 km

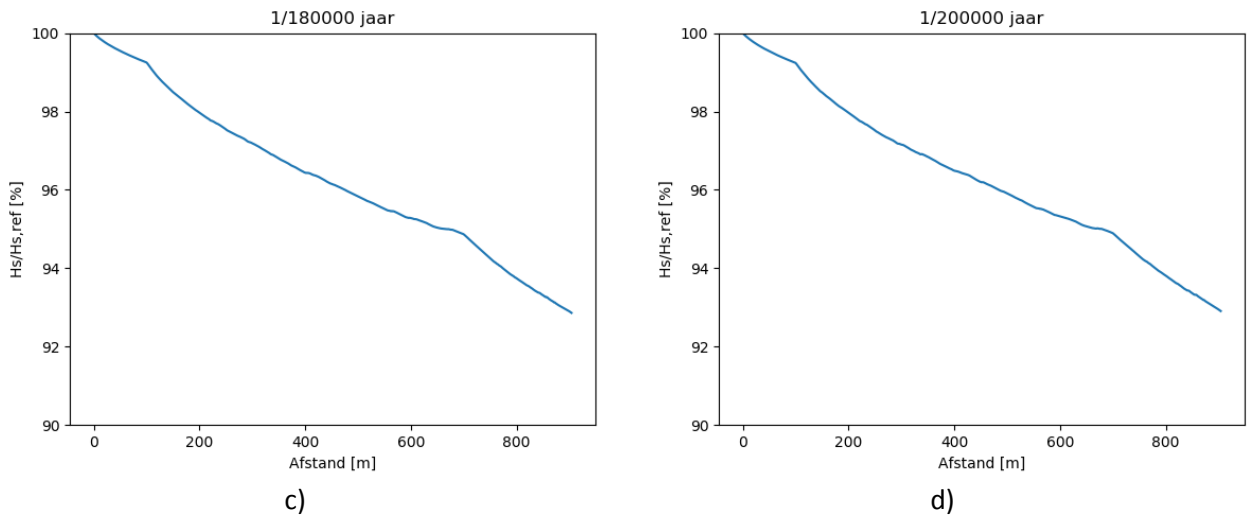


Figuur 57 Verloop van de significante golfhoogte inclusief vegetatie ten opzichte van een gladde bodem voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

### Locatie 39.0 km







Figuur 58 Verloop van de significante golfhoogte inclusief vegetatie ten opzichte van een gladde bodem voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

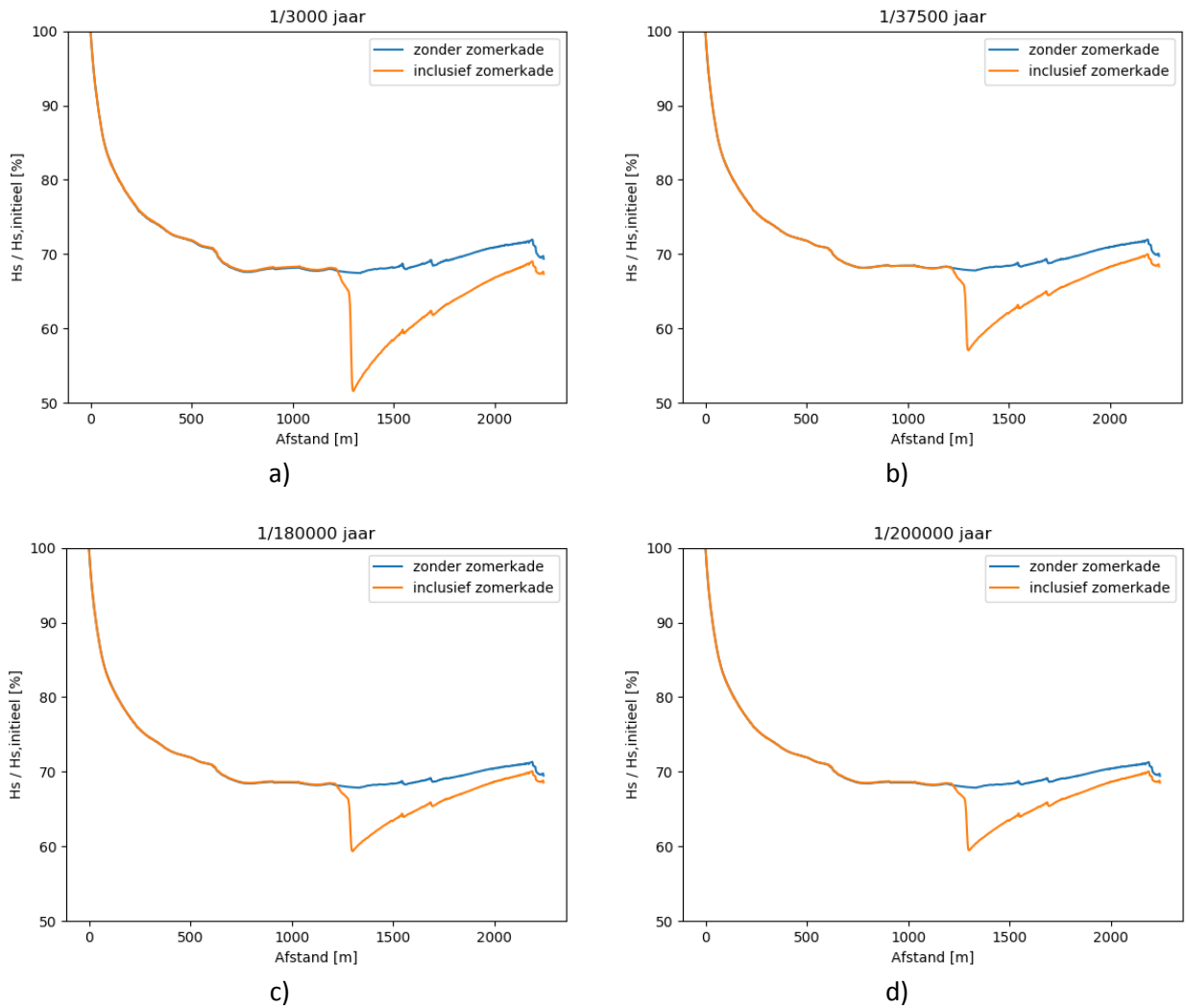
De concluderende resultaten en de reductiefactor voor de golfhoogte bij de dijkteen uit Hydra-NL zijn samengevat in Tabel 17.

Tabel 17 Reductie door geschatte vegetatie, laatste kolom: reductiefactor voor de golfhoogte uit Hydra-NL

Locatie	HR [per jaar]	Totale reductie gladde bodem	Totale reductie inclusief vegetatie	Extra reductie vegetatie t.o.v. gladde bodem	Reductiefactor voor golfhoogte bij dijkteen uit Hydra-NL
22.3 km	1/3000	32%	37%	5%	0.92
	1/37500	31%	36%	4%	0.94
	1/180000	31%	35%	4%	0.94
	1/200000	31%	35%	4%	0.94
36.3 km	1/3000	33%	37%	4%	0.93
	1/37500	32%	36%	4%	0.94
	1/180000	31%	35%	4%	0.94
	1/200000	31%	35%	4%	0.94
39.0 km	1/3000	30%	36%	7%	0.90
	1/37500	30%	35%	6%	0.92
	1/180000	30%	35%	5%	0.93
	1/200000	30%	35%	5%	0.93

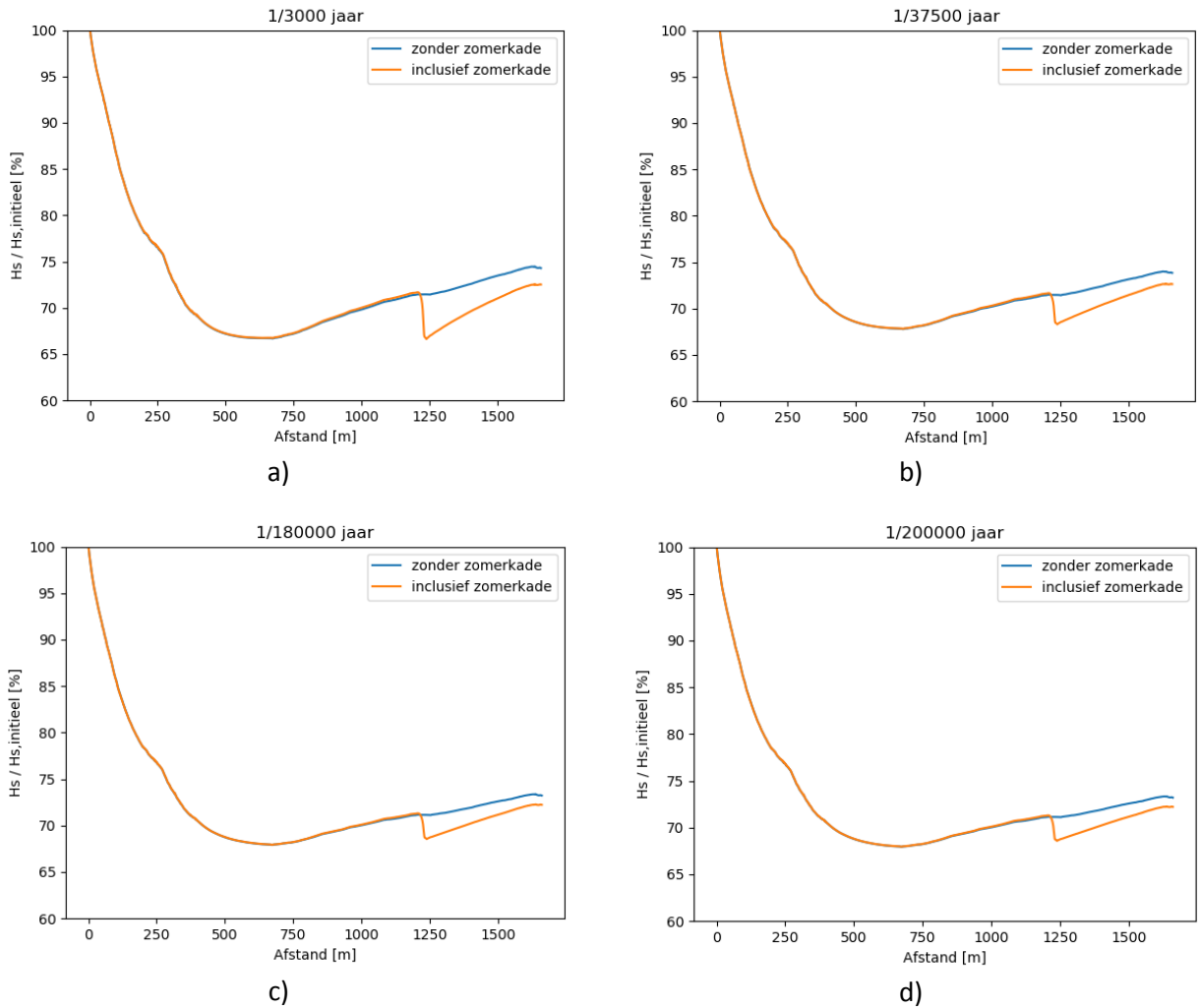
**Bijlage K**  
Effect zomerkade op overige profielen:

**Locatie 27.3 km**



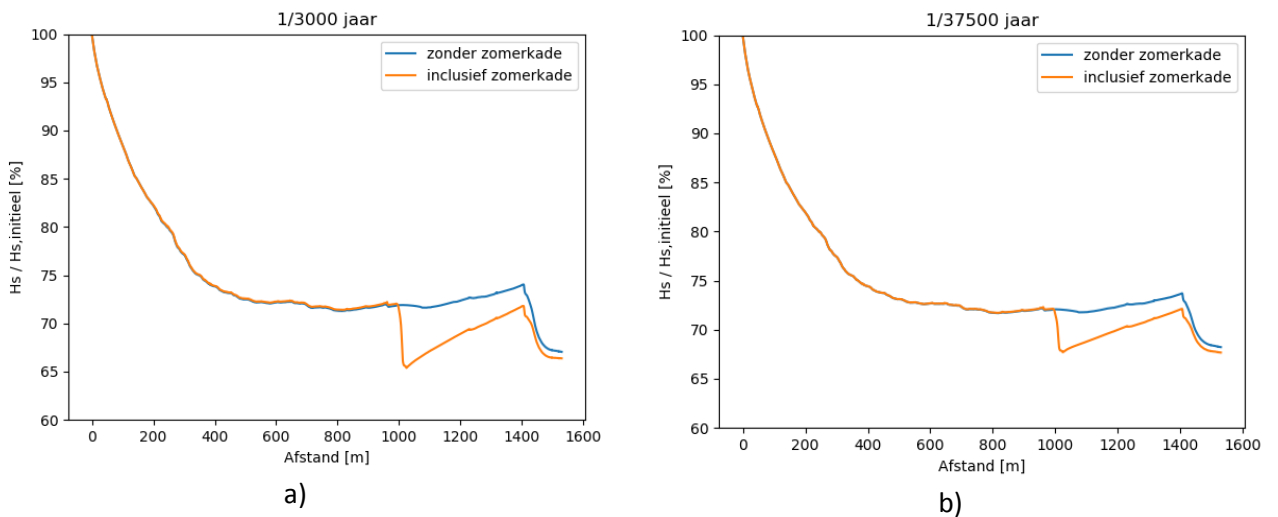
**Figuur 59** Verloop van de golfhoogte ten opzichte van de initiële golfhoogte met en zonder zomerkade voor locatie 27.3 km voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

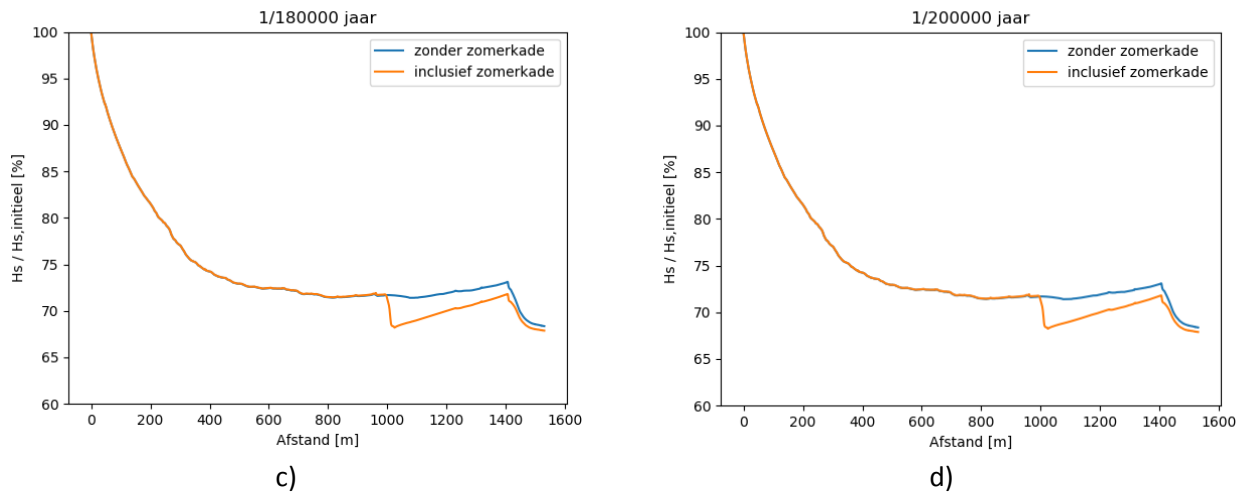
### Locatie 33.4 km



Figuur 60 Verloop van de golfhoogte ten opzichte van de initiële golfhoogte met en zonder zomerkade voor locatie 33.4 km voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

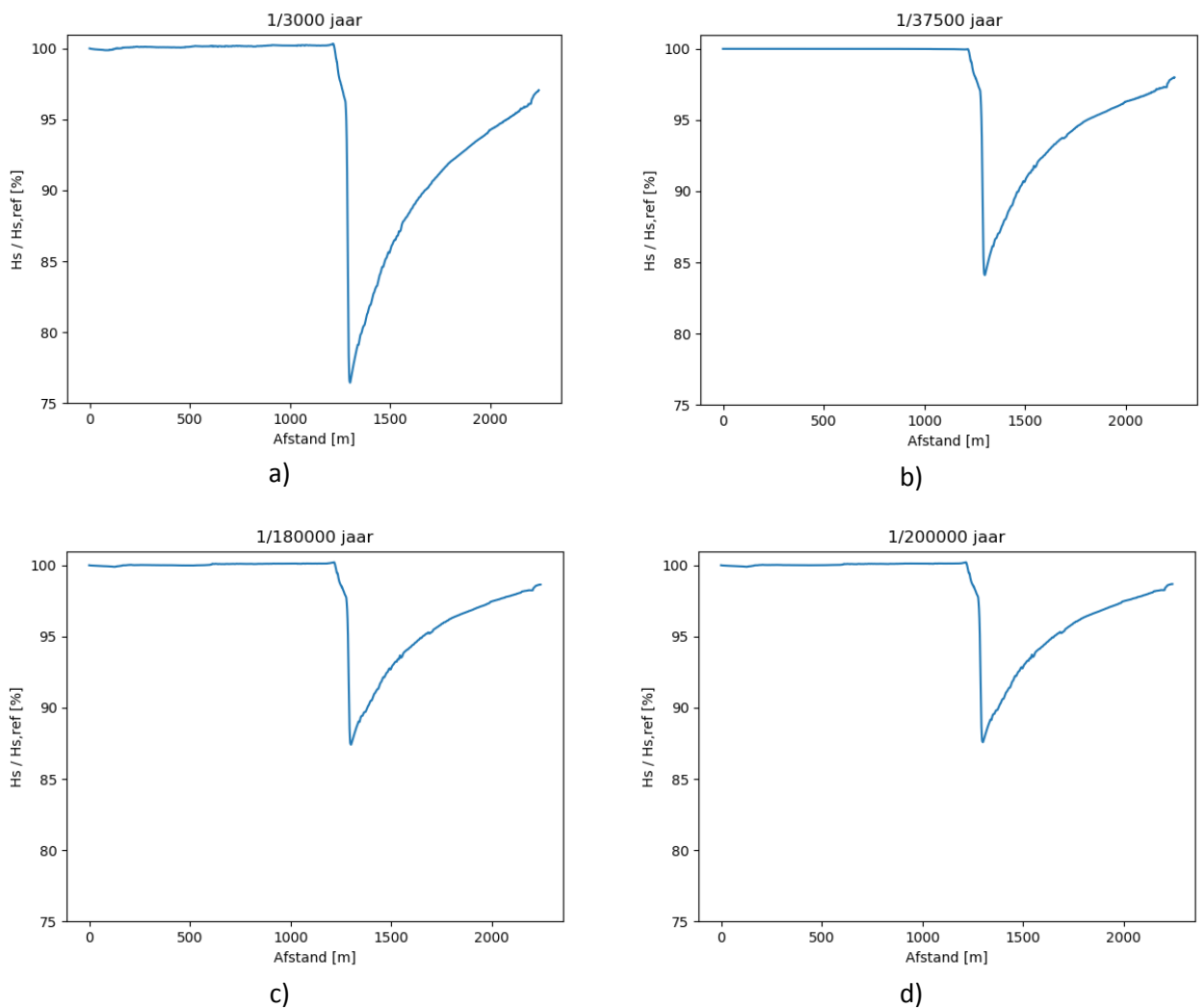
### Locatie 36.3 km





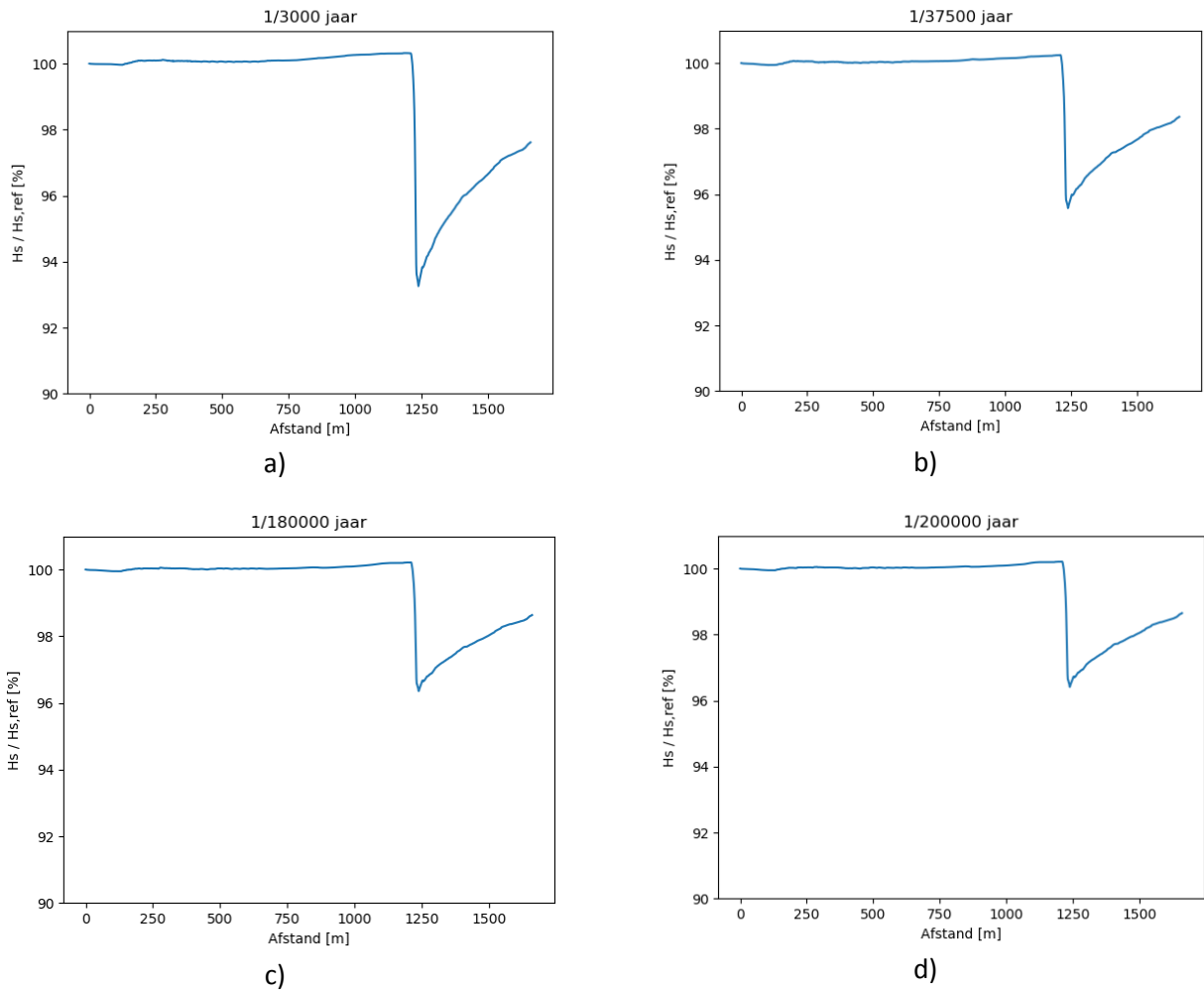
**Figuur 61** Verloop van de golfhoogte ten opzichte van de initiële golfhoogte met en zonder zomerkade voor locatie 36.3 km voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

### Locatie 27.3 km



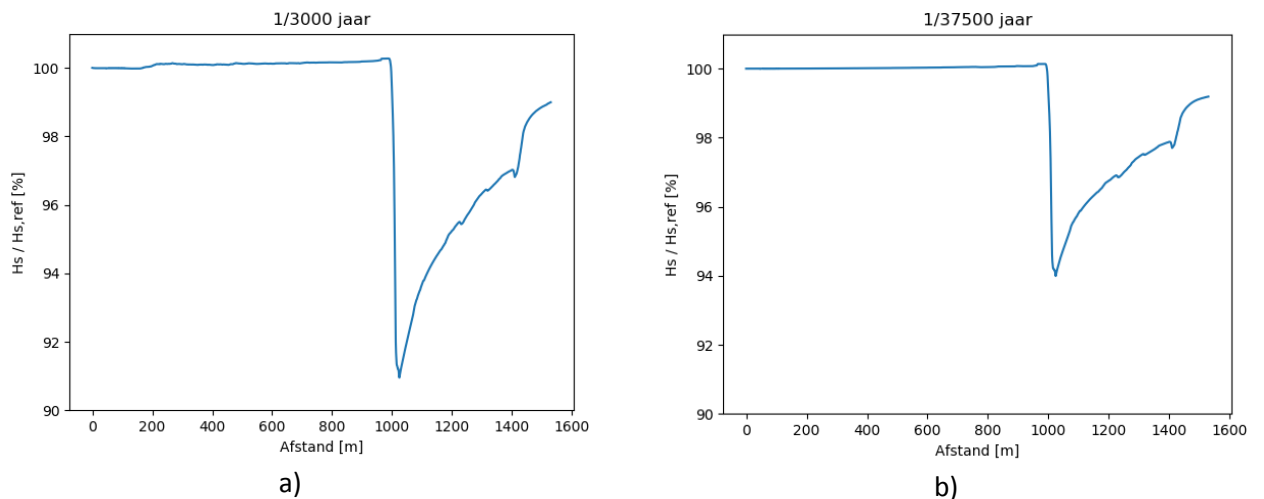
**Figuur 62** Verloop van de significante golfhoogte inclusief zomerkade ten opzichte van een gefilterd bodemprofiel voor locatie 27.3 km voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

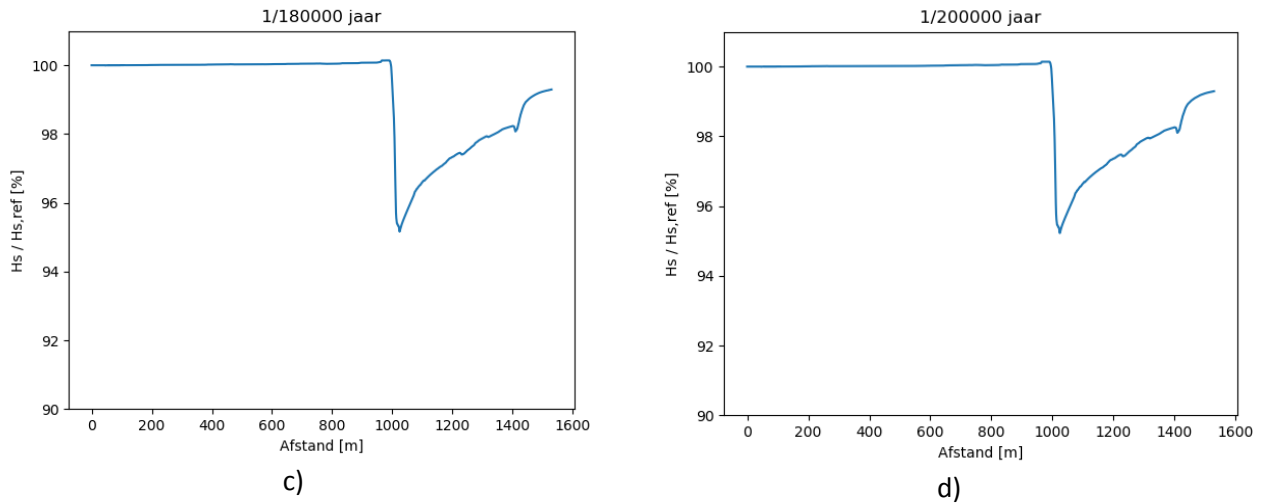
### Locatie 33.4 km



**Figuur 63** Verloop van de significante golfhoogte inclusief zomerkade ten opzichte van een gefilterd bodemprofiel voor locatie 33.4 km voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

### Locatie 36.3 km





Figuur 64

Verloop van de significante golfhoogte inclusief zomerkade ten opzichte van een gefilterd bodemprofiel voor locatie 36.3 km voor HR: a) 1/3000 per jaar, b) 1/37500 per jaar, c) 1/180000 per jaar en d) 1/200000 per jaar

## Bijlage L

### Resultaten GEBU beoordeling:

Onderstaand geeft de representatieve resulterende kleilaagdikte voor de verschillende profielen bij een golfhoogtereductiefactor van 0.92. Een negatieve waarde geeft aan dat de resterende kleilaagdikte onvoldoende is. Deze resultaten zijn aangeleverd door Emma Sirks van Witteveen+Bos.

Profiel	Kilometrering profiel	Kleilaagdikte [m]	representatieve waarde kleilaagdikte, 95% waarde c_e	
			Resultaat [m]	
63dp266	26.6	1.3	-0.17	
63dp267	26.7	1.3	-0.15	
63dp269	26.9	1.3	-0.11	
63dp271	27.1	1.3	-0.28	
63dp273	27.3	1.3	-0.24	
63dp275	27.5	1.3	-0.18	
63dp278	27.8	1.3	-0.23	
63dp280	28.0	1.5	-0.10	
63dp282	28.2	1.5	-0.17	
64dp285	28.5	1.5	-0.11	
64dp287	28.7	1.5	-0.11	
64dp290	29.0	1.5	-0.13	
64dp294	29.4	1.5	-0.16	
64dp297	29.7	1.5	-0.10	
64dp302	30.2	1.5	-0.06	
64dp304	30.4	1.5	-0.03	
64dp307	30.7	1.5	-0.06	
64dp309	30.9	1.5	-0.17	
64dp314	31.4	1.5	-0.22	
64dp319	31.9	1.5	-0.32	
64dp322	32.2	1.5	-0.37	
64dp324	32.4	1.5	-0.23	
64dp327	32.7	1.5	-0.15	
64dp329	32.9	1.5	-0.16	
64dp332	33.2	1.5	-0.26	
64dp334	33.4	1.5	-0.37	
64dp337	33.7	1.5	-0.25	
64dp339	33.9	1.5	-0.19	
64dp342	34.2	1.5	-0.19	
64dp344	34.4	1.5	0.04	
64dp347	34.7	1.5	0.04	
64dp349	34.9	1.5	-0.07	
64dp352	35.2	1.5	-0.15	

64dp354	35.4	1.5	-0.01
64dp357	35.7	1.5	0.14
64dp359	35.9	1.5	-0.03
64dp361	36.1	1.5	0.10
64dp363	36.3	1.5	-0.07
64dp365	36.5	1.5	0.08
64dp367	36.7	1.5	-0.08
64dp369	36.9	1.5	-0.05
64dp373	37.3	1.5	0.05
64dp379	37.9	1.5	-0.01
min			-0.37
max			0.14
gem			-0.12