



hoogheemraadschap  
Hollands  
Noorderkwartier

## **Prins Hendrikzanddijk**

Morfologische studie

**Auteur**

Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.

**Corsa nummer**

PM

**Registratienummer**

EDM70-19-140/16-014.609

**Datum**

1 september 2016

**Versie**

03

**Status**

definitief

**Afdeling**

Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Bevelandseweg 1  
Postbus 250  
1700 AG Heerhugowaard



## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>4</b>
1.1	Aanleiding	4
1.2	Sectie 9: Zeedijk Prins Hendrikpolder	4
1.3	Toekomstige situatie: de Prins Hendrikzanddijk	5
1.4	Doel van de studie	7
1.5	Context voorliggende rapportage	7
1.6	Leeswijzer	8
<b>2</b>	<b>Geometrie en lay-out Prins Hendrikzanddijk</b>	<b>9</b>
2.1	Plangebied	9
2.2	Uitgangspunten geometrie en lay-out	10
2.3	Waterstanden	10
2.4	Abiotische eisen habitattypen en leefgebieden	10
2.4.1	Waddenhabitats	13
2.4.2	Duinhabitats	14
2.5	Technische uitgangspunten	14
2.5.1	Locatie vereiste habitatarealen	16
<b>3</b>	<b>Aanpak modelonderzoek</b>	<b>18</b>
3.1	Introductie	18
3.2	Berekeningen morfologie veiligheidsduin inclusief natuurbouw	18
<b>4</b>	<b>modelopzet</b>	<b>20</b>
4.1	Introductie	20
4.2	Beoogde resultaten modelstudie	21
4.3	Uitgangspunten/aannames	21
4.4	Modelgrid	21
4.5	Bodem	23
4.6	Rekenteknik en instellingen Xbeach model	24
4.7	Randvoorwaarden	25
4.7.1	Waterstanden	25
4.7.2	Golven	26
4.7.3	Morfologisch klimaat voor dagelijkse condities	26
4.7.4	Stormen	28
4.8	Kalibratie/verificatie model [Ref. 11]	31
<b>5</b>	<b>Modelresultaten</b>	<b>32</b>
5.1	Introductie	32
5.1.1	Definitie kustdwarse raaien	32
5.2	Morfologisch gedrag en stabiliteit ontwerp lange termijn	33
5.2.1	Sedimenttransport	33
5.2.2	Morfologische ontwikkeling gebied onder dagelijkse condities	35
5.2.3	Morfologische ontwikkeling gebied onder stormcondities	37
5.2.4	Lange termijn ontwikkeling en stabiliteit (2-5 jaar)	39
	Ontwikkeling Prins Hendrikzanddijk na 5 jaar	40
	Zandverliezen uit het gebied	42
	Aangroei strandhaak	44
5.3	Gevoeligheidsanalyse	46
5.4	Conclusies modelberekeningen	46



5.5	Aanbevelingen	47
<b>6</b>	<b>Ontwikkeling natuurgedeelte en habitatarealen</b>	<b>48</b>
6.1	Arealen en volumes per habitat	48
6.2	Beoordeling ecologische aspecten	52
<b>7</b>	<b>Onderhoudsbehoefte strandhaak</b>	<b>53</b>
7.1	Onderhoud kustveiligheid	53
7.2	Onderhoud slijtlaag en strandhaak	54
7.3	Totale onderhoudsbehoefte	55
7.4	Bandbreedte	56
<b>8</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>57</b>
8.1	Conclusies	57
8.1.1	Morfologisch gedrag en stabiliteit	57
8.1.2	Ontwikkeling natuurbouw	57
8.1.3	Onderhoudsbehoefte	58
8.1.4	Berekeningen maatgevende omstandigheden	59
8.2	Aanbevelingen	59
8.2.1	Onderhoudsstrategie	59
8.2.2	Modelberekeningen	59
<b>9</b>	<b>Referenties</b>	<b>61</b>
	<b>Bijlage I XBEACH Modelopzet</b>	<b>62</b>
	<b>Bijlage II Bepaling randvoorwaarden voor Xbeach met Delft3D pace</b>	<b>63</b>
	<b>Bijlage III Bepaling morfologisch golfklimaat en stormen met SWAN</b>	<b>64</b>
	<b>Bijlage IV Ontwikkeling arealen habitattypen</b>	<b>65</b>
	<b>Bijlage V Review rapport PHZD Morfologische studie M. Boers, Deltares</b>	<b>66</b>
	<b>Bijlage VI Bevindingen morfologische studie Prins Hendrik Zanddijk - J.A. Roelvink, Unesco-IHE</b>	<b>67</b>
	<b>Bijlage VII Berekeningen maatgevende condities</b>	<b>68</b>



## **1 Inleiding**

### **1.1 Aanleiding**

Primaire waterkeringen in Nederland moeten voldoen aan de eisen die in de Waterwet zijn vastgelegd. De veiligheid van een waterkering moet onder meer voldoen aan het voorgeschreven veiligheidsniveau. Voor dijkkringgebied 5, waartoe de Waddenzeedijk Texel behoort, is de normfrequentie 1/4.000 per jaar. Dat betekent dat de waterkering bestand moet zijn tegen hydraulische belastingen (hoogwaterstanden en golfslag) die een overschrijdingskans hebben van 1/4.000 per jaar. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier is verantwoordelijk voor het beheer van de Waddenzeedijk Texel. In de tweede toetsronde, gerapporteerd in 2006, bleek dat de Waddenzeedijk Texel op verschillende faalmechanismen niet aan de norm voldoet. Dit betekent niet dat momenteel een grote kans bestaat dat een dijkdoorbraak kan plaatsvinden. Maar om nu en in de toekomst te voldoen aan de wettelijke eisen is een versterking van de waterkering noodzakelijk.

Uit technische verkenningen is gebleken dat een versterking van de Prins Hendrikdijk op traditionele wijze, volgens de geldende normen en ontwerpmethodieken, een zeer fors gedimensioneerde binnenberm noodzakelijk zou maken. Dit zou ten koste gaan van de binnendijks aanwezige landbouwgrond, bebouwing en natuur. Vanuit de omgeving is dan ook een alternatief voorgedragen dat voorziet in een buitendijks gelegen versterking, te weten de Prins Hendrikzanddijk. De Prins Hendrikzanddijk is daarmee een integrale oplossing die de doelstelling voor hoogwaterveiligheid combineert met natuurontwikkeling. Zodoende worden de natuurwaarden in het gebied substantieel vergroot. Hiermee wordt invulling gegeven aan één van de kernopgaven van het Natura 2000-gebied Waddenzee. Een dergelijke oplossing past ook binnen de strategie van het Deltaprogramma.

### **1.2 Sectie 9: Zeedijk Prins Hendrikpolder**

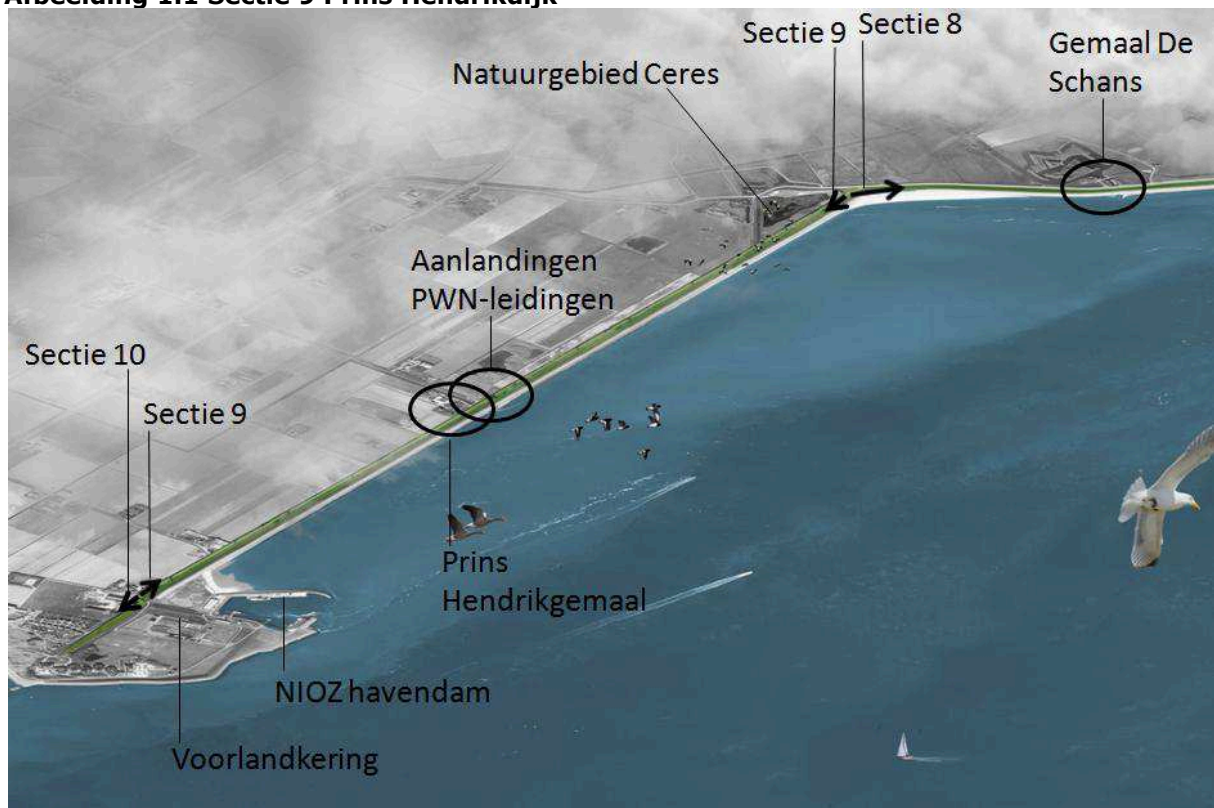
De Waddenzeedijk heeft een totale lengte van circa 24 kilometer en bestaat uit meerdere secties. Sectie 9 betreft de Prins Hendrikdijk en ligt op het zuidelijk deel van het eiland ten noorden van de NIOZ-haven. De primaire waterkering van sectie 9, de Prins Hendrikdijk, is een 3,2 kilometer lange waterkering aan de zuidoostkant van Texel direct ten noorden van 't Horntje. In het noorden van het de bestaande dijk wordt aangesloten bij sectie 8 waar binnendijks het beschermde natuurmonument Ceres ligt. Ceres is een klein poldertje tussen de Prins Hendrikpolder en het oude land van Texel. Verder zijn binnendijks vooral landbouwgronden gelegen. In het zuiden van de bestaande dijk wordt aangesloten bij sectie 10 waar de NIOZ-polder met voorlandkering en NIOZ-haven met havendam zijn gelegen.

Direct ten oosten van Texel loopt in de Waddenzee de Texelstroom. De Texelstroom vormt de belangrijkste watervoerende geul van het zeegat van Texel (Marsdiep). Ter plaatse van Sectie 9 ligt de geul op een afstand van meer dan 400 meter van de waterkering. Om te voorkomen dat de diepe geul van de Texelstroom dicht bij de kust komt is deze vastgelegd middels een geulwandbestorting. Tussen de waterkering en de geulwandbestorting ligt een ondiep plateau met een diepte van circa NAP - 1 meter en dat een oppervlakte van circa 200 hectare beslaat.





**Afbeelding 1.1 Sectie 9 Prins Hendrikdijk**



### 1.3 Toekomstige situatie: de Prins Hendrikzanddijk

Het plangebied van sectie 9 maakt voor het grootste deel onderdeel uit van het Natura 2000-gebied Waddenzee. Het plan voorziet in de aanleg van een veiligheidsduin, een strandhaak met schelpenrijk strand en laag dynamische lagunes (luwe zones). Deze zones worden afgeschermd door de strandhaak en de NIOZ havendam.

Het veiligheidsduin is een duingebied dat tevens de kern van de nieuwe zandige zeewering vormt. Het veiligheidsduin komt direct zeewaarts van de bestaande Prins Hendrikdijk te liggen. Het veiligheidsduin sluit in het noorden aan op de versterkte waterkering van sectie 8 en in het zuiden wordt aangesloten op de voorlandkering, die weer aansluit op de versterkte waterkering van sectie 10. Hierdoor wordt het veiligheidsduin een doorlopende en op zichzelf functionerende zandige waterkering tussen sectie 8 en 10 ingepast.

In sectie 9 worden de natuurwaarden vergroot door transformatie van de huidige habitattypen (natuurwaarden) naar andere, op deze locatie hoogwaardigere, habitattypen en leefgebieden van soorten waarvoor een behoud- of uitbreidingsdoelstelling geldt en het vormen van een meer natuurlijke gradiënt van water naar land. De hogere natuurwaarden en de natuurlijke gradiënt worden gecreëerd met droogvallende platen, slikken, schorren, stranden en jonge duinen die op een logische manier op elkaar aansluiten en in elkaar grijpen. Dit leidt tot hoogwaardigere natuur binnen het plangebied en levert een impuls aan de natuurwaarden in de Waddenzee.



Daarnaast draagt de Prins Hendrikzanddijk bij aan de ontstening van de Waddenzeekust door de aanleg van een zachte overgang van eiland naar zee.

In het plangebied zijn meerdere leidingen aanwezig, waaronder twee waterleidingen van drinkwaterbedrijf PWN. Bij de realisatie van de Prins Hendrikzanddijk blijven de kabels en leidingen gehandhaafd. De uitstroomleidingen van het Prins Hendrikgemaal worden verlengd. Het gemaal De Schans wordt verplaatst en vervangen binnen de werkzaamheden van sectie 1 t/m 8 en 10. Het gemaal De Schans mondt uit in de natuurzone. De Prins Hendrikzanddijk wordt als doorlopende waterkering tussen sectie 8 en 10 ingepast. Het veiligheidsduin sluit in het noorden aan op de versterkte waterkering van sectie 8 en in het zuiden wordt aangesloten op sectie 10.

Onderstaande visualisatie van de Prins Hendrikzanddijk geeft de toekomstige situatie weer.

**Afbeelding 1.2 Toekomstige situatie Prins Hendrikzanddijk**



### **Transformatie natuurwaarden Prins Hendrikzanddijk**

Om tot een concrete invulling te komen van de beoogde natuurontwikkeling bij de Prins Hendrikzanddijk zijn minimale arealen voor habitattypen en leefgebieden van soorten vastgesteld.

De binnen het plangebied te ontwikkelen minimum- en maximumarealen van relevante habitats en leefgebieden van soorten zijn in onderstaande tabel samengevat. De tabel geeft in de eerste kolom de relevante habitats. In de tweede en derde kolom wordt per habitat inzicht gegeven in het minimale en het maximaal te ontwikkelen oppervlak binnen het plangebied en daarmee de onderlinge verdeling van oppervlak binnen het totale plangebied. In de derde kolom is de



ontwikkeltijd aangegeven. In alle gevallen dient een totaal aantal van 208 ha aan habitattypen en leefgebied gerealiseerd te worden.

**Tabel 1.1 Te ontwikkelen habitattypen en leefgebieden**

<b>habitats/leefgebied</b>	<b>minimale oppervlakte</b>	<b>maximale oppervlakte</b>	<b>ontwikkel tijd</b>
totaal te realiseren habitattypen/leefgebieden	208 ha	208 ha	
H1110A Permanent overstroomde zandbanken getijdengebied	45 ha	geen max.	0-1 jr
H1140A Slik- en zandplaten getijdengebied	50 ha	geen max.	0-1 jr
H1310A Zilte pionierbegroeiingen zeekraal	1 ha	5 ha	0-5 jr
H1320 Slijkgrasvelden	0 ha	5 ha	2-5 jr
H1330A Schorren en zilte graslanden buitendijks	20 ha	geen max.	10-15 jr
H2120 Witte duinen	0 ha	40 ha*	3-5 jr
H2130A Grijze duinen kalkrijk	0 ha	40 ha*	10-15 jr
H2160 Duindoornstruwelen	0 ha	5 ha	5-10 jr
Schelpenrijk zand/strand/strandhaak	10 ha	40 ha	0-1 jr

\* Gezamenlijk oppervlak H2120 Witte duinen en H2130A Grijze duinen kalkrijk bedraagt maximaal 40 ha

#### 1.4 Doel van de studie

Om de kwaliteit en kosten van het plan te kunnen beoordelen dient er voldoende inzicht te bestaan in de morfologische ontwikkeling en duurzame instandhouding van de natuurbouw, de interactie tussen natuurbouw en het zandige profiel, en het benodigde onderhoud van de zanddijk en natuurbouw.

Het doel van de studie is het uitvoeren van een morfologische (model-)studie, rekening houdend met de uitgangspunten vanuit ecologie, waardoor:

1. beter inzicht wordt verkregen in het morfologisch gedrag en de stabiliteit van het ontwerp op de lange termijn;
2. beter inzicht ontstaat in de ontwikkeling van het natuurgedeelte en de daarbij beoogde habitattypen;
3. een inschatting kan worden gemaakt van de benodigde onderhoudsinspanning voor het in stand houden van de slijtlaag, de natuurbouw en de gewenste habitats.

In aanvulling op bovenstaande zijn erosieberekeningen uitgevoerd voor maatgevende ontwerpcondities (1/4.000 jaar storm). Deze berekeningen zijn gepresenteerd in Bijlage VII.

#### 1.5 Context voorliggende rapportage

Tijdens een workshop 'Ecologische meerwaarde zandige variant versterking Prins Hendrikdijk', een expertsessie met ecologen en vertegenwoordigers van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, de gemeente Texel en de provincie Noord-Holland, in januari 2011, is het eerste schetsontwerp gemaakt voor de Prins Hendrikzanddijk. Het eerste schetsontwerp is vervolgens uitgewerkt in een technisch ontwerp [ref. 1] en steeds verder ontwikkeld op basis van onder meer morfologische modelberekeningen [ref. 2] en [ref. 10].



De morfologische modelberekeningen in de voorliggende studie zijn op exact de zelfde wijze uitgevoerd als de eerder uitgevoerde modelberekeningen in [ref. 10]. In [ref. 10] is de onderbouwing voor de modelaanpak gegeven en is de gevoeligheid voor een aantal parameters vastgesteld.

De voorliggende studie presenteert de morfologische modelberekeningen voor de Prins Hendrikzanddijk. Deze berekening zijn eind 2015 uitgevoerd en zijn gebaseerd op de toentertijd aanwezig kennis en informatie. Na het uitvoeren van deze modelstudie zijn diverse onderdelen van de Prins Hendrikzanddijk nader vormgegeven, waardoor de uiteindelijke Prins Hendrikzanddijk enigszins afwijkt van de input voor de voorliggende studie.

De modelstudie en modelaanpak zijn getoetst door de volgende deskundigen:

- prof.dr.ir. J.A. Roelvink (Unesco IHE);
- dr. M. Boers (Deltares);
- dr. ir. R. McCall (Deltares);
- ir. M. Jansen (Witteveen+Bos);
- ir. S. Boer (HHNK).

## 1.6 Leeswijzer

De geometrie en lay-out van de Prins Hendrikzanddijk wordt beschreven in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 wordt beschreven hoe de vragen die aanleiding zijn voor deze modelstudie beantwoord gaan worden. De modelopzet volgt in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt de morfologie en de stabiliteit van het ontwerp besproken op basis van de modelresultaten. In hoofdstuk 6 en 7 wordt ingegaan op de ontwikkeling van het natuurgedeelte en de onderhoudsbehoefte van het ontwerp. De hoofdconclusies en aanbevelingen van het onderzoek zijn beschreven in hoofdstuk 8.



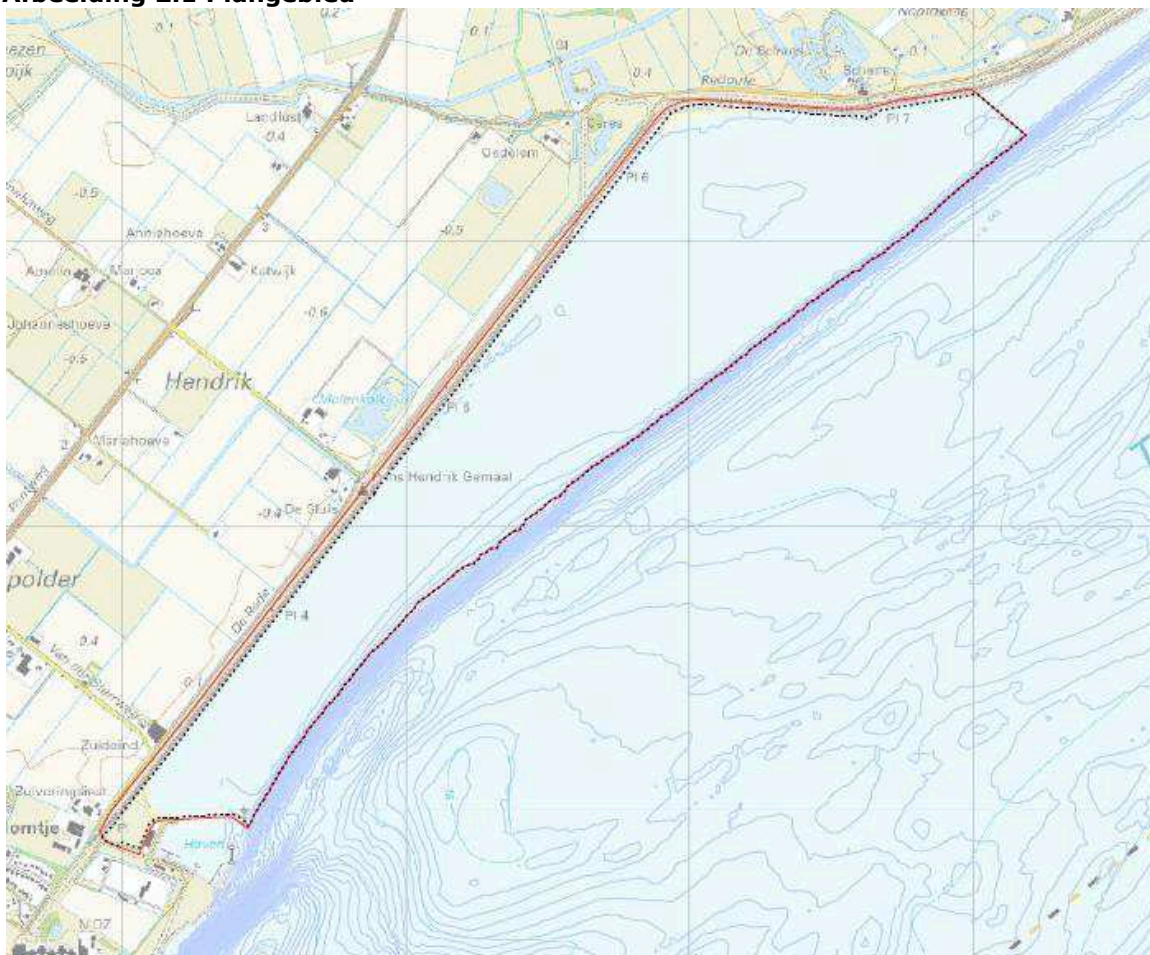
## 2 Geometrie en lay-out Prins Hendrikzanddijk

Het voorliggende hoofdstuk geeft de randvoorwaarden en uitgangspunten van de Prins Hendrikzanddijk weer, die als input dienen voor deze modelstudie.

### 2.1 Plangebied

Afbeelding 2.1 geeft het plangebied van de Prins Hendrikzanddijk weer. Het plangebied is de ruimtelijke afbakening van het systeem waarbinnen het ontwerp dient te vallen.

**Afbeelding 2.1 Plangebied**







## 2.2 Uitgangspunten geometrie en lay-out

Het benodigde volume zand bestaat uit een basisvolume en een slijtlaag. Het basisvolume is het benodigde volume zand dat in het veiligheidsduin aanwezig moet zijn op het moment van de maatgevende extreme omstandigheden. Een slijtlaag wordt aangebracht ter compensatie van de verwachte zandverliezen teneinde het veiligheidsduin duurzaam in stand te kunnen houden.

Voor de input van deze studie is voor het veiligheidsduin de vorm en het volume zoals bepaald in de eerdere studie [ref. 1.] gehanteerd. De vorm van het veiligheidsduin is in deze als volgt:

- kruinhoogte veiligheidsduin van NAP +8,0 m;
- een helling van 1:3 tussen NAP +8,0 m en NAP +3,0 m;
- helling van 1:20 tussen NAP +0,0 m en NAP +3,0 m;
- helling van 1:50 onder NAP +0,0 m tot het aanlegprofiel aansluit op de huidige bodem.

In de voorliggende studie is de afstand tussen de buitenkruinlijn van het veiligheidsduin en de buitenzijde van de berm van de bestaande dijk circa 45 meter. Deze afstand is voldoende om een veiligheidsduin met voldoende volume te realiseren waarbij tevens ruimte is voor eventuele wijzigingen in de hydraulische randvoorwaarden (ten gevolge van de nieuwe normering) dan wel de mogelijkheid om het veiligheidsduin verder richting de bestaande dijk te schuiven. Het effect van de ligging van het veiligheidsduin ten opzichte van de bestaande dijk is zeer gering ten aanzien van morfologische effecten. Het ontwerp en profiel schuiven immers mee met de ligging van het veiligheidsduin.

De slijtlaag wordt aangebracht per definitie in (een deel van) de actieve morfologische zone (NAP - 2,0 m tot NAP +3,0 m). Het talud van de slijtlaag kan gelijk worden genomen aan dat van het basisvolume. Vanuit dat talud zal zich in enkele jaren een dynamisch evenwicht instellen.

## 2.3 Waterstanden

Tabel 2.1 geeft enkele karakteristieke waterstanden van het station Oudeschild. Deze waterstanden worden gehanteerd in dit rapport ten aanzien van de areaalhoogte voor habitats.

**Tabel 2.1 Waterstanden Oude Schild ([ref. 6.]**

<b>frequentie</b>	<b>waterstand (NAP+m)</b>
1/10 jaar hoog water	+2,95
1/2 jaar hoog water	+2,4
1/1jaar hoog water	+2,25
gemiddeld hoog water	+0,63
gemiddelde waterstand	+0,03
LAT (Lowest Astronomical Tide)	-1,17

## 2.4 Abiotische eisen habitattypen en leefgebieden

De belangrijkste abiotische factoren die bepalend zijn voor de natuurontwikkeling zijn:

- hoogteligging en daarmee de invloed van verticaal getij;
- sedimentsamenstelling;
- dynamiek;
- arealen en ontwikkeltijd;
- gevoeligheid voor onderhoud.



### **Hoogteligging/invloed verticaal getij**

Voor Waddenhabitats is hoogteligging in belangrijke mate bepalend vanwege de invloed van het getij (en daarmee van zout). De hoogte-eisen worden uitgedrukt ten opzichte van de voor deze locatie geldende waterstanden. Deze worden, afhankelijk van het habitatype, op verschillende manieren uitgedrukt, zoals L.A.T. (Lowest Astronomical Tide), of GHW (Gemiddeld Hoog Water). Deze verschillen uiteraard van plek tot plek. Voor kwelders is ook de hellingshoek van belang. Voor duinhabitats is hoogteligging slechts beperkt van belang omdat vochtgebonden typen niet tot de doelstellingen behoren.

### **Sedimentsamenstelling**

Sedimentsamenstelling is voor alle habitats/leefgebieden van belang. In alle gevallen bestaat de bodem overwegend uit zand, dat qua minerale samenstelling, korrelgrootteverdeling, hoekigheid e.d. zo goed mogelijk dient aan te aansluiten bij het zand in de Waddenzee. Daarnaast zijn voor duinhabitats vooral slib- en kalkgehalte bepalend. Voor de Waddenhabitats zijn vooral de (globale) korrelgrootteverdeling en het slibgehalte van belang. Daarnaast is voor kustbroedvogels aanwezigheid van schelpen(gruis) ter plaatse van broedbiotopen medebepalend.

### **Dynamiek**

De mate van 'dynamiek' is een belangrijke factor die mede bepalend is voor het verschil tussen Waddenhabitats en duinhabitats. Vooral de mate van blootstelling aan golfaanval is hierbij onderscheidend, maar ook stroming kan van belang zijn. Gemakkelijk operationaliseerbare parameters en grenswaarden zijn niet aanwezig, waardoor voor de beoordeling van deze factor gebruik moet worden gemaakt van vergelijkbare situaties in combinatie met expert judgement.

### **Arealen en ontwikkeltijden**

Voor goed functioneren zijn ook areaaleisen en ontwikkeltijden relevant. De ontwikkeltijd is de tijd die het duurt totdat een bepaald habitatype zich volwaardig heeft gevestigd vanaf het eerste stadium van ontwikkeling. Het gaat hierbij om de vestiging en verdere ontwikkeling (successie) van vegetaties. Gedurende de ontwikkeltijd dient de bodemligging voldoende stabiel te zijn. Als tussentijds sprake is van substantiële erosie of sedimentatie wordt de ontwikkeling 'teruggezet' naar het beginstadium.

### **Gevoeligheid voor onderhoud**

De gevoeligheid voor onderhoud wordt bepaald door de snelheid waarmee de natuurwaarden van een habitatype of type leefgebied zich na aantasting herstellen. Aangezien bij kustonderhoud in het algemeen de oorspronkelijke bodem/bodemhoogte wordt hersteld door nieuw zand aan te brengen is deze in de meeste gevallen vergelijkbaar met de ontwikkelduur na aanleg. De gevoeligheid van vegetatietypen die zich pas na verloop van een aantal jaren (10-15 jaar) ontwikkelen is daarom groot; bij vegetaties die zich sneller ontwikkelen is deze gering (bijv. helmvegetaties) tot vrij groot. In intergetijdengebied en sublitoraal is de hersteltijd van bodemleven bepalend. In de meeste gevallen is de hersteltijd 3-5 jaar en de gevoeligheid daarom 'matig'; schelpdierbanken vergen een langere ontwikkel/hersteltijd waardoor de gevoeligheid 'vrij groot' is.

Tabel 2.2 geeft een overzicht van de abiotische randvoorwaarden zoals deze in deze studie voor de diverse habitats en leefgebieden zijn gehanteerd. In navolgende paragrafen worden deze kort toegelicht.



**Tabel 2.2 Minimum en maximum arealen en abiotische voorwaarden**

habitats/leefgebied	min	max	termijn	hoogte- ligging	hoogte- ligging [m+NAP]	dynamiek	gevoelig voor onder- houd
H1110A Permanent overstroomde zandbanken getijdengeb.	45 ha	geen max.	0-1 jr	<LAT	<-1,1		matig
H1140A Slik- en zandplaten getijdengebied	50 ha	geen max.	0-1 jr	LAT - GHW	-1,1 tot +0,6	laag dynamisch, zodat slib kan bezinken	matig
H1310A Zilte pionierbegroeiingen zeekraal	1 ha	5 ha	0-5 jr	GHW-0,2 tot 1/1 jaar HW, helling 1:100 tot 1:500	+0,4 tot +2,2	laag dynamisch, afscherming benodigd	matig
H1320 Slijkgrasvelden	0 ha	5 ha	2-5 jr	GHW-0,2 tot 1/1 jaar HW, helling 1:100 tot 1:500	+0,4 tot +2,2	laag dynamisch, afscherming benodigd	vrij groot
H1330A Schorren en zilte graslandenbuitendijks	20 ha	geen max.	10-15 jr	GHW tot 1/1 jaar HW	+0,6 tot +2,2	laag dynamisch, afscherming benodigd	groot
H2120 Witte duinen	0 ha	15 ha	3-5 jr	1/1 jr HW tot 1/1 jr HW +1m	+2,2 tot 3,2	exposure wind/zee/zan d noodzakelijk	gering
H2120 Grijs duinen kalkrijk	20 ha	30 ha	10-15 jr	1-2 m boven 1/1 jr HW	> +3,2	geen erosie door laag frequent hoog water	groot
H2160 Duindoornstruwelen	0 ha	5 ha	5-10 jr	1-2 m boven 1/1 jr HW	> +3,2	geen erosie door laag frequent hoog water	vrij groot
Schelpenrijk zand/strand	5 ha	30 ha	0-1 jr	> 1/1 jr HW of > GHW1	> +2,2 of > +0,6	relatief groot	gering
totaal habitattypen/leefgebiede n	200 ha	200 ha					

1) Aan de Texel stroomzijde van de strandhaak of duin ligt de grens op GHW. Tussen de strandhaak en het duin ligt de grens op 1/1 jr HW)





## **2.4.1 Waddenhabitats**

### **Algemeen**

Enkele kenmerken van de Waddenzee zijn weliswaar wezenlijk voor de betreffende habitats maar voor de Prins Hendrikzanddijk triviaal: aanwezigheid van getij (met een voor de Waddenzee normale getijslag) en van zout water. Deze factoren blijven hier verder buiten beschouwing.

### **H1110A Permanent overstromde zandbanken getijdengebied**

- naast bovengenoemde triviale kenmerken wordt het habitatype gedefinieerd door de hoogteligging. De bovengrens van H1110A (waar H1140A begint) is het Lowest Astronomical Tide (LAT);
- de sedimentsamenstelling van de bodem is niet kritisch mits deze 'zacht' is.

### **H1140A Slik- en zandplaten getijdengebied**

- eveneens primair gedefinieerd door hoogteligging: tussen LAT en GHW; als er kweldervegetaties <GHW aanwezig zijn vormen deze de bovengrens (maar dat is in het kader van de morfologische modellering minder relevant). De voor vogels optimale droogvalduur ligt tussen 25 en 60 %;
- sedimentsamenstelling: zandig (geen specifieke eisen aan korrelgrootte) met een slibgehalte tussen 2 en 20 %. Sedimentatiesnelheid (opslibbing) < 4 cm per jaar;
- dynamiek: geen grote 'dynamiek' door golven of getijstromen, zodat enig slib kan bezinken en vestiging van schelpdierbanken mogelijk is. Dat is op deze locatie niet kritisch;
- aanwezigheid zoet-zoutgradiënt: dit betekent alleen dat de opening van het gemaal (en van 'een' lagune naar de open Waddenzee) niet mag verzanden.

Dit habitat kan zich naar verwachting zowel aan de binnenzijde van het eiland als aan de buitenzijde van het eiland en de landtong ontwikkelen.

### **H1310A Zilte pionierbegroeiingen zeekraal**

- hoogteligging tussen GHW-0,2 m en hoogte maximale jaarlijkse hoogwaters. Hellingshoek tussen 1:100 en 1:500;
- sedimentsamenstelling: zandig (geen specifieke eisen aan korrelgrootte) met een slibgehalte tussen 2 en 20 %;
- dynamiek: een beperkte dynamiek is een voorwaarde voor de vestiging van zeekraalplanten op het kale slik. Op deze locatie is naar verwachting een of andere vorm van afscherming tegen golfaanval vanaf de Waddenzee en stroming van de Texelstroom noodzakelijk.

### **H1320 Slijkgrasvelden**

- eisen als H1310A. Bepalend verschil tussen vestiging van H1310A en H1320 niet geheel duidelijk. Mogelijk is H1320 beter bestand tegen iets meer dynamiek.

### **H1330A Schorren en zilte graslanden buitendijks**

- hoogteligging tussen GHW en hoogte maximale jaarlijkse hoogwaters;
- overigens als H1310A en H1320 waaruit het type zich door natuurlijke vegetatie-ontwikkeling (successie) in combinatie met opslibbing ontwikkelt.

### **Schelpenrijk zand/strand inclusief H2110 Embryonale duinen**

- hoogteligging > GHW of maximale jaarlijkse hoogwaters;



**Pagina**

14 van 69

**Datum**

1 september 2016

- sedimentsamenstelling: zandig, laag slibgehalte (< 2 %). Schelpenrijke ondergrond voor kustbroedvogels zal in principe kunstmatig moeten worden aangebracht (en regelmatig worden vernieuwd). Dit is voor de morfologische modellering weinig/niet relevant;
- dynamiek: relatief groot.

#### **Schelpenrijk zand kustbroedvogels**

- hoogteligging: > GHW aan de zeezijde en > maximale jaarlijkse hoogwaters aan de lagunezijde (aansluitend op H1330A). Voor optimaal broedbiotoop dient zone > maximale jaarlijkse hoogwaters zo groot mogelijk te zijn en de zone tussen GHW en jaarlijkse hoogwaters niet groter dan nodig;
- kenmerken overigens als voorgaande.

#### **2.4.2 Duinhabitats**

##### **Algemeen**

Voor de duinhabitats geldt (in dit geval) als uitgangspunt dat verstuingen niet gewenst zijn. Dit betekent dat het zand relatief grof kan zijn. Voor alle duinhabitats geldt dat het slibgehalte van het sediment (zo) laag (mogelijk) moet zijn (<2 %). Het zand moet ten minste 2 % kalk bevatten.

##### **H2120 Witte duinen**

- hoogteligging > maximale jaarlijkse hoogwaters (tot 1 - 2 meter daarboven, nog nader te bepalen). Incidentele erosie door meer laag frequent hoog water geen probleem;
- dynamiek: expositie aan zee/wind/zand noodzakelijk.

##### **H2130A Grijs duinen kalkrijk**

- hoogteligging ruim (1 - 2 meter) boven maximale jaarlijkse hoogwaters. Geen incidentele erosie door laag frequent hoog water;
- dynamiek: beperkte expositie aan zee/wind/zand.

##### **H2160 Duindoornstruwelen**

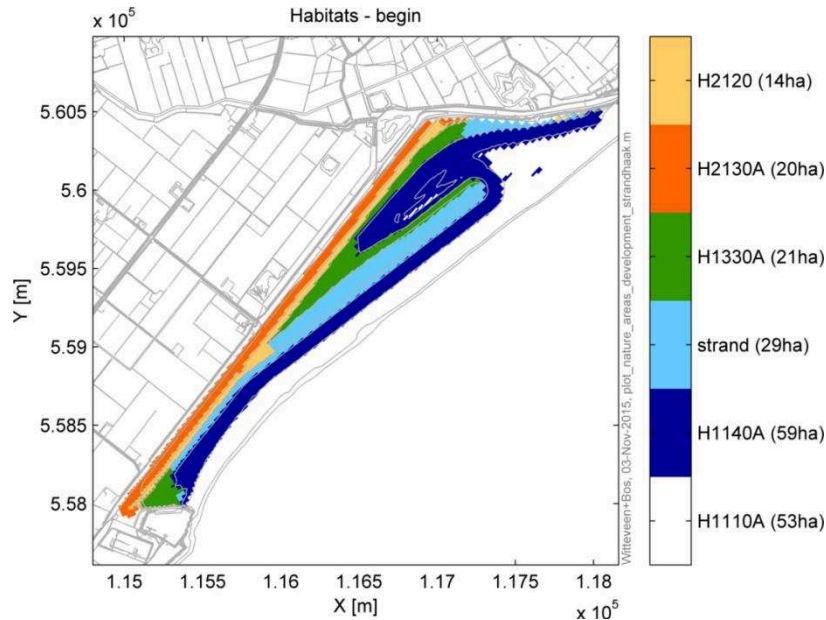
- als H2130A;
- overigens geen specifieke eisen. Het type ontwikkelt zich naar verwachting gemakkelijk op de zanddijk uit H2120 of H2130A.

## **2.5 Technische uitgangspunten**

Op basis van de benodigde arealen zoals gepresenteerd in tabel 2.2 en op basis van de aanbevelingen uit voorgaande model studie is een indicatieve plaatsing van de habitats opgesteld. Deze is weergegeven in onderstaande afbeelding.



### Afbeelding 2.2 Indicatieve plaatsing habitatarealen



De belangrijkste kenmerken die als input voor deze studie zijn meegenomen:

- een strandhaak in het midden van het plangebied met een lengte van ongeveer 1.850 m;
- zeewaartse ligging van de strandhaak dusdanig dat voldoende ruimte tussen de strandhaak en Texelstroom aanwezig is voor de vorming van een evenwichtsprofiel (aangenomen talud boven NAP +0 m van 1:20 en een talud van 1:50 onder NAP +0 m);
- het gebied tussen strandhaak en veiligheidsduin wordt verondiept, waardoor zich hier een relatief groot areaal kwelder en slik kan ontwikkelen;
- tussen de punt van de strandhaak en de aansluiting van de Prins Hendrikzanddijk op sectie 8 (Oostelijk van de Schans) blijft een brede opening naar de Waddenzee;
- voor de spuioening voor gemaal de Schans (zie afbeelding 2.2 voor de indicatieve ligging van het gemaal) is mogelijk een harde constructie benodigd. Deze is niet opgenomen in de morfologische berekeningen;
- in het plangebied wordt geen gebruik gemaakt van harde constructies;
- een slijtlaag is benodigd ter compensatie van de verwachte zandverliezen teneinde het zandlichaam duurzaam in stand te kunnen houden. Onderhoudssuppleties zijn derhalve in deze variant over een groot deel van de buitencontour noodzakelijk. Doordat de opening NO van de strandhaak zeer ruim is, vormt verzanding hier naar verwachting gedurende langere tijd geen probleem. Het zandtransport leidt waarschijnlijk tot geleidelijke uitgroei van de strandhaak;
- Het kruinniveau van de strandhaak ligt op NAP +3,0 m. Dit is voldoende om overwash te voorkomen.

Basisgedachte achter de Prins Hendrikzanddijk is dat deze goed past bij de natuurlijke kustmorfologie van de Waddeneilanden. Een soortgelijke situatie is immers reeds aanwezig bij De Volharding aan de noordoostkant van Texel, zie afbeelding 2.3. De luchtfoto van De Volharding met rechts Polder Wassenaar en iets links van het midden het gemaal bij De Cocksdorp. Aan de zeekant stroomt hier de grote getijdengeul Robbengat richting het zeegat tussen Texel en Vlieland. De situatie is wat dat betreft verwant aan die bij de Prins Hendrikzanddijk, behalve dat het Robbengat



hier juist zorgt voor een zuidwest gericht zandtransport, het Robbengat minder groot is dan de Texelstroom en de zandbeschikbaarheid hier (blijkbaar) groter is.

Direct ten noorden van strandhaak (hier dus rechts), zeewaarts van Polder Wassenaar lag vroeger het kleine poldertje De Volharding, dat in 1936 door afslag verdween.

### **Afbeelding 2.3 Luchtfoto De Volharding**



#### **2.5.1 Locatie vereiste habitatarealen**

De belangrijkste (grootste oppervlakten) habitatarealen uit tabel 2.2 zijn ingepast in het plangebied, zie afbeelding 2.2. De habitats zijn gerelateerd aan de hoogteligging en de dynamiek. De vereiste hoogteligging en dynamiek zijn in tabel 2.2 per habitat gegeven. Hieronder zijn per habitattypen de gehanteerde uitgangspunten geformuleerd.

##### **H2130A Grijs duinen kalkrijk/ H2120 witte duinen.**

Deze duintypen zijn gelegen in het veiligheidsduin, als ondergrens is een hoogte van NAP + 2,3 (GHW) gehanteerd. Eis voor de H2130A is dat er geen erosie is. Eis voor H2120 (witte duinen) is dat juist wel erosie is. Het hoogteniveau van de grens tussen H2130A en H2120 varieert daardoor langs de Prins Hendrikzanddijk.

##### **H1330A Schorren en zilte graslanden buitendijks**

Bij de inpassing is ervan uitgegaan dat dit habitat zich alleen ontwikkelt in duidelijk van golfinvloed afgeschermd gebied: achter een strandhaak en daarbij moet worden voldaan aan de hoogteligging. Daarnaast dient dit habitattypen geplaatst te worden in een gebied waar geen noodzakelijk onderhoud benodigd is. De dynamiek dient laag te zijn. Indien de dynamiek te groot is valt het areaal onder schelpenrijk zand/strand.

Uitgangspunt bij de positionering van dit habitat is dat de strandhaak voldoende erosiebestendig moeten zijn en dit habitat daarmee voldoende afschermen.

De modelstudie wijst uit of de dynamiek laag genoeg is en welke gebied onder habitat H1330A valt. H1330A sluit aan op:

- het veiligheidsduin met de grens op 1/jaar HW;
- het intergetijdengebied (H1140A) met de grens op GHW;



**Pagina**

17 van 69

**Datum**

1 september 2016

- het zand/strand (H2110) met als grens 1/1 jaar HW of een lager niveau als de dynamiek te hoog blijkt.

**Schelpenrijk zand/strand en strandhaak**

De buitenrand van het gebied dat wordt blootgesteld aan golven en stroming valt onder dit habitat. Zoals onder H1330A reeds aangegeven zijn habitat H2110 en H1330A uitwisselbaar en zal afhankelijk van de dynamiek de gebieden in en naast de erosieve gebieden onder H1330A danwel H2110 vallen. Dit habitat sluit aan op:

- het witte duin met de grens nu op 1/jaar HW. De modelstudie zal uitwijzen tot welk niveau het gebied dynamisch is en welk deel onder duin of stand valt;
- op H1330A schorren met als grens 1/jaar HW;
- op intergetijdengebied H1140A met als grens GHW.

**H1110 Permanent overstroomde gebieden**

Dit is het overblijvende gebied wat gelegen is onder LAT.



### 3 Aanpak modelonderzoek

#### 3.1 Introductie

Bij het onderzoek wordt gebruik gemaakt van het XBeach model. De berekeningen voor voorliggende rapportage zijn uitgevoerd met het model van de Prins Hendrikzanddijk dat eerder al is opgezet in het kader van de morfologische modelstudie uit 2015 [Ref. 10]. Daarvoor zijn gevoeligheidsberekeningen en tests voor modelinstellingen en randvoorwaarden uitgevoerd. Voor een beschrijving daarvan wordt verwezen naar de bijbehorende rapportage [Ref. 10].

Hieronder wordt kort de aanpak van het modelonderzoek toegelicht, zoals dat is uitgevoerd voor de voorliggende rapportage.

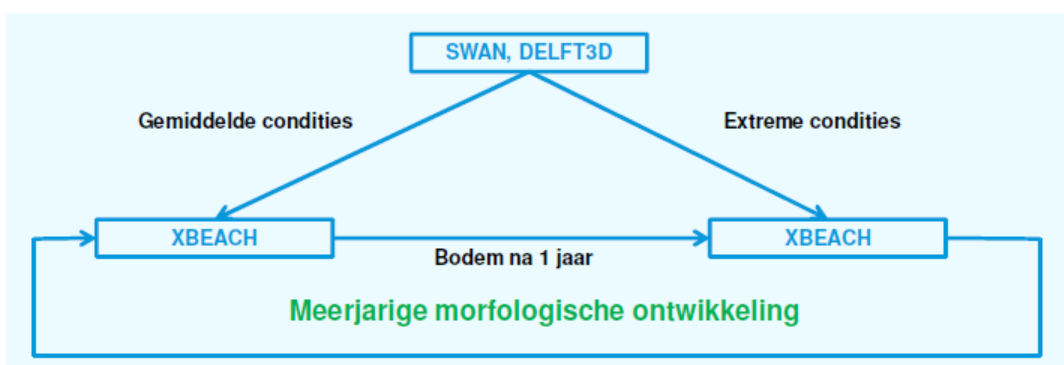
#### 3.2 Berekeningen morfologie veiligheidsduin inclusief natuurbouw

Met deze modelstudie wordt de ontwikkeling van de Prins Hendrikzanddijk onderzocht. Voor de Prins Hendrikzanddijk worden morfologische berekeningen voor een periode van 5 jaar uitgevoerd.

De berekeningen worden uitgevoerd als een zogenaamde 'modellentrein' van XBeach modellen (afbeelding 3.1). De morfologie onder dagelijkse condities en stormen wordt in aparte simulaties doorgerekend, omdat in die gevallen andere processen belangrijk zijn. De randvoorwaarden voor alle simulaties volgen uit Delft3D en SWAN.

In de modellentrein wordt voor elk jaar eerst de morfologie op basis van jaarrond condities berekend en vervolgens in een aparte berekening de morfologie tijdens een aantal stormen. De resulterende bodem na elke simulatie dient als invoer voor de volgende simulatie, zodat uiteindelijk de totale ontwikkeling van de bodem na 5 jaar resulteert. Door extrapolatie kan dan de ontwikkeling voor 10 jaar worden voorspeld.

**Afbeelding 3.1 Opzet Xbeach berekening meerjarige morfologische ontwikkeling**





**Pagina**

19 van 69

**Datum**

1 september 2016

De uitkomsten van deze berekeningen zijn gerelateerd aan de doelstellingen uit de inleiding:

1. morfologisch gedrag en stabiliteit ontwerp lange termijn:
  - sedimenttransport;
  - morfologische ontwikkeling plangebied;
  - zandverliezen uit het plangebied;
  - ontwikkeling doorstroomopening strandhaak;
2. ontwikkeling natuurgedeelte en habitattypen:
  - ontwikkeling habitatarealen/-volumes;
3. benodigde onderhoudsinspanning:
  - zandverliezen uit het plangebied;
  - aangroei strandhaak;
  - volumes erosie en sedimentatie binnen plangebied.



## 4 modelopzet

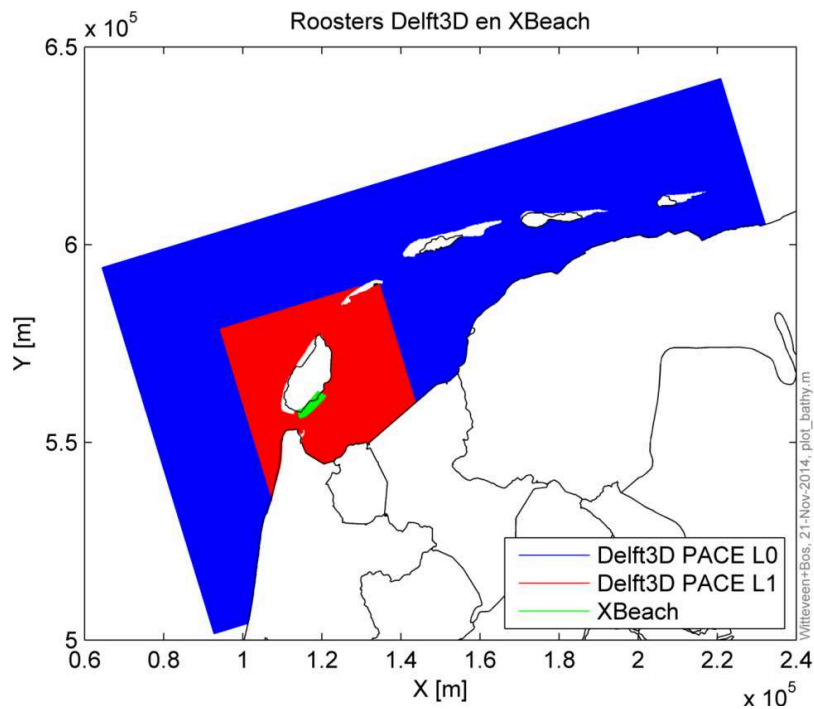
### 4.1 Introductie

De morfologische berekeningen voor de Prins Hendrikzanddijk worden uitgevoerd met het numerieke model XBeach<sup>1</sup>. XBeach is een tweedimensionaal, dieptegemiddeld (2DH) model waarmee de vergelijkingen voor golfvoortplanting, lange golven, stroming, sediment transport en bodemveranderingen worden opgelost.

Het model is in eerste instantie ontwikkeld om duinafslag tijdens stormen te berekenen en is daarom zeer geschikt om de gevolgen van extreme gebeurtenissen te modelleren. Daarnaast is XBeach toepasbaar voor situaties waar kustdwarse processen en lange golven belangrijk zijn onder dagelijkse condities. XBeach wordt constant doorontwikkeld en geschikt gemaakt voor nieuwe toepassingen door een actieve gebruikersgroep, waarin ook de ontwikkelaars nog een belangrijke rol spelen [ref. 8.].

Om de morfologische berekeningen op een fijn grid uit te kunnen voeren, wordt het XBeach model lokaal toegepast in het interessegebied bij de Prins Hendrikpolder. De waterstanden en golven die dienen als randvoorwaarden volgen uit Delft3D en SWAN modellen van de Waddenzee. Afbeelding 4.1 toont hoe het XBeach model zich verhoudt tot de omliggende Delft3D modellen.

**Afbeelding 4.1 Modelroosters XBeach en Delft3D**



<sup>1</sup> Aanvullende informatie over de gebruikte XBeach versie en (opvragen van) de modelschematisatie is te vinden in Bijlage I.





Het gebruikte Delft3D model is een aangepaste versie (met domeindecompositie) van het PACE-model [ref. 5. en 7.]. Voor de domeindecompositie is een deel van het originele grid (L0, blauw) uitgesneden en verfijnd (L1, rood). Het L0 grid heeft afmetingen van 200 x 200 m, die in het L1 grid 3x zijn verfijnd tot ~66 x 66 m.

Het PACE-model is ontwikkeld tijdens het PACE-project door een consortium van zeven instituten uit Nederland, Duitsland en Denemarken. Het gehanteerde SWAN-model is het WTI Waddenzee SWAN-model, zie bijlage VI.

In dit hoofdstuk wordt de opzet van het XBeach model toegelicht, waarbij wordt ingegaan op de belangrijkste uitgangspunten, het rekengrid, de bodem, de instellingen, de randvoorwaarden en de calibratie en verificatie van het model.

## 4.2 Beoogde resultaten modelstudie

Als vervolg op de studie door Witteveen+Bos in 2011/2012 [ref. 1. en 2.] volgen de beoogde resultaten van de huidige modelstudie uit de doelstellingen zoals beschreven in de inleiding van dit rapport. De beoogde resultaten van de modelstudie zijn nader gespecificeerd in hoofdstuk 3.

## 4.3 Uitgangspunten/aannames

De volgende uitgangspunten / aannames zijn gebruikt:

- de nominale korreldiameter die wordt toegepast voor de natuurbouw is  $D_{50}=300\mu\text{m}$ . Deze komt uit eerdere studies [ref. 1. en 2.] en is gebaseerd op de beschikbare sedimentfracties uit mogelijke zandwinlocaties en de eis dat verstuiving van zand tot een minimum moet worden beperkt;
- de huidige bodem van het plateau en de geulwand kan als een harde laag in het model worden ingebracht, omdat deze vrij stabiel zijn (plateau) of beschermd zijn met steenbestorting (geulwand). Bovendien kan op deze manier ook goed inzicht worden verkregen in alleen de morfologie van de aan te leggen natuurbouw en het veiligheidsduin;
- de morfologische ontwikkeling gedurende 10 jaar kan worden gemodelleerd als een cyclus van dagelijkse condities - stormcondities - dagelijks - stormcondities enz. Voor de feitelijke simulaties is uitgegaan van een periode van 5 jaar. De resultaten na 5 jaar worden geëxtrapoleerd naar 10 jaar;
- de dagelijkse condities (milde tot 1/1 jaar condities zonder stormopzet) moeten elk jaar gemixt worden, zodat de condities niet steeds samenvallen met dezelfde waterstanden;
- per jaar worden drie stormcondities in één simulatie doorgerekend;
- voor de dagelijkse condities kan gebruik gemaakt worden van de stationaire solver van XBeach; voor stormen wordt de instationaire solver gebruikt (zie ook de sectie 'rekentechniek en instellingen XBeach model');
- er wordt geen slib gemodelleerd;
- er wordt geen zoet-zout gradiënt gemodelleerd.

## 4.4 Modelgrid

Voor het modelgrid wordt gebruik gemaakt van een curvilineair grid, dat zodanig is gekozen dat de overheersende golven uit verschillende richtingen het model binnen kunnen komen via de zeewaartse rand. De zeewaartse rand bevindt zich op een zodanige afstand van de kust, dat over

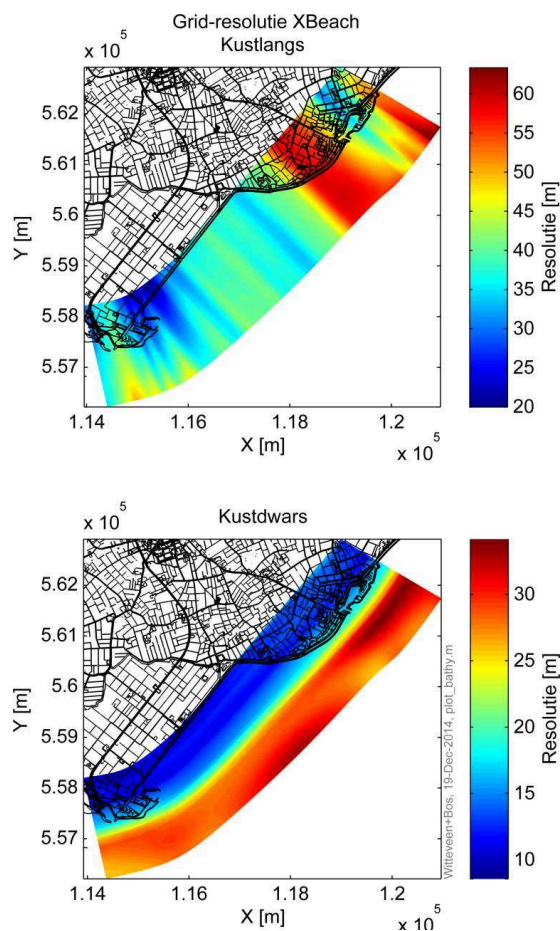


de gehele rand sprake is van diep water (20-30 m). Het plateau voor de Prins Hendrikpolder is van nature begrensd door de NIOZ- haven aan de zuidzijde en sectie 8 aan de noordzijde. De laterale randen van het model zijn op enige afstand van deze natuurlijke begrenzingen gekozen, zodat randeffecten geen gevolgen hebben voor het interessegebied.

Afbeelding 4.2 toont de resolutie van het grid dat wordt gebruikt voor de XBeach berekeningen voor zowel dagelijkse condities als stormcondities. Ter plaatse van het plateau waar het veiligheidsduin en de natuurbouw komen te liggen is het grid in kustdwars richting verfijnd tot een resolutie van ongeveer 10 m. Dit is voldoende om de bodem en het veiligheidsduin en de natuurbouw goed weer te geven en om hydrodynamische processen zoals golfopzet nauwkeurig te berekenen. Het gedeelte van het dwarsprofiel van de strandhaak boven gemiddeld hoogwater (GHW) wordt zo bijvoorbeeld met ongeveer 15 punten beschreven. Op dieper water zijn de gridcellen groter. Het grid is op dieper water fijner in kustdwars richting dan in kustlangse richting, zodat lange golven tijdens stormen correct kunnen worden berekend.

Gevoeligheidsberekeningen met verschillende grid-resoluties laten zien dat het grid voldoende fijn is [Ref. 10].

**Afbeelding 4.2 Grid-resolutie XBeach model (boven: kustlangs, onder: kustdwars)**



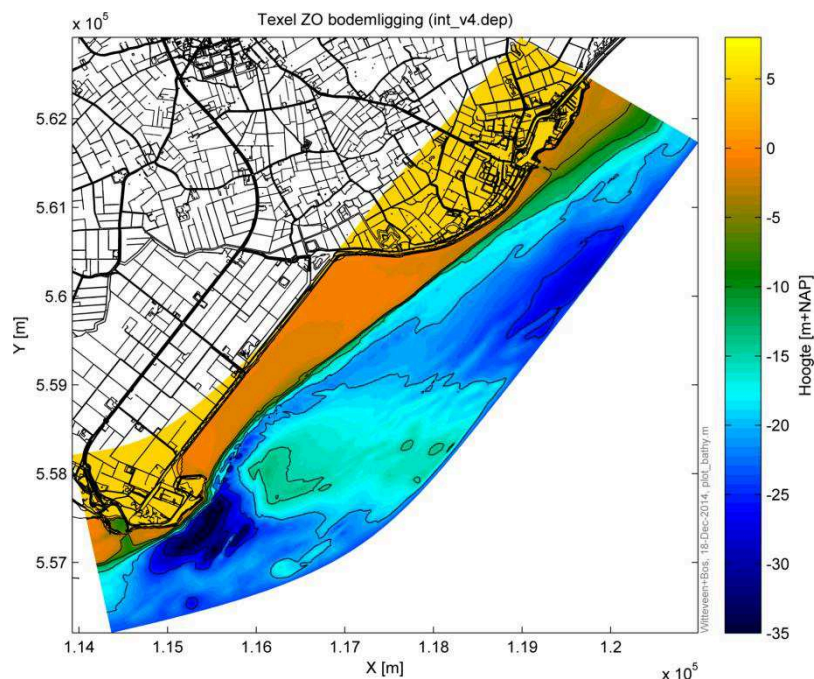


## 4.5 Bodem

De bestaande bodem is opgebouwd uit recente inmetingen van het plateau voor de Prins Hendrikpolder (2013) en de Texelstroom (2014), van het hoogheemraadschap<sup>2</sup>. Deze metingen hebben een resolutie van respectievelijk 1 x 1 en 2 x 2 m en konden door middeling per gridcel naar het grid worden vertaald. Waar deze data niet beschikbaar was, is gebruikt gemaakt van recente vaklodingen uit 2009 die zijn geïnterpoleerd naar het grid. De bodem voor droogvallende gebieden rond de NAP +0,0 m en iets daarboven is bepaald met behulp van gegevens uit het AHN [ref. 3.].

Specifiek voor het XBeach model is de bodem aan de zeewaartse rand uniform in langsrichting, waarvoor de gemiddelde diepte van alle gridcellen aan die rand is aangehouden. Van daaruit is de diepte over een aantal cellen geïnterpoleerd naar de waarde overeenkomstig de inmetingen. Aan beide laterale randen is de bodem uniform in kustlangse richting over een aantal gridcellen. Beide aanpassingen zijn noodzakelijk om randeffecten te minimaliseren. De bodem zoals toegepast voor de referentiesituatie wordt getoond in afbeelding 4.3. Afbeelding 4.4 toont de bodem van het model met en zonder de Prins Hendrikzanddijk. Het veiligheidsduin is weergegeven inclusief slijtlaag.

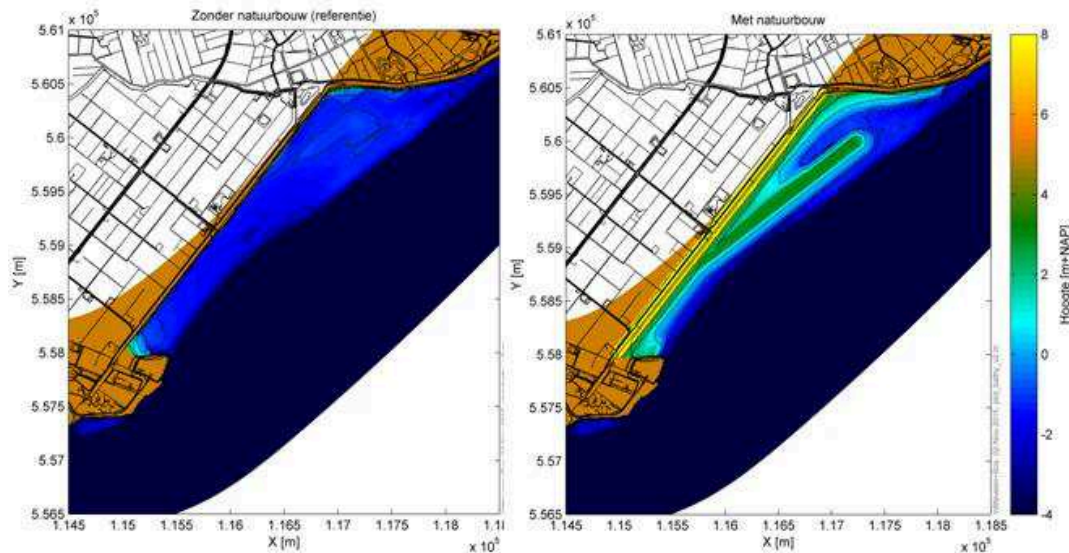
**Afbeelding 4.3 Bodem referentiesituatie**



<sup>2</sup> Single beam peiling Prins Hendrikzanddijk, 19-06-2013, nr. P2553-SBE-01/01-R00; Multibeam/Swath peiling, 25, 26 en 31 maart 2014.



**Afbeelding 4.4 Bodem plateau Prins Hendrikpolder zonder (links) en met Prins Hendrikzanddijk (rechts) [m+NAP]**



#### 4.6 Rekentechniek en instellingen Xbeach model

XBeach is bij uitstek geschikt om het effect van stormen te modelleren, omdat het ook de lange golven berekent die met name tijdens stormen ontstaan als gevolg van de gegroeptheid van de korte golven. Deze lange golven spelen een belangrijke rol bij de kusterosie tijdens stormen. Voor de simulaties van de stormen wordt daarom gebruik gemaakt van de instationaire solver in XBeach, die deze lange golven oplost. Tijdens dagelijkse condities met lagere golven, zijn deze lange golven veel minder belangrijk en wordt de veel snellere, stationaire solver in XBeach gebruikt.

In het model worden verder voornamelijk standaardinstellingen gebruikt. Voorbeelden van de invoerbestanden zijn te vinden in bijlage I voor simulaties met dagelijkse condities en voor simulaties met stormen. Indien relevant worden parameters in de bijlage in meer detail toegelicht.

Relevante instellingen zijn (zie ook: bijlage I):

- brekerformulering:
  - voor dagelijkse condities: break=baldock, gamma=0.7;
  - voor stormen: break=roelvink2, gamma=0.55;
- zeewaartse rand: 1D zwak-reflecterende randvoorwaarde, front=abs\_1d;
- laterale randen: Neumann randvoorwaarde (gradiënt=0) en golfkrachten uitgeschakeld op de rand;
- discretisatie golfrichting(-spreiding): 15 bins lopend van 0-240 graden;
- huidige bodem: vaste laag (geen erosie, wel aanzanding);
- bodemwrijving:
  - stroming: vergelijkbare instelling als Delft3D PACE, ruimtelijk variërende Chézy waarde op basis van ruwheid  $k=0.051$ , in ondiepe delen (<5m) is een minimumwaarde van  $C=55$  aangehouden;
  - golven: bodemwrijving uitgeschakeld;



- morfologie:
  - morfac=1 voor stormen, morfac=10 voor dagelijkse condities. Op basis van een vergelijking tussen morfac=1 en morfac=10 voor dagelijkse condities is deze instelling gerechtvaardigd (bijlage III);
  - D50=300µm;
  - morstart (spin-up tijd): berekening van morfologie start na een volledig getij voor dagelijkse condities en na 1,5 uur tijdens stormen(kortere spin-up, alleen verticaal getij);
- waterstanden: op twee zeewaartse hoeken (zie paragraaf 4.7.1).

De berekeningen zijn uitgevoerd zonder golf-stroominteractie ( $wci=0$ ), omdat dit in sommige gevallen leidt tot numerieke problemen in het model. Het effect van golf-stroominteractie op de golven is klein [Ref. 10]. Vanwege de numerieke instabiliteit is het op dit moment niet mogelijk om voor een volledig jaar morfologie met golf-stroominteractie te rekenen. Om de nauwkeurigheid van het model verder te vergroten, wordt aanbevolen om te onderzoeken hoe de golf-stroominteractie meegenomen kan worden in het model.

## 4.7 Randvoorwaarden

### 4.7.1 Waterstanden

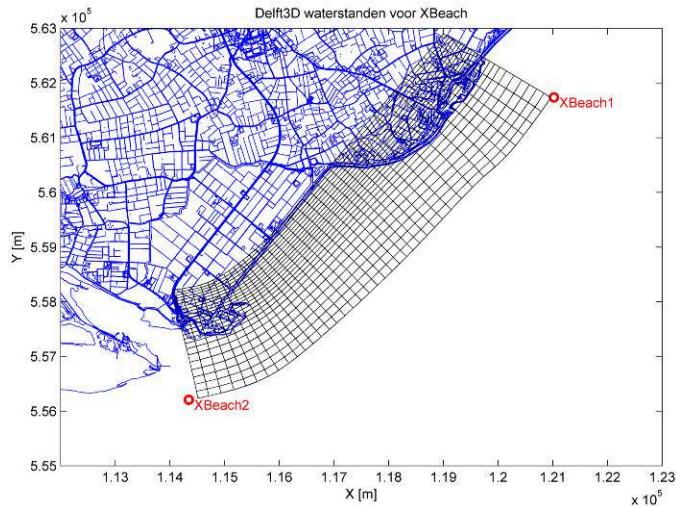
In het XBeach model wordt een tijdserie van waterstanden opgelegd op de beide hoekpunten van de zeewaartse rand van het grid, zie afbeelding 4.5. Op basis van deze waterstanden wordt in het model de gradiënt in kustlangse richting bepaald, die dient als forcering van de getij-stroming.

De tijdserie heeft een duur van ongeveer 7,5 dagen. Dat is de duur van alle golfcondities behorende bij het morfologisch klimaat plus één getij inspeeltijd voor de stroming. Het bepalen van dit morfologisch klimaat wordt in de volgende twee secties nader toegelicht. De tijdserie van 7,5 dagen wordt geselecteerd uit een tijdserie van een maand (= 2 x doortij-springtij), dit wordt toegelicht in bijlage II.

Deze tijdserie van een maand wordt berekend met een aangepaste versie van het Delft3D PACE model. De aanpassingen en de validatie van het model worden in bijlage II toegelicht, evenals de keuze voor de periode waarvan de waterstanden worden gebruikt. Het model is op getijstroming afgeregeld door te vergelijken met resultaten van het PACE-model.



**Afbeelding 4.5 Locatie waterstandspunten Delft3D ten opzichte van XBeach modelgrid**



#### 4.7.2 Golven

De golfrandvoorwaarden voor zowel de dagelijkse condities (stationair) als de stormen (instationair) worden uniform op de zeewaartse rand opgelegd. De verschillende condities worden opgelegd als een Jonswap spectrum door middel van de significante golfhoogte ( $H_s$ ), piekperiode ( $T_p$ ) en de golfrichting en richtings spreiding.

Voor het bepalen van de golfcondities is een aantal SWAN berekeningen gedaan met het SWAN WTI model. Daarvoor is een tijdserie (34 jaar) van windstation De Kooy geanalyseerd. Hiervoor is een frequentietabel opgesteld voor windsnelheid en windrichting (bins van 30 graden). Voor de gevonden combinaties zijn de golfparameters (golfhoogte, -periode en -richting) bepaald bij het Eierlandse Gat en de waterstanden bij Den Oever en Texel. Dit heeft geleid tot 113 combinaties van wind- en golfparameters. De modelopzet en de berekeningen worden nader toegelicht in bijlage III.

#### 4.7.3 Morfologisch klimaat voor dagelijkse condities

Het golfklimaat is voor de morfologische simulaties van 1 jaar met de dagelijkse condities gereduceerd tot een hanteerbaar aantal golfcondities, dat de grootste bijdrage levert aan het sedimenttransport, om de simulaties qua rekentijd hanteerbaar te houden. Deze condities vormen het zogenaamde morfologisch golfklimaat in 1 jaar.

De 113 stationaire golfcondities zijn beoordeeld op hun bijdrage aan het sedimenttransport ter plaatse van de zanddijk van de Prins Hendrikpolder. Hiervoor zijn de golfkarakteristieken, voortkomend uit de toepassing van het WTI SWAN model, juist voor de zuidoostelijke Texelse kust in de Van Rijn formule ingevuld.

$$S = H_s^3 \sin 2\varphi$$



**Tabel 4.1 Parameters Van Rijn formule**

<b>parameter</b>	<b>eenheid</b>	<b>betekenis</b>
S	-	relatief sediment transport
Hs	m	significante golfhoogte
$\phi$	°	hoek van inval tov. kustnormaal (135°)

Op basis hiervan zijn 21 golfcondities geselecteerd die resulteren in 72 % van het sediment transport. De 21 condities komen samen 19 % van de tijd voor, wat neerkomt op ongeveer 70 dagen. Dat is dan ook de morfologische tijdsduur die moet worden gesimuleerd om de morfologische veranderingen gedurende een jaar te berekenen. Om tot 100 % van het transport te komen, wordt de morfologische factor gecorrigeerd met een factor  $100/72 \approx 1,4$ . De morfologische factor wordt daarmee  $1,4 \times 10 = 14$ .

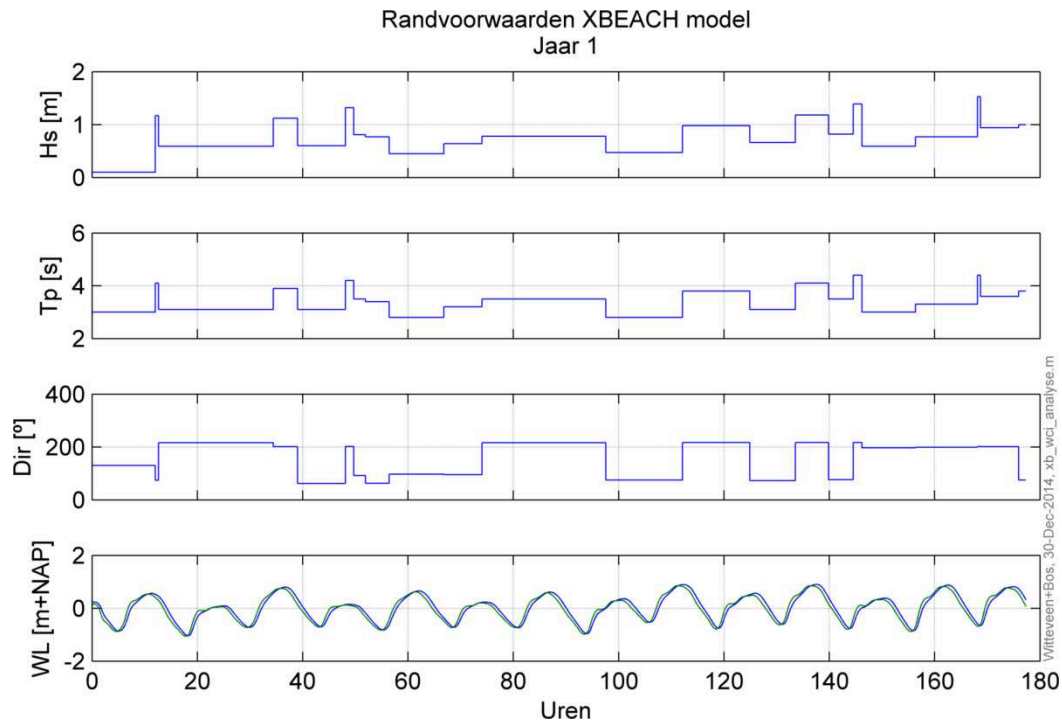
Tijdens de overige 81 % van het jaar komt daarom voornamelijk getij voor, met weinig golfwerking. Een gevoeligheidsberekening met alleen stroming door getij, zonder golven, laat zien dat dit nauwelijks tot sedimenttransport leidt. Het buiten beschouwing laten van deze periode is daarom een geoorloofde aanname.

Op basis van het morfologisch klimaat is per jaar een tijdserie van de 21 golfcondities gecreëerd, waarin de duur per conditie afhangt van het percentage van voorkomen van die conditie. Als voorbeeld is in afbeelding 4.6 de tijdserie weergegeven van jaar 1. In afbeelding 4.6 is van boven naar onder weergegeven: golfhoogte, periode, golfrichting en waterstanden op de beide hoekpunten.





#### Afbeelding 4.6 Randvoorwaarden jaarrond condities jaar 1



Om mogelijke effecten van de volgorde van de golfcondities in de tijdserie op de morfologie ongedaan te maken, is de volgorde van de condities per jaar veranderd. Dit zorgt er tegelijkertijd voor dat bepaalde condities niet steeds bij dezelfde waterstand optreden. In bijlage III zijn ter vergelijking de tijdseries voor de overige jaren weergegeven.

De tijdseries beslaan 7,5 dag, omdat in de simulaties een morfologische (versnellings-) factor is toegepast van 14. De eerste halve dag is daarbij gebruikt als inspeeltijd voor de stroming (zonder golven en morfologische ontwikkeling).

De morfologische berekeningen voor een periode van 5 jaar worden uitgevoerd als een zogenaamde 'modellentrein' met afwisselend simulaties met dagelijkse condities en stormcondities zoals toegelicht in het hoofdstuk.

#### 4.7.4 Stormen

Tijdens een storm komen relatief hoge golven voor en kan een verhoging van de waterstand optreden (stormopzet). De combinatie van hoge golven en hoge waterstanden kan leiden tot relatief grote morfologische veranderingen en zandverliezen uit de Prins Hendrikzanddijk. Daarnaast treden de effecten deels op andere gebieden op, omdat de golfaanval op een andere hoogte in het dwarsprofiel plaatsvindt.

Om het effect van stormen op de morfologische ontwikkeling mee te nemen in deze studie is in dit geval gekozen om per jaar drie stormen te simuleren. De stormen vinden na elkaar plaats in één simulatie. De duur van de simulatie is de som van de duur van de stormen. De stormduur is op zijn





beurt gerelateerd aan de maximale opzet van de waterstand, waarbij een hogere opzet leidt tot een langere storm.

In het stormverloop en bijbehorend waterstandverloop is de piekwaterstand een combinatie van stormopzet en hoogwater. De variatie van de waterstand over een getij is niet meegenomen in de simulaties. De waterstand is daardoor gemiddeld hoger waardoor de effecten van de storm licht overschat worden.

Voor de stormen zijn uit de 113 berekende condities met SWAN drie relatief zware golfcondities geselecteerd, die horen bij hoge windsnelheden die ongeveer 1/1 jaar optreden. Dit zijn condities 1A, B en C in tabel.

Voor de stormen in jaar 1 zijn de waterstanden uit tabel III.4, corresponderend met de storm voor de gekozen windrichting en - snelheid, vermeerderd met een halve getijslag (0.7 m = GHW). Dit is de piekwaterstand die normaalgesproken optreedt bij die stormconditie.

Om ook wat extremere condities mee te nemen en om de gevoeligheid van het ontwerp voor stormen te onderzoeken zijn in jaar 2 en 3 de waterstanden tijdens een aantal stormen verhoogd tot een hoogwaterstand met een herhalingsstijd van één jaar (NAP + 2,25 m) en met een herhalingsstijd van 5 jaar (NAP + 2,70 m). Als voorbeeld worden de randvoorwaarden voor de stormen in jaar 3 getoond in afbeelding.

Deze hoge waterstanden worden veroorzaakt door harde wind uit het noordwesten waarbij de hoge golven ook uit die richting komen. Vanwege de zuidoostelijke oriëntatie van het projectgebied bereiken deze golven het gebied niet. De hoogste golven komen voor bij wind uit het zuidwesten, waarbij de stormopzet veel kleiner is. Over het algemeen komen hoge golven dus voor bij relatief lage waterstanden en zijn lage tot geen golven bij hoge waterstanden.

Met name de combinatie van de hoogste golfconditie met de 1/5 jaar waterstand in jaar 3 is daarom vrij extreem en heeft een terugkeertijd > 10 jaar. In deze studie wordt de conservatieve aanname gedaan dat deze storm overeenkomt met de 1/10 jaar storm. Deze storm komt eenmaal voor in de 5 jaar die wordt doorgerekend. Doordat deze 5 jaar vervolgens worden geëxtrapoleerd naar 10 jaar, komt deze storm feitelijk tweemaal voor in de simulaties en resultaten. Deze aanname dient met name om de gevoeligheid van de morfologie van het schetsontwerp voor stormcondities in te schatten. De kans dat de 1/10 jaar storm 2 of meer keer voorkomt in 10 jaar is ongeveer 25 %.



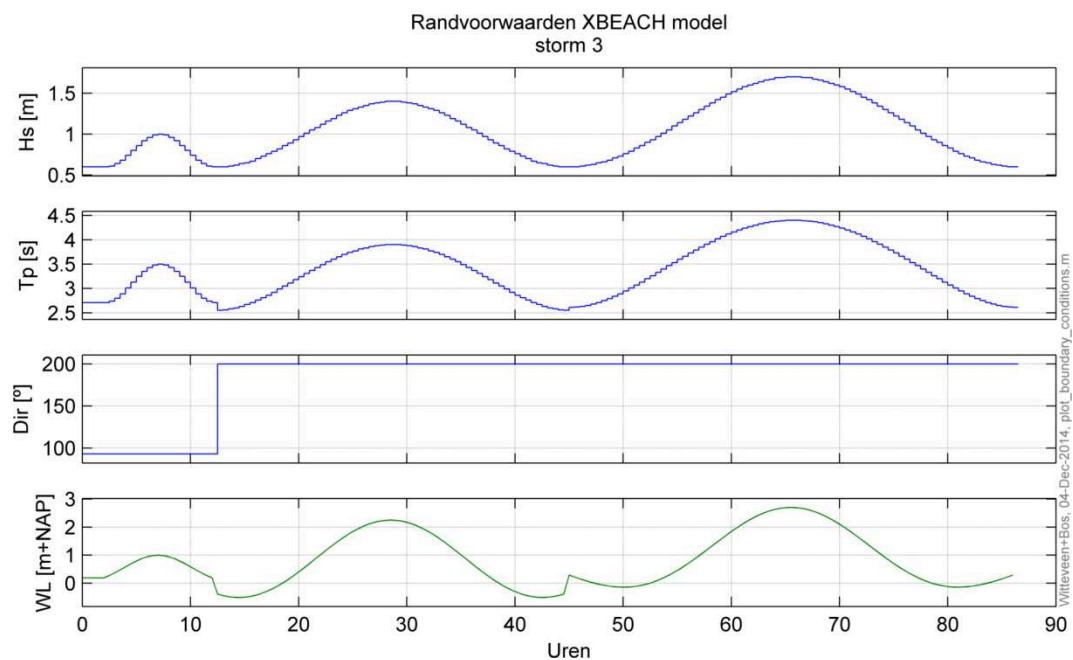
Aangezien de condities in jaar 2 en 3 overeenkomen met stormen met hoge terugkeertijden, wordt in jaar 4 en 5 weer gerekend met dezelfde stormen als in jaar 1. Alle stormen zijn samengevat in tabel 4.2. Het stormverloop voor jaar 1 en 2 wordt getoond in bijlage III, afbeelding III.8 en III.9.

**Tabel 4.2 Stormcondities**

storm	Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]	max. WL [NAP + m]
1 A	1.0	3.5	93	0.60
1 B*	1.4	3.9	212	0.93
1 C*	1.6	4.2	212	1.03
2 A	1.0	3.5	93	1.00
2 B*	1.4	3.9	212	1.00
2 C*	1.6	4.2	212	2.25
3 A	1.0	3.5	93	1.00
3 B*	1.4	3.9	212	2.25
3 C*	1.7	4.4	214	2.70
4 A	1.0	3.5	93	0.60
4 B*	1.4	3.9	212	0.93
4 C*	1.6	4.2	212	1.03
5 A	1.0	3.5	93	0.60
5 B*	1.4	3.9	212	0.93
5 C*	1.6	4.2	212	1.03

\*) De golfrichting is in de XBeach simulaties beperkt tot 200 graden om ongewenste hydrodynamische effecten te mitigeren. Dit heeft een zeer beperkte invloed op de gesimuleerde morfologische veranderingen.

**Afbeelding 4.7 Randvoorwaarden stormcondities aansluitend op jaar 3**





#### 4.8 Kalibratie/verificatie model [Ref. 11]

Het XBeach model is als volgt gekalibreerd op basis van een vergelijking met een aantal andere modellen:

- voor de waterstanden, stroomsnelheden en stromingspatronen is het model vergeleken met de resultaten van een Delft3D berekening en zodanig gekalibreerd dat de beide modellen goed overeenkomen;
- voor golven is gebruik gemaakt van een vergelijking met een aantal SWAN berekeningen om de prestaties van XBeach te kunnen beoordelen;
- de langtransporten zijn vergeleken met de resultaten van UNIBEST uit een eerdere studie van Witteveen+Bos voor de Prins Hendrikzanddijk [ref. 2.]. Vanwege de verschillende uitgangspunten, randvoorwaarden en type model was een 1 op 1 vergelijking niet mogelijk. Geconstateerd is dat de orde van grootte van transporten in beide berekeningen niet onrustbarend afwijkt.

De vergelijking met andere modellen geeft een basis voor vertrouwen in het XBeach model. Om dit vertrouwen te vergroten en de bandbreedte om de resultaten te verkleinen, verdient het aanbeveling om het model af te regelen op basis van metingen. Metingen waren echter bij start van het project niet beschikbaar.

De kalibratie en verificatie van het model is uitgevoerd in het kader van de morfologische modelstudie uitgevoerd door Witteveen+Bos in 2014/2015. Voor een uitgebreide toelichting wordt verwezen naar [Ref. 10].



## 5 Modelresultaten

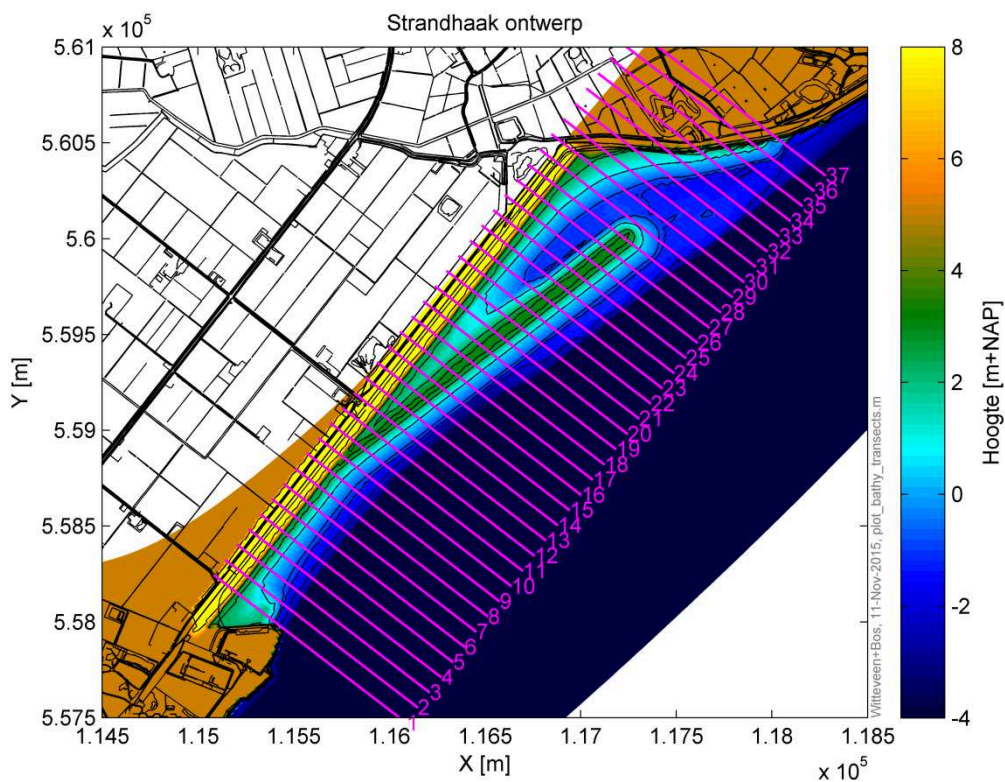
### 5.1 Introductie

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de morfologische berekeningen voor een periode van 5 jaar van de Prins Hendrikzanddijk gepresenteerd en toegelicht. Hierbij wordt ingegaan op het gedrag en de stabiliteit van het ontwerp op de lange termijn. Daarnaast wordt de gevoeligheid van de resultaten voor onzekerheden besproken.

#### 5.1.1 Definitie kustdwarse raaien

Voor een aantal analyses worden kustdwarse raaien gebruikt. Deze raaien zijn gedefinieerd voor het gehele projectgebied met een onderlinge afstand van 100 meter (afbeelding 5.1).

**Afbeelding 5.1 Definitie kustdwarse raaien**





## 5.2 Morfologisch gedrag en stabiliteit ontwerp lange termijn

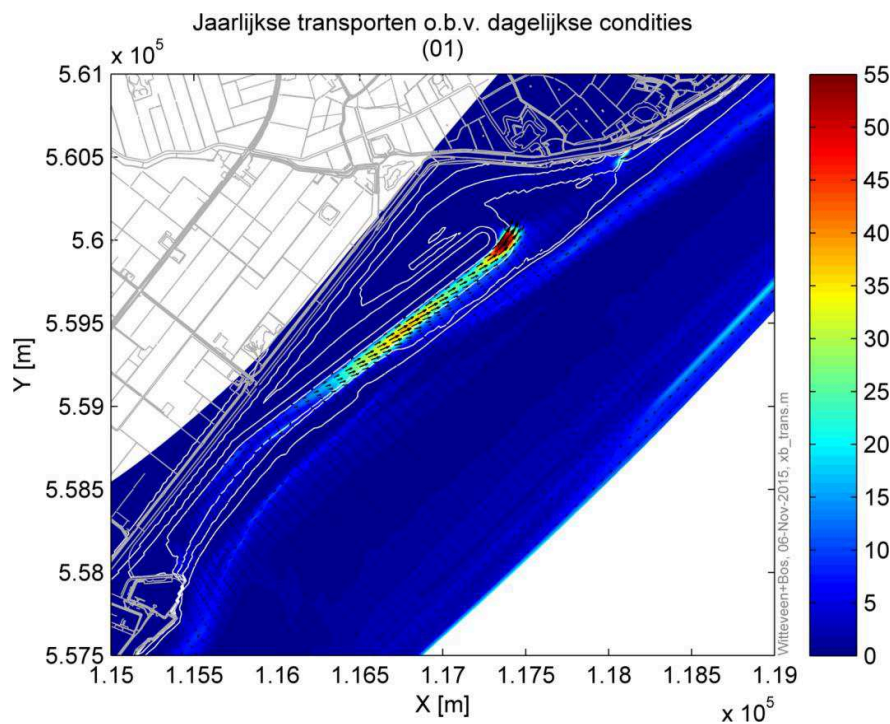
In deze paragraaf wordt ingegaan op de resultaten uit de morfologische berekeningen met betrekking tot sedimenttransport, de morfologische ontwikkeling onder dagelijkse condities en stormcondities, de lange termijn ontwikkeling en stabiliteit, de ontwikkeling van de Prins Hendrikzanddijk na 5 jaar, zandverliezen uit het gebied en aangroei van de strandhaak.

### 5.2.1 Sedimenttransport

Afbeelding 5.2 toont de ruimtelijke verdeling van het netto transport en de bijbehorende richting op basis van de simulatie van jaar 1. De grootste transporten treden op in het inter-getijdengebied langs het midden (geel/oranje) en aan het noordelijke uiteinde (rood) van de strandhaak. Het netto transport is gericht naar het noordoosten.

Het grootste deel van het transport vindt plaats op het relatief ondiepe plateau, binnen het plangebied. Daarnaast vindt in veel mindere mate transport plaats naar de diepere geul, de Texelstroom, die voor het plateau ligt. Sediment dat naar de Texelstroom wordt getransporteerd, wordt verder meegevoerd door de getijdenstroming en gaat verloren uit het plangebied.

### Afbeelding 5.2 Ruimtelijke verdeling netto jaarlijkse transporten in $\text{m}^3/\text{m}$ op basis van 1 jaar dagelijkse condities





Om inzicht te krijgen in de effecten van het sedimenttransport op de morfologie van de Prins Hendrikzanddijk, wordt het transport van sediment langs het gebied beschouwd. Het langstransport op basis van de simulatie van jaar 1 wordt gepresenteerd in afbeelding 5.3 en is onderverdeeld in noordwaarts, zuidwaarts en totaal (netto) transport van sediment. Het transport is weergegeven van het zuiden (raai 1) naar het noorden (raai 37) van het plangebied. Met rode en blauwe vakken is onder de figuur aangegeven waar voornamelijk erosie (blauw) en sedimentatie (rood) optreedt.

Voor de analyse van de langstransporten worden grofweg drie gebieden beschouwd:

***Zuid: strand (raai 1-12)***

Dit gedeelte is relatief beschut voor golven vanuit zuidelijke/zuidwestelijke richtingen en ligt meer blootgesteld aan golven uit oostelijke richtingen. Het noordwaarts transport is daardoor klein, terwijl het zuidwaarts transport relatief groot is. De gradiënten in het netto transport zijn klein, zodat de morfologische veranderingen klein zijn als gevolg van het langstransport in dit gebied.

***Midden: strandhaak (raai 13-30)***

Het noordwaarts en het netto transport neemt toe van raai 13 tot raai 21. Over dit gebied treedt erosie op als gevolg van deze constante gradiënt in het langstransport. De erosie van raai 21 tot 27 is beperkt, doordat het langstransport daar redelijk constant is.

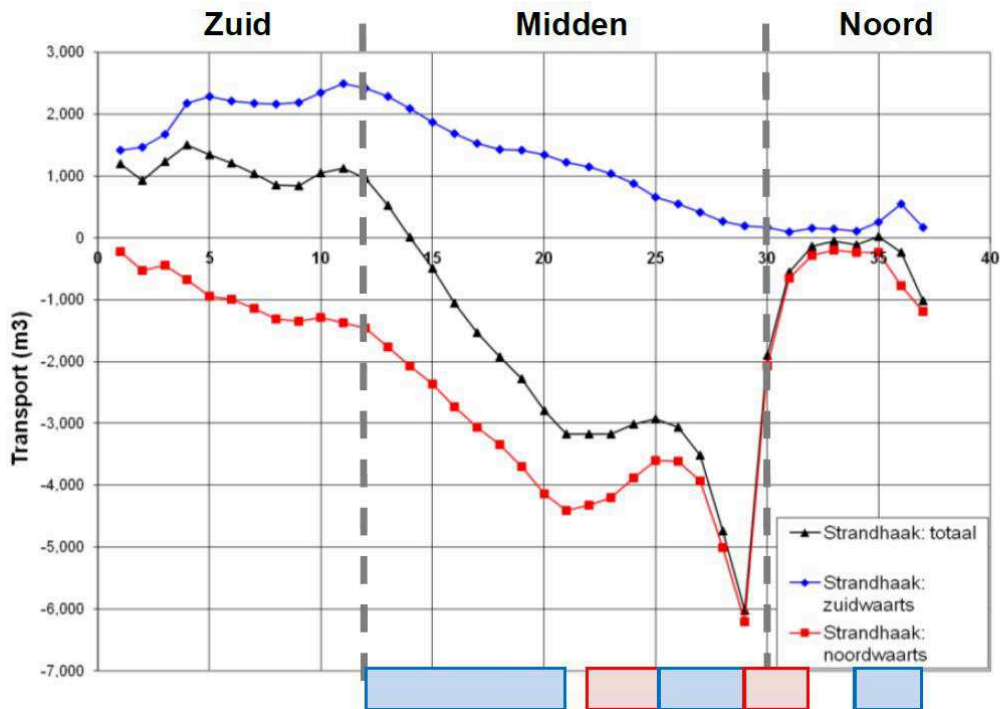
Vanaf raai 27 neemt het transport sterk toe om bij raai 30 weer sterk af te nemen. Deze raaien liggen rond de punt van de strandhaak. Als gevolg van het langstransport treedt erosie op aan de kop, gevolgd door sedimentatie vlak daarachter/daarnaast. Het langstransport leidt hier tot een constante aanvoer van sediment, waardoor de strandhaak aangroeit in noordelijke richting.

***Noord: doorstroomopening (raai 31-37)***

In dit gebied is de golfactie beperkt, waardoor de transporten klein zijn. De morfologische veranderingen zijn daarom beperkt.



**Afbeelding 5.3 Langstransporten in m<sup>3</sup>/jaar in jaar 1**



### 5.2.2 Morfologische ontwikkeling gebied onder dagelijkse condities

Onder dagelijkse omstandigheden verandert het gebied onder invloed van getij en golven. De (langere) duur van optreden is hierbij de belangrijkste aandrijvende kracht van de veranderingen.

Afbeelding 5.4 geeft de morfologische verandering weer gedurende 1 jaar dagelijkse condities. Hierin is te zien dat langs het grootste deel van natuurbouw erosie optreedt. Dit sluit aan bij het beeld van het langstransport zoals besproken in de vorige paragraaf. Het gaat daarbij om een verticale erosie in de orde van 0,1 m tot 0,6 m per jaar.

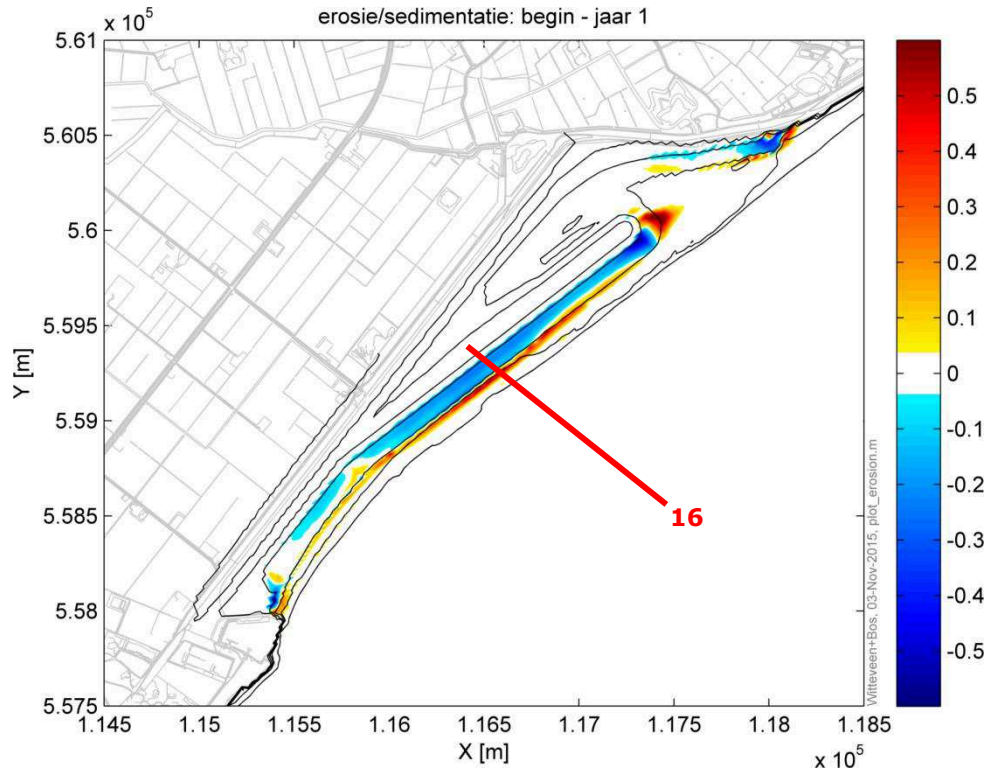
Het sediment komt voornamelijk terecht in de instroomopening aan de noordzijde van de strandhaak. Dit is een gevolg van de sterke afname van het langstransport op die locatie. Door afslag belandt het sediment daarnaast op de diepere delen in het dwarsprofiel, waardoor het profiel flauwer wordt. Het verflauwen van het profiel is terug te zien in de ontwikkeling van het dwarsprofiel van raai 16 in de tijd (afbeelding 5.5). Het talud tussen NAP +1 m en NAP -1 m wordt flauwer en het steilere gedeelte daaronder wordt opgevuld met zand uit de hogere delen en wordt daardoor ook flauwer. Het dwarsprofiel ontwikkelt zich op deze manier richting een evenwichtssituatie.

Niet zichtbaar in de afbeeldingen is dat een deel van het sediment in de Texelstroom verdwijnt en verloren gaat uit het plangebied. Tijdens dagelijkse omstandigheden treedt geen erosie op aan het veiligheidsduin.

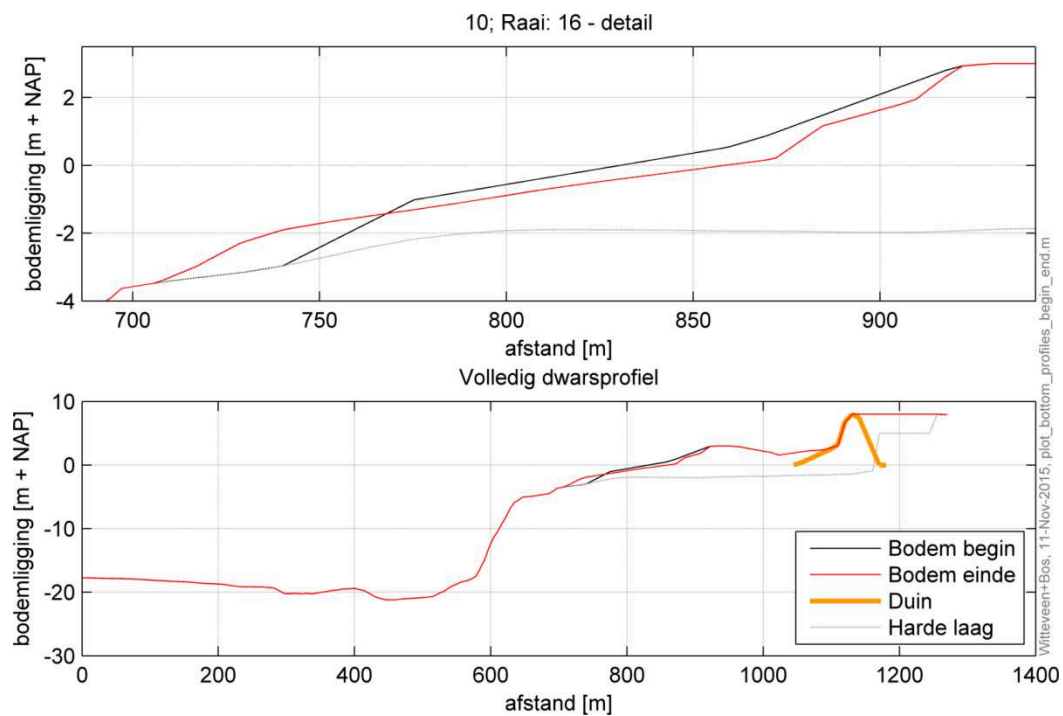




**Afbeelding 5.4 Morfologische veranderingen na 1 jaar dagelijkse omstandigheden (blauw=erosie, rood=sedimentatie)**



**Afbeelding 5.5 Ontwikkeling dwarsprofiel raai 16 na 5 jaar**







### **5.2.3 Morfologische ontwikkeling gebied onder stormcondities**

Zoals in paragraaf 4.7.4 beschreven, is met milde en zwaardere stormen gerekend. Afbeelding 5.6, afbeelding 5.7 en afbeelding 5.8 laten de effecten zien van de stormen in respectievelijk jaar 1, jaar 2 en jaar 3.

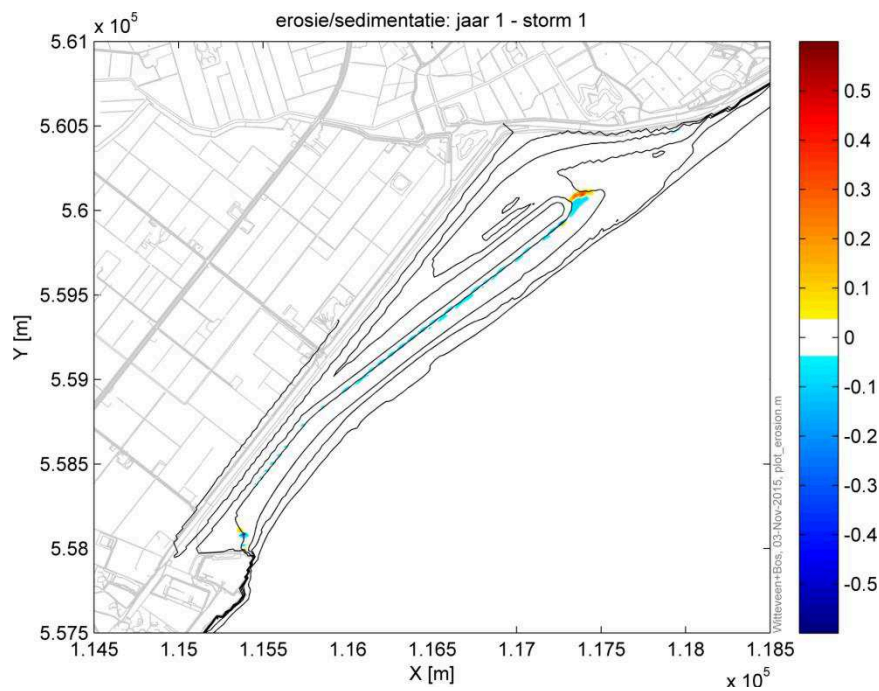
In afbeelding 5.8 zijn de effecten tijdens een milde storm (na 1 jaar dagelijkse condities) gepresenteerd. In de afbeelding is te zien dat de milde storm nauwelijks invloed heeft op de morfologie. Uit de afbeelding is op te maken, dat alleen zeer lokaal wat bodemveranderingen te zien zijn. Dit komt doordat de stormcondities in jaar 1 niet veel zwaarder zijn dan de zwaarste condities die voorkomen in de jaarrond condities. De storm werkt daarbij ongeveer op dezelfde hoogte in het dwarsprofiel. Op die hoogte heeft het profiel zich al ontwikkeld richting een evenwichtsprofiel, zodat het effect van de storm minimaal is.



Afbeelding en afbeelding tonen de sedimentatie en erosie tijdens de stormen in jaar 2 en jaar 3 (respectievelijk  $\sim 1/5$  jaar en  $\sim 1/10$  jaar condities). Het effect van de verhoogde waterstand (tot NAP +2,7 m) is dat de golfaanval hoger in het dwarsprofiel optreedt en daar afslag veroorzaakt (orde 0,2 tot 0,6 meter op de hogere delen). Het verschil tussen de stormen in jaar 2 en 3 is dat de afslag in jaar 3 iets groter is en hoger in het dwarsprofiel optreedt.

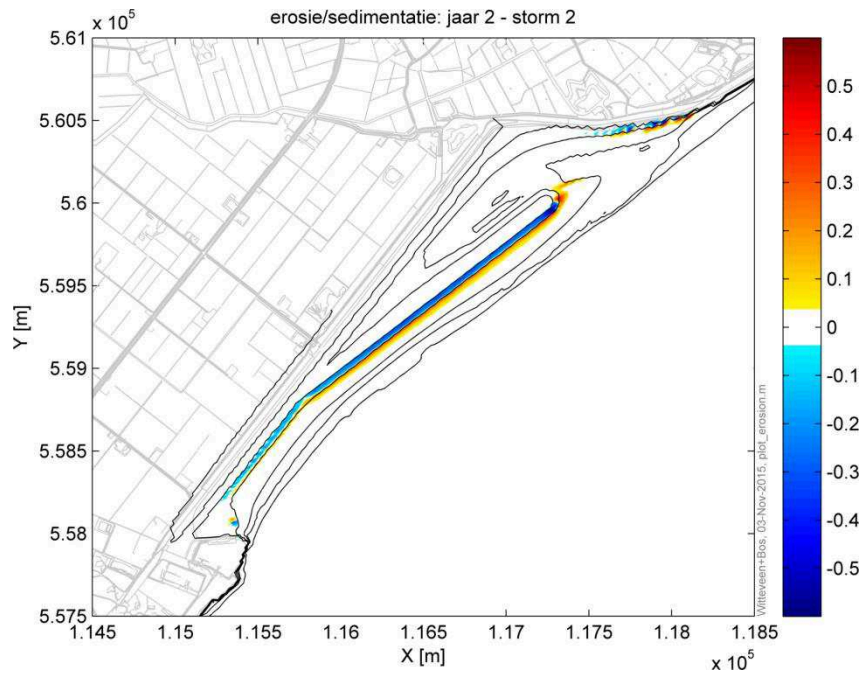
De effecten treden alleen op in de strandhaak en slijtlaag. Zowel voor de 1/5 jaar als de 1/10 jaar storm is geen erosie van het veiligheidsduin, omdat de golfenergie al gedissipeerd wordt door de strandhaak en slijtlaag.

**Afbeelding 5.6 Morfologische veranderingen na een milde storm (jaar 1, blauw=erosie, rood=sedimentatie)**

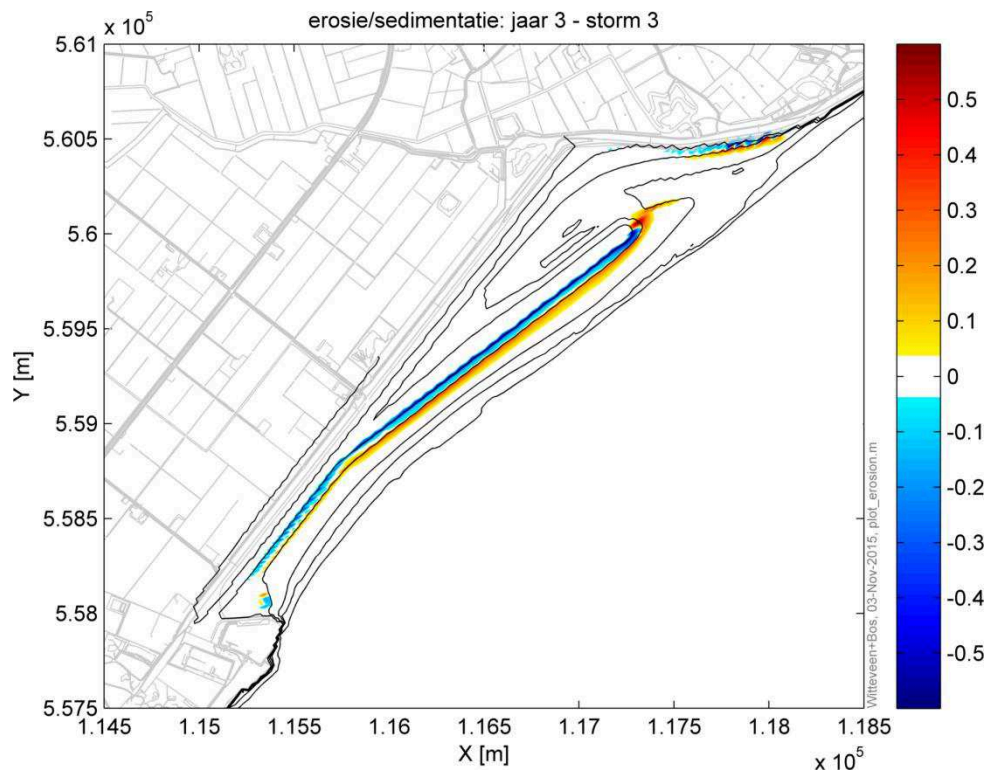




**Afbeelding 5.7 Morfologische veranderingen na een 1/5 jaar storm (jaar 2, blauw=erosie, rood=sedimentatie)**



**Afbeelding 5.8 Morfologische veranderingen na een 1/10 jaar storm (jaar 3, blauw=erosie, rood=sedimentatie)**

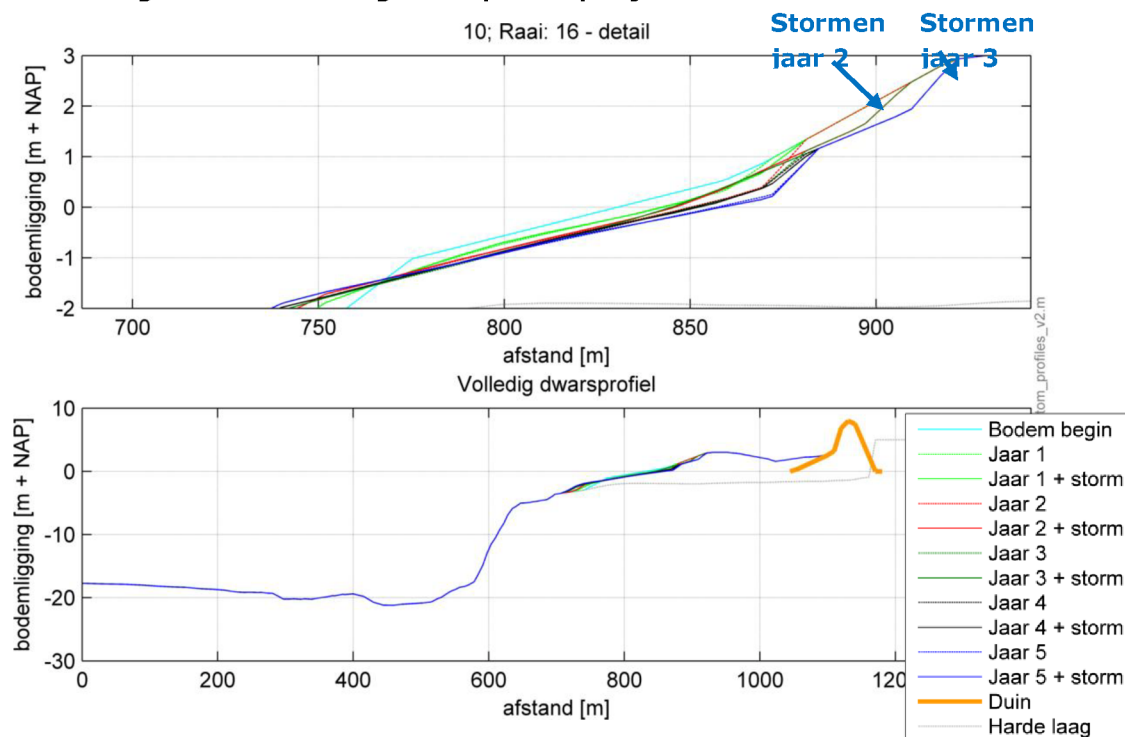




In afbeelding 5.9 is de morfologische verandering van raai 16 te zien. In deze afbeelding is de bodemligging na elke berekening (jaar of stormen) gepresenteerd. Het dwarsprofiel verandert gedurende de 5 jaar voornamelijk onder NAP +1 m. Tijdens de eerste zware storm (na 2 jaar) vindt er afslag plaats hoger in het profiel, rond de NAP +2 m. De storm na 3 jaar zorgt voor afslag in tussen de NAP +2 m en NAP +3 m.

In de onderste figuur is het totale profiel getoond. Hierin is te zien dat het veiligheidsduin onaangetast blijft. Hieruit blijkt dat het ontwerp van het veiligheidsduin stabiel is tijdens stormcondities.

**Afbeelding 5.9 Ontwikkeling dwarsprofiel per jaar**



#### 5.2.4 Lange termijn ontwikkeling en stabiliteit (2-5 jaar)

De lange termijn ontwikkeling en de stabiliteit wordt beschouwd aan de hand van drie aspecten die hierna besproken worden:

1. ontwikkeling Prins Hendrikzanddijk na 5 jaar;
2. zandverliezen uit het plangebied;
3. aangroei strandhaak/ontwikkeling doorstroomopening.

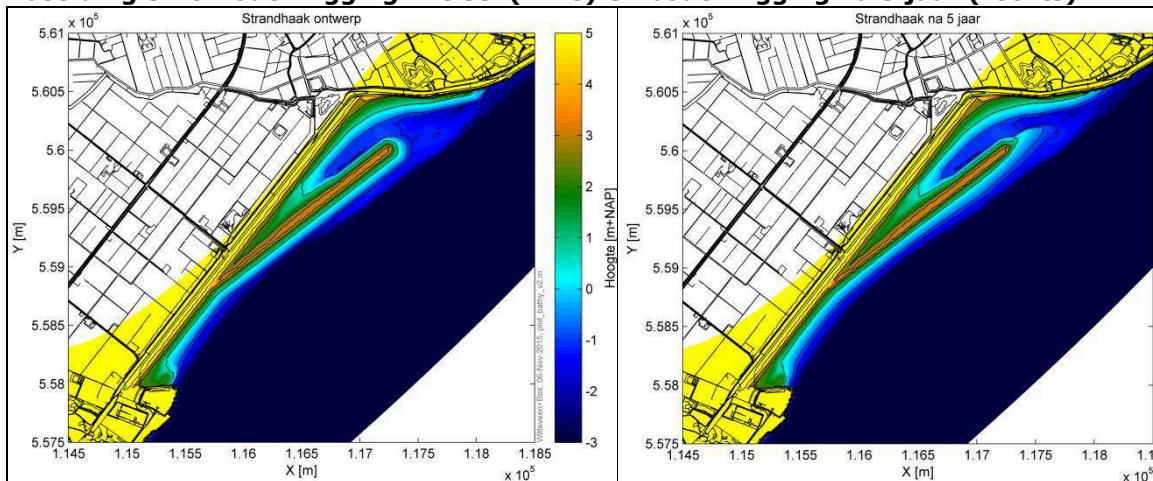


### Ontwikkeling Prins Hendrikzanddijk na 5 jaar

Afbeelding 5.10 laat de bodem zien in de initiële situatie en na 5 jaar simulaties. Dit geeft een beeld van de globale morfologische ontwikkeling van het gebied.

Allereerst is te zien dat een ontwikkeling richting een evenwichtssituatie plaatsvindt. Het zeewaarts profiel wordt flauwer dan initieel aangelegd en de aanzet van de strandhaak wordt gladder/ronder door het ontstaan van een natuurlijke kustboog. Daarnaast is de aangroei van de strandhaak in noordelijke richting als gevolg van het langstransport duidelijk zichtbaar. Ondanks deze ontwikkelingen is de Prins Hendrikzanddijk stabiel en is de globale vorm na 5 jaar vrijwel ongewijzigd.

### Afbeelding 5.10 Bodemligging initieel (links) en bodemligging na 5 jaar (rechts)



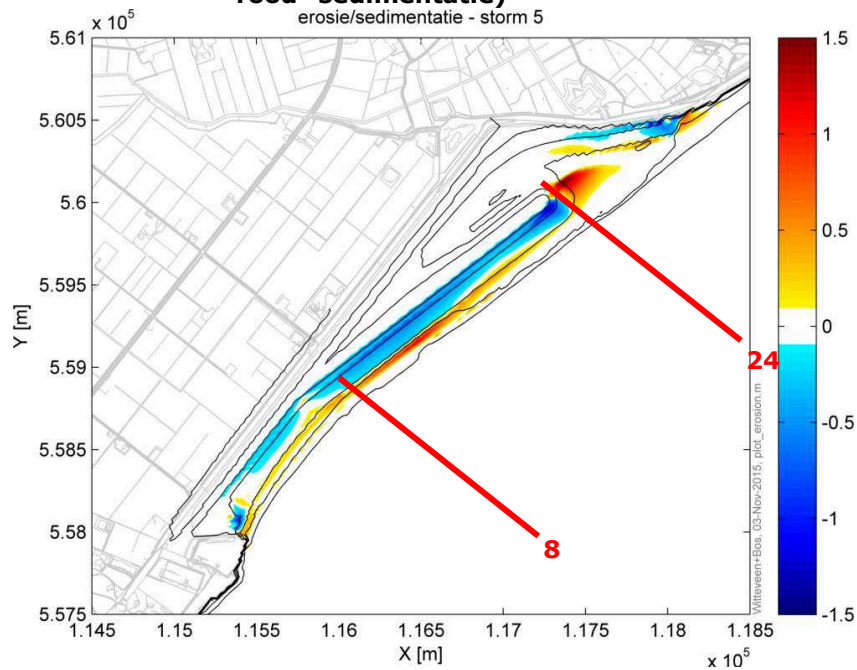
Door de bodemverandering over 5 jaar te beschouwen wordt dit beeld bevestigd (afbeelding 5.11). Hier vindt tot ongeveer 1 meter erosie plaats langs de strandhaak. Dit belandt deels op de lagere delen in het dwarsprofiel wat samen met de erosie leidt tot een profielverflauwing. Aan de noordzijde van de strandhaak ontstaat een gebied met een significante sedimentatie tot maximaal 1,5 meter. Daardoor groeit de strandhaak aan in noordelijke richting.

Achter de strandhaak vindt geen of nauwelijks bodemverandering plaats doordat het grootste deel van de golven al is gedissipeerd op de strandhaak. Hier ontstaat een golfvlug gebied achter de strandhaak en het deel van de opening, dat beschermt ligt bij golven uit zuidelijke richtingen. Dit is zowel belangrijk voor de ontwikkeling van specifieke habitats als voor het veiligheidsduin, dat niet wordt aangetast in de gesimuleerde 5 jaar.

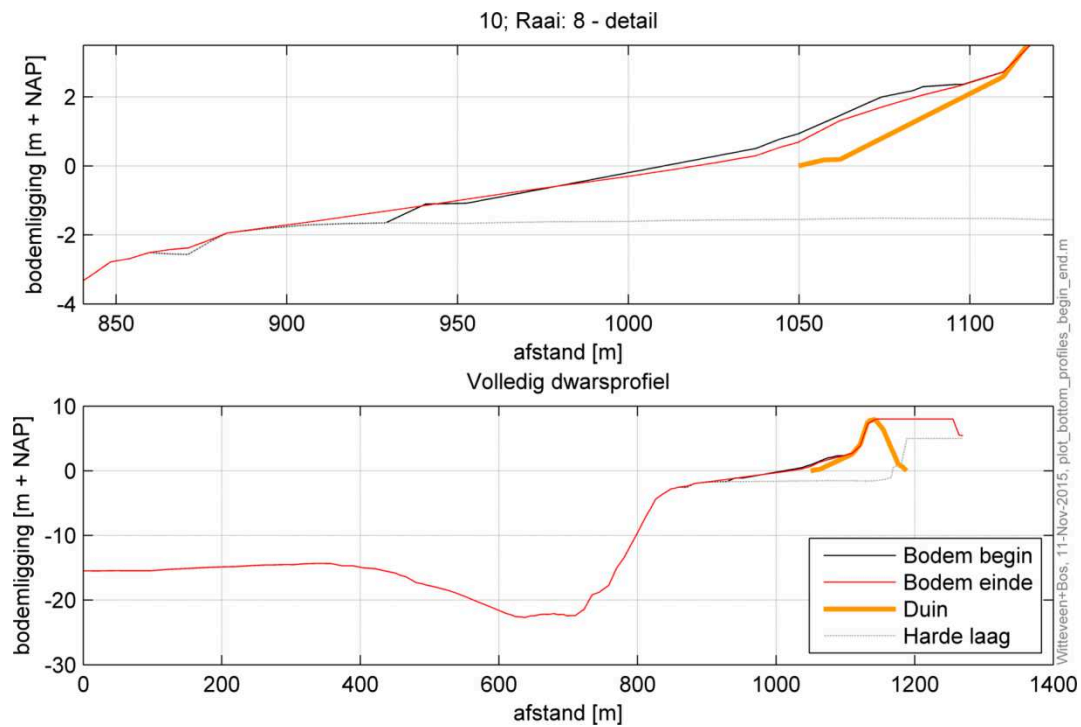
Dat het veiligheidsduin niet wordt aangetast, blijkt ook uit de ontwikkeling van het dwarsprofiel voor raai 8 en raai 24 (afbeelding 5.12, afbeelding 5.13). Raai 8 ligt zuidelijk van de strandhaak en is zodoende niet beschermd door de strandhaak. De golfaanval in deze en omliggende raaien is echter zodanig beperkt, dat het extra volume dat aanwezig is in het strand voor het veiligheidsduin, voldoende blijkt te zijn om te zorgen dat het profiel van het veiligheidsduin niet wordt aangetast. In raai 24 en andere raaien waarin de strandhaak ligt, beschermt de strandhaak het achterliggende veiligheidsduin tegen golfaanval. De strandhaak en slijtlaag werkt als bufferlaag voor het veiligheidsduin.



**Afbeelding 5.11 Bodemverandering na 5 jaar simulaties in meters (blauw=erosie, rood=sedimentatie)**



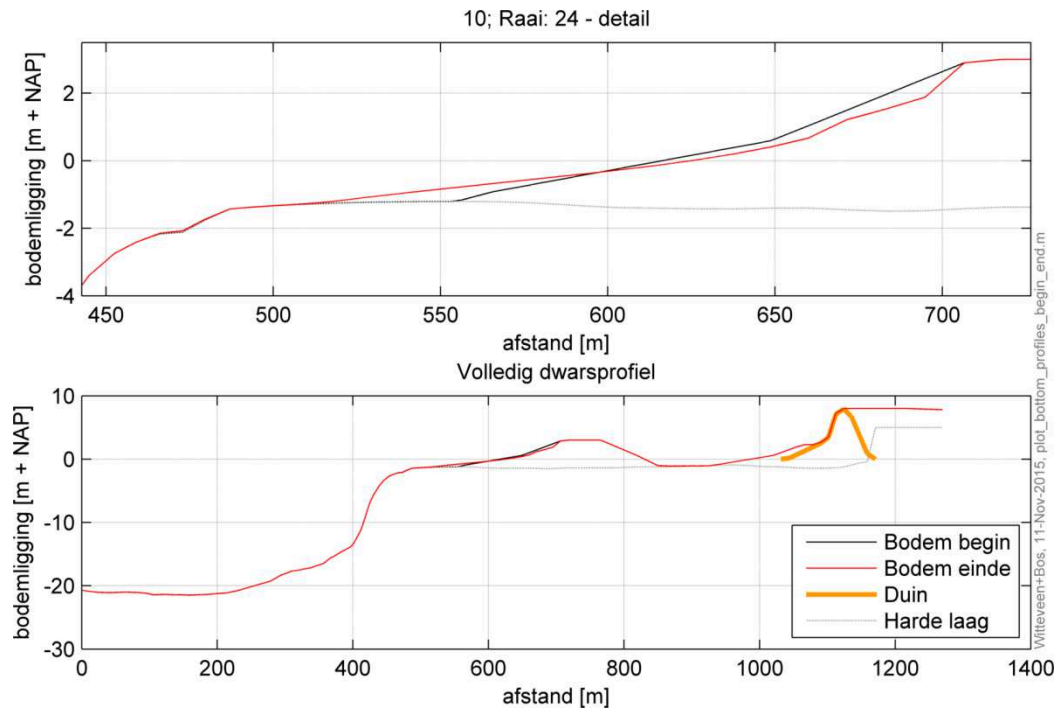
**Afbeelding 5.12 Ontwikkeling dwarsprofiel zuidelijk strand/duin (raai 8) na 5 jaar**







### Afbeelding 5.13 Ontwikkeling dwarsprofiel strandhaak (raai 24) na 5 jaar



#### Zandverliezen uit het gebied

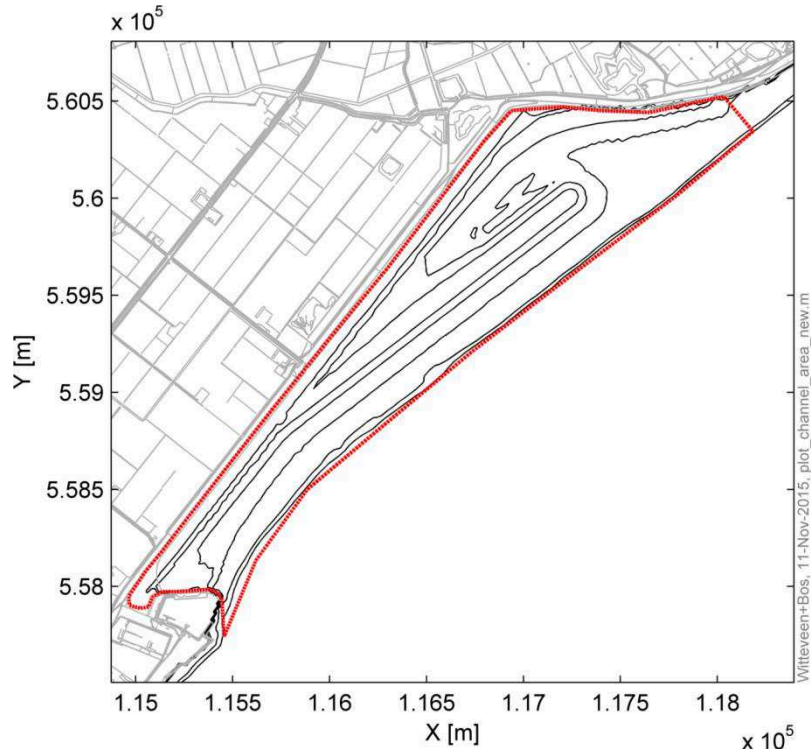
Afbeelding 5.14 geeft de totaal berekende verliezen uit het gehele gebied weer. Het beschouwde balansgebied is begrensd door de NAP -5 m contour, zie afbeelding 5.15. In 5 jaar tijd verdwijnt ongeveer 28.000 m<sup>3</sup> sediment uit het systeem, wat neerkomt op ongeveer 5.600 m<sup>3</sup>/jaar. Hierbij is nog geen rekening gehouden met onzekerheden, waarvoor een factor 2 aangehouden kan worden. De verliezen van sediment uit het gebied vinden voornamelijk plaats tijdens dagelijkse omstandigheden.

De jaarlijkse verliezen zijn vrijwel constant en kunnen daarom lineair geëxtrapoleerd worden naar 10 jaar. In 10 jaar zijn de netto verliezen dan ongeveer 56.000 m<sup>3</sup> aan zand. Bruto zijn de verliezen groter, omdat binnen het plangebied een herverdeling plaatsvindt van sediment. Deze hoeveelheid moet (groten-)deels teruggebracht worden om te zorgen voor een duurzame instandhouding van de Prins Hendrikzanddijk.

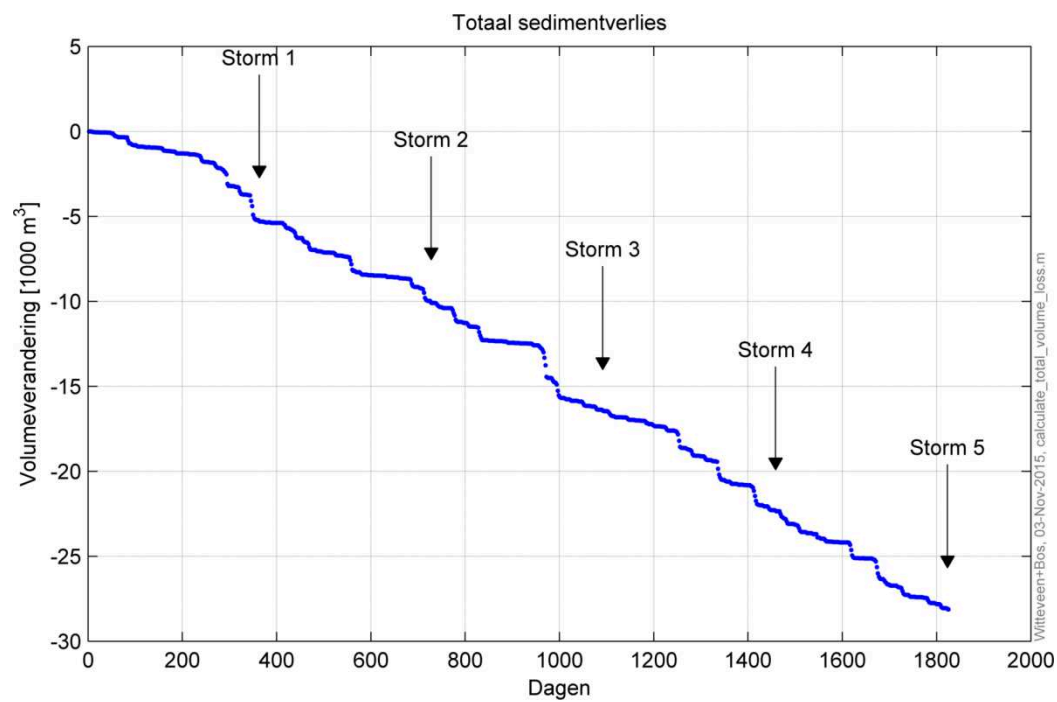
De gevolgen hiervan voor de ontwikkeling van de natuurbouw en de habitats (hoofdstuk 6) en voor het onderhoud (hoofdstuk 7) worden verderop in het rapport besproken.



**Afbeelding 5.14 Balansgebied plangebied (rood)**



**Afbeelding 5.15 Ontwikkeling totale verliezen uit het plangebied (over -5 m+NAP lijn)**







### **Aangroei strandhaak**

Voor de ecologische waarde van het gebied achter de strandhaak, is het belangrijk dat zout water het gebied in- en uitstroomt met het getij. De opening aan de noordzijde van de strandhaak moet daarvoor open blijven. Door het aangroeien van de strandhaak in noordelijke richting, ontstaat een 'spit' met een ligging boven NAP die de geul geleidelijk blokkeert. Vanwege de ontwikkeling van bodemleven, is het niet wenselijk om vaak onderhoud uit te voeren om de opening open te houden.

Aangezien het bergend oppervlak voor water in de opening en achter de strandhaak relatief klein is, stroomt relatief weinig water door de opening onder invloed van het getij. Door deze beperkte getijstrooming, heeft de opening van nature de neiging tot dichtslibben. Door de opening voldoende breed te maken, is het wel mogelijk om de opening voor langere tijd onderhoudsvrij aan te leggen. Hieronder wordt een prognose gegeven van de aangroei van de strandhaak en het al dan niet open blijven van de opening op de lange termijn.

Om de aangroei in de tijd te analyseren is een kustlangse doorsnede door de opening gemaakt op de locatie met de grootste sedimentatie (afbeelding 5.16). Uit de dwarsdoorsnede door de geul (afbeelding 5.17) blijkt dat op NAP -1 m de geul dichtslibt met een horizontale afstand van ongeveer 150 meter over 5 jaar. Jaarlijks komt dat neer op 30 meter. Deze ontwikkeling is in de eerste 5 jaar redelijk constant per jaar, vanwege de constante aanvoer van sediment door het langtransport. Aanbevolen wordt om uit te gaan van een constante aangroei van de strandhaak met 30 meter per jaar voor de eerste 10 jaar.

Op basis van de ontwikkeling van de opening in de eerste 5 jaar is een schatting gemaakt van ligging van de geulopening na 10 jaar (donkerblauwe, gestreepte lijn). Op dat moment is dan nog ongeveer 1/3 van het initiële doorstroomoppervlak onder NAP over. Na 15-20 jaar is de opening zodanig dichtgeslibd, dat geen instroom door het getij meer is onder NAP.

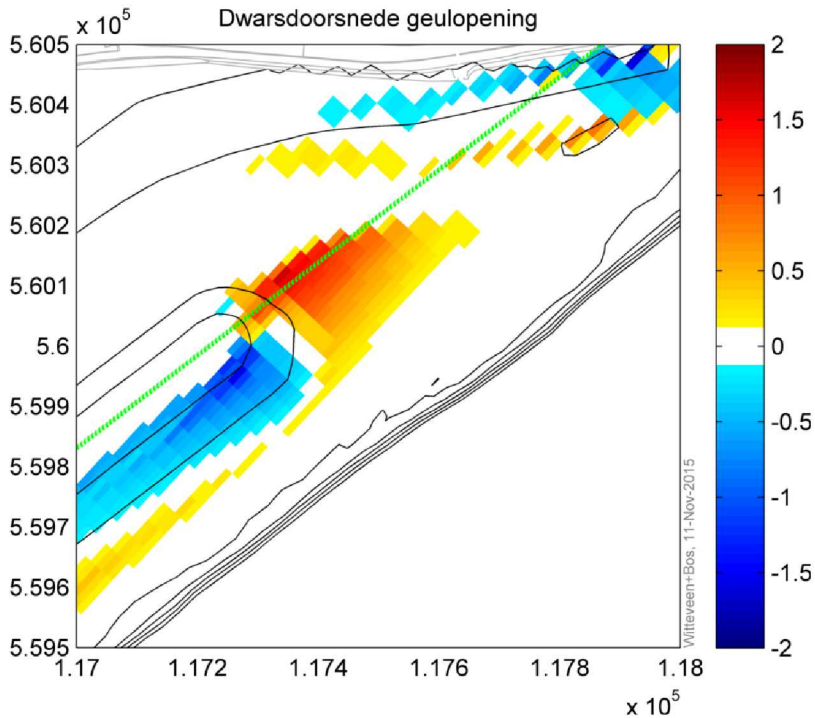
De ontwikkeling op nog langere termijn is lastig te voorspellen vanwege de onzekerheid in:

- hydraulische belasting (aantal/zwaarte stormen, waterstanden, golfklimaat);
- modelschematisatie;
- morfologische ontwikkeling gebied;
- gevolgen aanwezigheid slib;
- effect van gemalen;
- ecologische ontwikkeling.

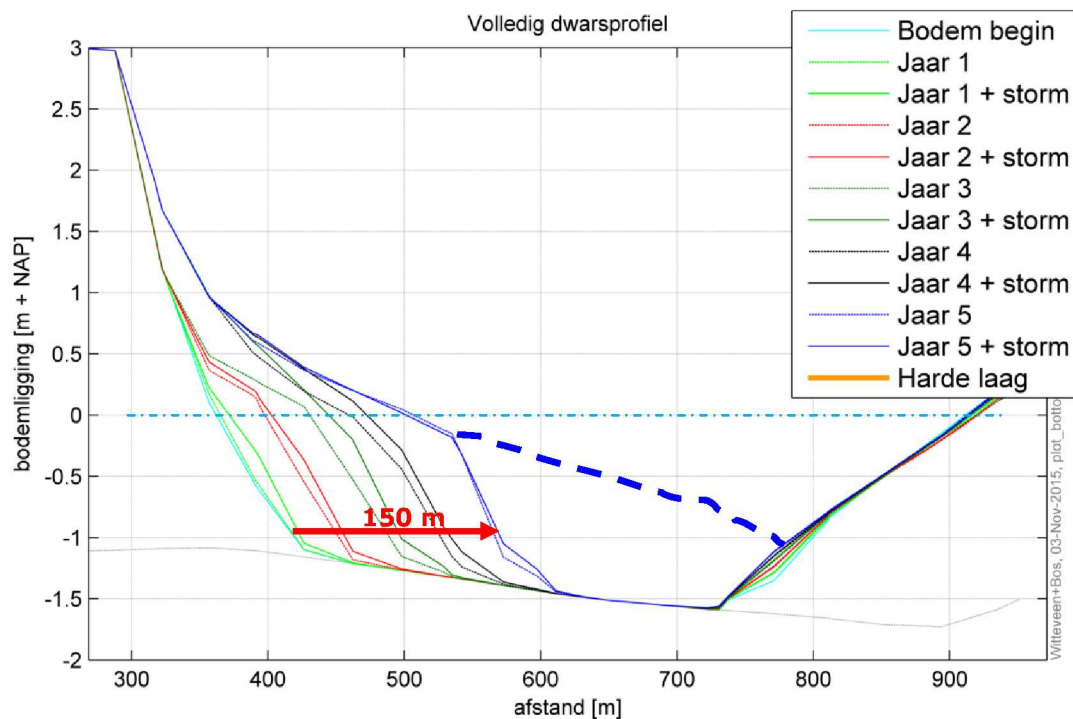
Het wordt daarom aanbevolen om uiteindelijk op basis van de werkelijke ontwikkeling van het gebied te bepalen of onderhoud noodzakelijk is. Daarbij is een onderhoudsvrije monding voor een periode van minstens 15 jaar een realistisch uitgangspunt voor het huidige ontwerp.



**Afbeelding 5.16** Locatie dwarsdoorsnede in geulopening aan de noordzijde van de strandhaak



**Afbeelding 5.17** Ontwikkeling dwarsdoorsnede geul noordzijde strandhaak





### 5.3 Gevoeligheidsanalyse

In een modelstudie worden aannames gedaan die invloed kunnen hebben op de uiteindelijke resultaten. Ook onzekerheden in het model, in de randvoorwaarden en natuurlijke variaties kunnen de resultaten beïnvloeden. Om de gevoeligheid van de resultaten hiervoor te onderzoeken, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd [ref. 10]. Daarin is een bandbreedte op de resultaten vastgesteld die rekening houdt met deze onzekerheden.

De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor verschillende variabelen die van invloed zijn op het uiteindelijke resultaat van de modelstudie en met name de berekende verliezen. Voor elk van deze variabelen is bepaald hoe ze de resultaten procentueel beïnvloeden voor een bepaalde afwijking van de aangenomen waarde of instelling.

Na afronding wordt er geadviseerd om een bandbreedte van **- 50 % tot + 100 %** aan te houden op de gepresenteerde resultaten.

### 5.4 Conclusies modelberekeningen

De morfologie van het ontwerp van de strandhaak is berekend voor een periode van 5 jaar met XBeach om inzicht te krijgen in het gedrag en de stabiliteit van het veiligheidsduin en het ontwerp van de strandhaak.

De morfologische ontwikkeling van het gebied bestaat voornamelijk uit:

1. een ontwikkeling richting een evenwichtssituatie door een verflauwing van het zeewaartse profiel langs het gehele gebied en het vormen van een kustboog;
2. het aangroeien van de strandhaak in noordelijke richting door een grote gradiënt in het langstransport bij het uiteinde van de strandhaak.

Over het algemeen zijn de morfologische veranderingen klein, is het ontwerp stabiel en is de vorm na 5 jaar vrijwel ongewijzigd. De verliezen vanuit de verschillende habitattypen en het totale gebied zijn klein ten opzichte van de totaal aangebrachte volumes zand. De arealen per habitat veranderen weinig en daarmee wordt na 5 jaar nog steeds voldaan aan de minimaal vereiste oppervlakte per habitat. Op basis hiervan kan worden gesteld dat het een stabiel ontwerp is, dat langere tijd (> 10 jaar) zonder onderhoud kan bestaan.

In de resultaten is te zien dat het veiligheidsduin na een periode van 5 jaar onaangetast is en op basis van extrapolatie van de resultaten is te verwachten dat ook na 10 jaar het geval is. De slijtlaag reduceert de golfaanval op het veiligheidsduin en dient als een buffer voor het veiligheidsduin. Het veiligheidsduin met slijtlaag wordt slechts aangevallen bij zware stormcondities.

Het totale verlies van zand uit het plangebied bedraagt netto ongeveer 5.600 m<sup>3</sup>/jaar. Daarnaast wordt zand opnieuw verdeeld tussen de verschillende habitattypen wat leidt tot een bruto erosie van ongeveer 14.000 m<sup>3</sup>/jaar, gemiddeld over het gehele plangebied. Dit heeft mogelijk effect op de ecologische waarden van de strandhaak en de sluitlaag en de onderhoudsstrategie moet daarop worden afgestemd in samenspraak met ecologen.



Op basis van de gevoeligheidsanalyse is een bandbreedte op de modelresultaten vastgesteld voor onzekerheden in het model, de randvoorwaarden en natuurlijke variaties. De bandbreedte die dient te worden aangehouden is -50 % tot +100 % op de berekende volumeveranderingen/verliezen. De totale netto verliezen uit het gebied liggen daarmee tussen 2.800 m<sup>3</sup> en 11.200 m<sup>3</sup> per jaar.

## 5.5 Aanbevelingen

Voor wat betreft de aangroei van de strandhaak en het dichtslibben van de monding wordt aanbevolen om uiteindelijk op basis van de werkelijke ontwikkeling van het gebied te bepalen of onderhoud noodzakelijk is. Daarbij is een onderhoudsvrije monding voor een periode van minstens 15 jaar een realistisch uitgangspunt voor het huidige ontwerp van de Prins Hendrikzanddijk.



## 6 Ontwikkeling natuurgedeelte en habitatarealen

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de ontwikkeling van het natuurgedeelte en de habitatarealen.

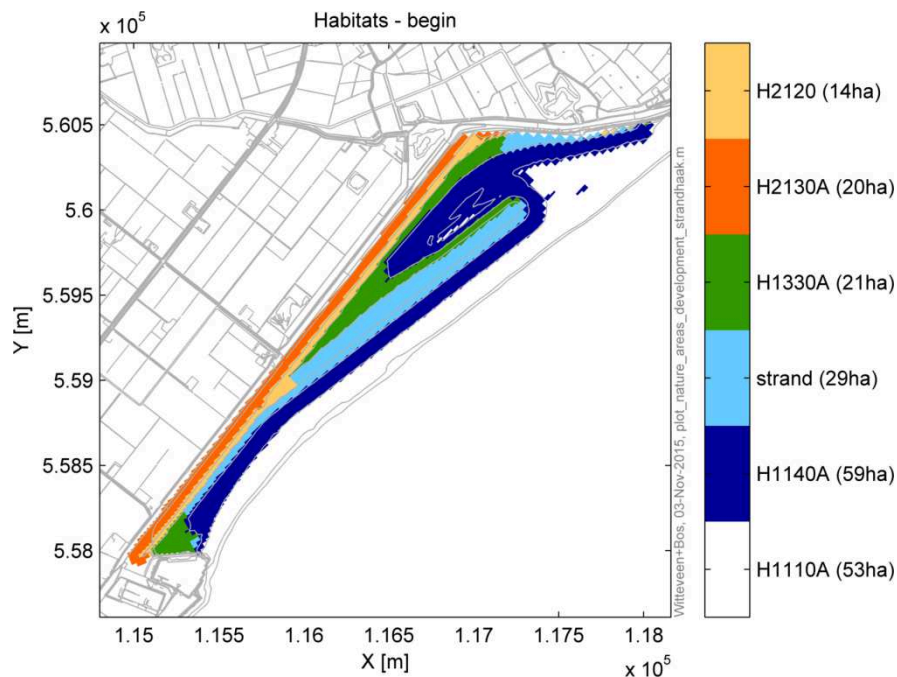
### 6.1 Arealen en volumes per habitat

Een andere doelstelling van de modelstudie is om beter inzicht te krijgen in de ontwikkeling en instandhouding van de habitatarealen en de daarbij beoogde habitattypen. Deze paragraaf gaat daar op in.

Voor de indeling van de habitattypen is tabel 6.1 gebruikt. In afbeelding 6.1 en afbeelding 6.2 is de ligging van habitats direct na aanleg en na 5 jaar gepresenteerd. In de ontwikkeling van de habitats is de eerder beschreven morfologische ontwikkeling van het gebied terug te zien. Het gebied ontwikkelt zich namelijk richting een evenwichtssituatie en de strandhaak groeit aan in noordwaartse richting. Het gevolg hiervan is dat het areaal inter-getijdengebied (H1140A) toeneemt ten koste van de permanent overstroomde zandbanken (H1110A).

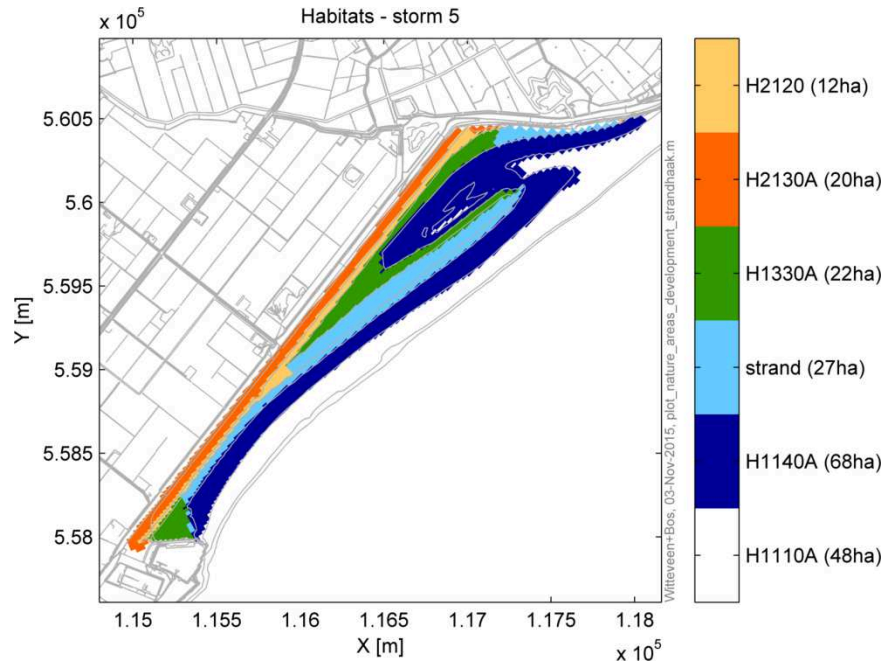
Het gebied is verder stabiel, waardoor de arealen van de overige habitats weinig veranderen. De strandhaak biedt voldoende bescherming om het laagdynamisch areaal schorren en zilte graslanden (H1330A) te handhaven.

**Afbeelding 6.1 Ligging en arealen habitats na aanleg**





**Afbeelding 6.2 Ligging en arealen habitats na 5 jaar**

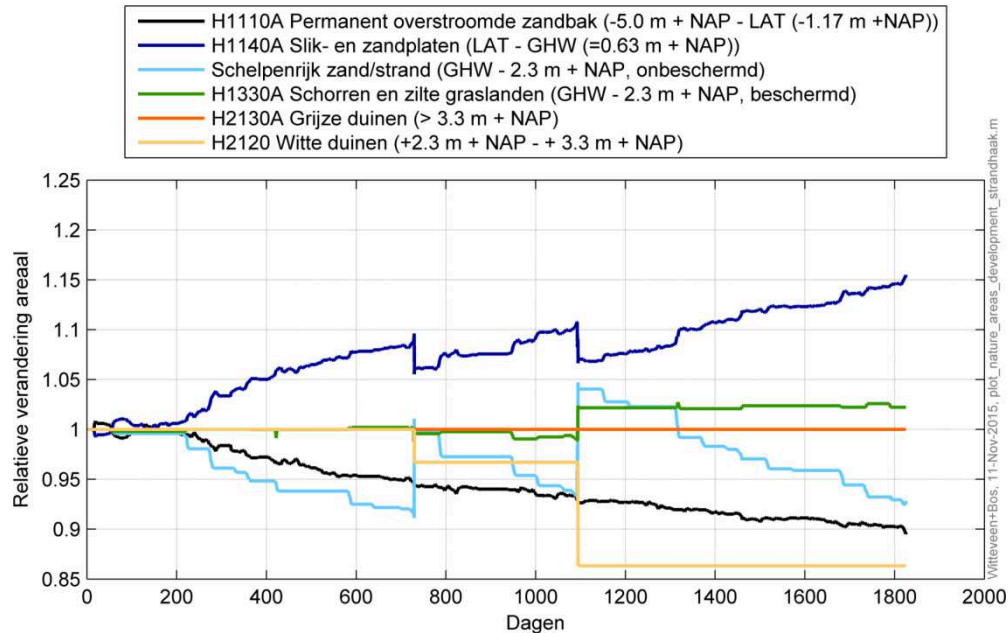


In afbeelding 6.3 is de relatieve ontwikkeling van oppervlakten per habitat te zien. De grootste verandering vindt plaats in de arealen H1110A en H1140A. H1140A neemt geleidelijk toe met ongeveer 3 % per jaar ten koste van H1110A. Daarnaast neemt het areaal strand af met ongeveer 1,5 % per jaar. Ook het areaal H2120 neemt af. Dit wordt veroorzaakt door afslag hoger in het dwarsprofiel tijdens de stormen in jaar 2 en 3.

In bijlage IV wordt de ontwikkeling van het areaal per habitattypen in de tijd weergegeven in aparte figuren.



### Afbeelding 6.3 Ontwikkeling relatieve oppervlakten habitats

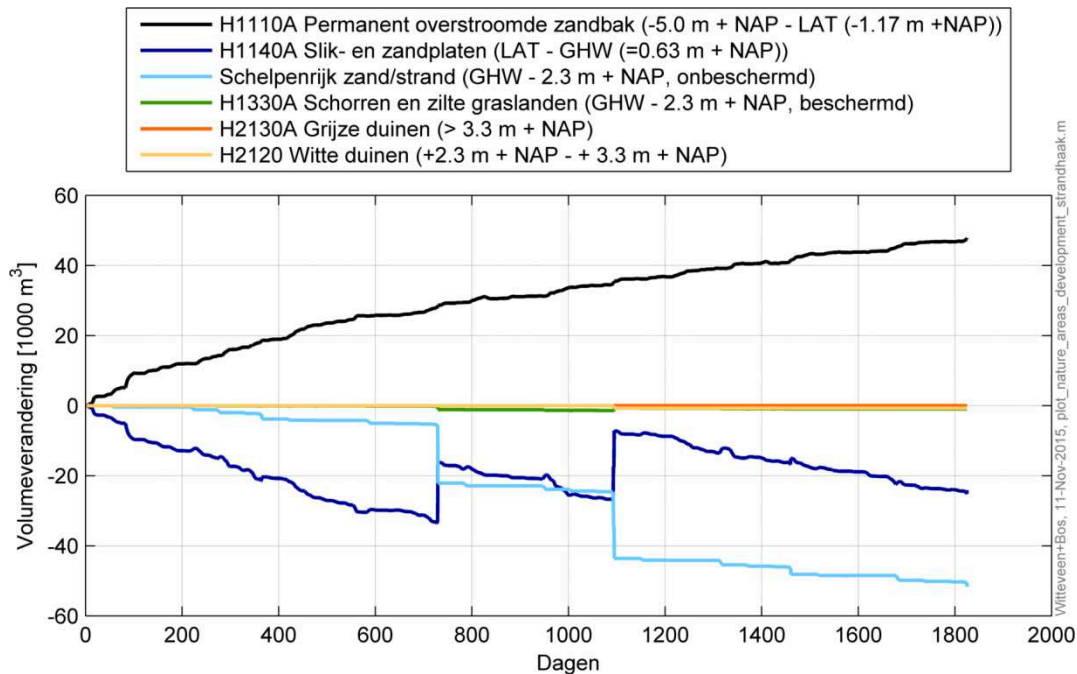


In afbeelding 6.3 is de ontwikkeling van de volumes zand te zien voor de verschillende habitats. Per tijdstap is de volumeverandering per cel berekend en toegewezen aan het op dat moment aanwezige habitat in die cel. Het is daardoor mogelijk dat het volume in een habitat toeneemt, terwijl het areaal afneemt. Dat is bijvoorbeeld het geval voor de permanent overstroomde zandbanken (H1110A). In dat habitat vindt veel sedimentatie plaats (toename volume), waardoor het gebied ondieper wordt en overgaat naar de habitat H1140A, wat leidt tot afname van het areaal.

De gebieden waar de golfaanval plaatsvindt (H1140A en strand) nemen in volume af en de lagere gelegen overstroomde zandbanken (H1110A) nemen in volume toe. De volumes in de overige habitats veranderen nauwelijks.



### Afbeelding 6.4 Verandering in volumes habitats



De veranderingen van de arealen en de aanwezige volumes per habitattypen zijn samengevat in afbeelding 6.4. De minimaal vereiste oppervlaktes worden ook na 5 jaar nog gehaald. De grootste verandering van areaal komt door het overgaan van H1110A in H1140A zoals hierboven besproken.

Naast de structurele jaarlijkse verliezen uit het gebied vindt ook een herverdeling van sediment over de habitats plaats. De verliezen voor de habitats strand en slik- en zandplaten (H1140A) zijn bijna drie keer zo groot als het totale nettoverlies uit het hele plangebied. Daarnaast treedt in de overstromde gebieden (H1110A) sedimentatie op ter grootte van ongeveer 9.000 m<sup>3</sup>/jaar.

Zoals blijkt uit bovenstaande is de relatie tussen habitatarealen en volume sedimentatie of erosie niet eenduidig. De onderhoudsstrategie moet hierop worden afgestemd. Daarbij spelen ook ecologische afwegingen een rol, zoals de gewenste terugkomsttijd in bepaalde habitats en de ecologische ontwikkeling van het gebied in de tijd.





**Tabel 6.1 Ontwikkeling arealen en volumes per habitattype na 5 jaar**

habitat	arealen [ha]			volumeverandering [m <sup>3</sup> /jaar] <sup>3</sup>
	minimaal vereist	initieel ontwerp	na 5 jaar	
H1110A	45	53	48	+ 9.000
H1140A	50	59	68	- 5.000
Strand	5	29	27	- 9.000
H1330A	20	21	22	0
H2130A	20	20	20	0
H2120	0	14	12	0

## 6.2 Beoordeling ecologische aspecten

De resultaten van deze studie laten zien, dat op basis van de gehanteerde uitgangspunten, de minimaal vereiste oppervlakten voor de verschillende habitats inpasbaar zijn in het ontwerp waarbij wordt voldaan aan de abiotische randvoorwaarden. Hiermee is de Prins Hendrikzanddijk realiseerbaar binnen de gestelde randvoorwaarden vanuit de Passende beoordeling. De morfologische modelstudie laat zien dat arealen per habitat in beperkte mate veranderen en dat na 5 jaar nog steeds wordt voldaan aan de minimaal vereiste oppervlakten per habitat. Verschuivingen van habitats vinden wel plaats, waardoor de arealen op termijn niet meer voldoen. De erosie (en morfologische activiteit) vindt vooral plaats binnen de van nature dynamische habitats. In de habitats waar een lage dynamiek is, vindt geen erosie plaats. Hierdoor kan vegetatie zich ontwikkelen.

Uit de morfologische analyse blijkt dat op de volgende locaties onderhoud benodigd is:

1. De slijtlaag in de actieve morfologische zone. De slijtlaag dient ten behoeve van de kustveiligheid onderhouden te worden. Dit onderhoud dient plaats te vinden in de buitenste rand van het veiligheidsduin en de strandhaak. Het onderhoudsvolume is circa 20.000 m<sup>3</sup>/jaar en kan waarschijnlijk geheel of grotendeels worden geplaatst in een habitattype dat niet gevoelig is voor onderhoud. De helmbegroeiing op het buitentalud van het veiligheidsduin vraagt slechts op beperkte schaal om onderhoud. Na herstel (met aanplant van helm) herstelt deze begroeiing zich relatief snel. De initiële omvang van de slijtlaag bepaalt de onderhoudsvolumes en -frequenties, een frequentie van lager dan 1/10 jaar is daarbij haalbaar.
2. De geulmonding tussen de strandhaak en sectie 8 dient ten behoeve van het voortbestaan van de lagune periodiek uitgebaggerd te worden. Het baggervolume bedraagt circa 6.400 m<sup>3</sup> per jaar. Vooral de kwaliteit van het bodemleven in het inter-getijdengebied en in het sublitoraal wordt door dit onderhoud aangetast.
3. Voor het overige is (lijkt) voor behoud van de gewenste habitatarealen geen extra (kust)onderhoud noodzakelijk. De afname van H1110A langs de buitenrand van het project als gevolg van erosie van de 'slijtlaag' is gering en vraagt niet om aanvullend onderhoud/baggeren. Vegetaties met een langere ontwikkeltijd, met name grijze duinen en kweldervegetaties, worden naar verwachting niet aangetast door periodieke erosie en onderhoud.

De algemene conclusie op basis van de morfologische modelstudie is dat het ontwerp op hoofdlijnen goed houdbaar is.

<sup>3</sup> Waarden zijn naar boven afgerond.



## 7 Onderhoudsbehoefte strandhaak

Op basis van de resultaten van de modellering kan de onderhoudsbehoefte worden vastgesteld. Onderhoud is nodig wanneer te grote verliezen optreden vanuit de verschillende arealen van strandhaak en slijtlaag en/of wanneer het veiligheidsduin aangetast dreigt te worden.

In het vervolg wordt de onderhoudsbehoefte beschouwd op basis van twee aspecten:

1. onderhoud kustveiligheid;
2. onderhoud strandhaak en slijtlaag.

Deze aspecten worden hieronder eerst apart beschouwd en vervolgens worden de gevolgen voor de totale, gezamenlijke onderhoudsbehoefte toegelicht, omdat het onderhoud voor deze aspecten grotendeels overlapt.

De resultaten van een modelstudie gaan altijd gepaard met een onzekerheid door bijvoorbeeld simplificaties in het model en de randvoorwaarden. Op basis van de gevoeligheidsanalyse (paragraaf 5.3) wordt daarom een bandbreedte aangegeven die in acht genomen dient te worden rondom de berekende verliezen.

### 7.1 Onderhoud kustveiligheid

Voor de kustveiligheid is het aanwezige zandvolume in de verschillende dwarsprofielen langs het veiligheidsduin van belang. Aangezien jaarlijks zand verloren gaat door erosie, is de slijtlaag voor het veiligheidsduin gerealiseerd. Hierdoor blijft op het moment van het optreden van de ontwerpstorm in elk geval minstens het profiel van het veiligheidsduin aanwezig.

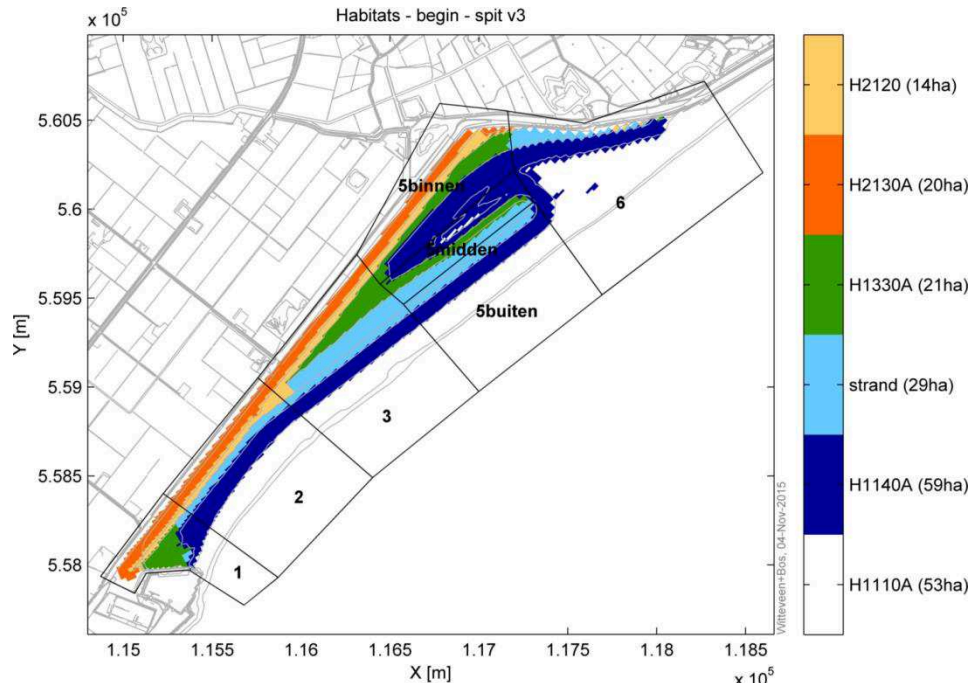
Dit betekent dat zand dat verloren gaat uit het plangebied door erosie op de lange termijn moet worden aangevuld om de kustveiligheid te garanderen. Uit de analyse van de modelresultaten blijkt dat de netto verliezen uit het plangebied ongeveer 5.600 m<sup>3</sup>/jaar bedragen. Daarnaast wordt er zand binnen het gebied verplaatst, zogenaamde bruto erosie. Hierdoor kan het volume lokaal zodanig afnemen, dat onderhoud voor kustveiligheid noodzakelijk is.

De bruto erosie in het gebied wordt geanalyseerd door het gebied op te delen in een aantal vakken (afbeelding 7.1). Voor elk vak wordt vervolgens de volumeverandering per jaar beschouwd (tabel 7.1). Het blijkt dat uit de vakken 1, 2, 3 en 5 ongeveer 11.000 m<sup>3</sup>/jaar aan zandvolume erodeert. Dit gaat deels verloren uit het gebied en draagt deels bij aan de aangroei van de strandhaak in vak 6.

Voor instandhouding van de natuurbouw en de slijtlaag is het op de lange termijn noodzakelijk om het volume van 11.000 m<sup>3</sup>/jaar terug te brengen naar de vakken waar het vandaan komt. Daarbij wordt opgemerkt dat in de vakken 3 en 5 veel extra volume aanwezig is door de strandhaak, zodat daar lange tijd zonder onderhoud kan worden volstaan. De vakken 1 en 2 zijn niet beschermd door de strandhaak, maar de verliezen zijn hier klein met in totaal ongeveer 1.000 m<sup>3</sup>/jaar.



**Afbeelding 7.1 Indeling plangebied in vakken**



**Tabel 7.1 Volumeverandering per vak per jaar**

<b>vak</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>totaal</b>
<b>volumeverandering [m<sup>3</sup>/jaar]</b>	-63	-815	-4.823	-5.430	5.321	-5.810

## 7.2 Onderhoud slijtlaag en strandhaak

Voor de instandhouding van de slijtlaag en strandhaak is het van belang hoe de arealen van de verschillende habitattypen zich op de lange termijn ontwikkelen. Hiervoor wordt per vak (afbeelding 7.2) en per habitattypen beschouwd hoe het aanwezige volume verandert in de tijd. Deze volumeverandering wordt gepresenteerd in tabel 7.2 in m<sup>3</sup>/jaar. In de tabel is daarnaast met rode getallen de erosie (=zandverliezen) per habitattypen aangegeven.

Allereerst is te zien dat erosie vrijwel alleen optreedt in de habitats H1140A en strand en dat sedimentatie voornamelijk optreedt in H1110A, zoals besproken in paragraaf 6.1. Onderhoud voor de slijtlaag en strandhaak is daarom vooral noodzakelijk binnen deze habitats.

De totale som van alle erosie die optreedt, geeft een indicatie van het benodigde onderhoud voor het in stand houden van de arealen. De totale erosie van alle vakken gezamenlijk bedraagt ongeveer 20.000 m<sup>3</sup>/jaar. Erosie uit het ene habitat, leidt vaak tot sedimentatie in het andere habitat. Hierbij is als uitgangspunt genomen dat alle erosie met extern zand dient te worden aangevuld. Dit uitgangspunt is gekozen, omdat de sedimentatie meestal niet op de gewenste plek ligt (bijvoorbeeld H1110A) en niet kan worden gebruikt om erosie te 'compenseren'.



Naast deze erosie treedt sedimentatie op in vak 6 waardoor de strandhaak aangroeit. Dit vindt plaats in de habitats H1110A en H1140A en bedraagt ongeveer 6.400 m<sup>3</sup>/jaar.

Het onderhoud voor de slijtlaag en strandhaak bestaat daarom uit twee aspecten:

1. compensatie van erosie: 20.000 m<sup>3</sup>/jaar; de erosie treedt voornamelijk op uit de habitats H1140A en van het strand. Onderhoud hiervan is goed mogelijk door middel van suppleties op het strand. Dit zand verplaatst zich dan op natuurlijke wijze door afslag naar de lagere delen in het dwarsprofiel, waaronder het habitat H1140A;
2. onderhoud strandhaak: 6.400 m<sup>3</sup>/jaar; de strandhaak groeit aan, waardoor het op de lange termijn wellicht noodzakelijk is om de monding uit te baggeren. De noodzaak hiervan hangt van een groot aantal factoren af en moet daarom worden afgestemd op de daadwerkelijke ontwikkeling van het gehele gebied (zie ook paragraaf 5.2.4: aangroei strandhaak).

De erosie en sedimentatie per vak is te vinden in de tabellen in bijlage IV.

**Tabel 7.2 Volumeverandering en erosie per habitattype per vak [m<sup>3</sup>/jaar]**

vak	1	2	3	5	6	totaal
H1110A bui	428	1.533	4.320	1.474	1.645	9.400
H1110A mid	0	0	0	0	0	0
H1140A bui	-353	-842	-5.621	-2.836	4.777	-4.875
H1140A mid	0	0	0	44	0	44
H1140A bin	0	0	0	133	0	133
strand bui	-168	-1.507	-3.522	-4.263	-1.019	-10.479
H1330A	30	0	0	19	-82	-34
H2130A	0	0	0	0	0	0
H2120	0	0	0	0	0	0
totaal erosie	-521	-2.348	-9.144	-7.100	-1.101	
erosie alle vakken	-20.000 (afgerond)					

### 7.3 Totale onderhoudsbehoefte

Op basis van de bovenstaande analyses bestaat de totale onderhoudsbehoefte voor het Strandhaak ontwerp uit:

- erosie van slijtlaag voor veiligheid:
  - netto verliezen: 5.600 m<sup>3</sup>/jaar;
  - bruto erosie vakken 1-5: 11.000 m<sup>3</sup>/jaar;
- natuurbouw:
  - compensatie erosie: 20.000 m<sup>3</sup>/jaar;
  - onderhoud strandhaak: 6.400 m<sup>3</sup>/jaar.

Deze getallen overlappen (grotten-)deels doordat bijvoorbeeld een deel van de erosie leidt tot netto verliezen uit het gebied en doordat de erosie in relatie tot instandhouding van de natuurbouw grotendeels dezelfde erosie betreft als de erosie in relatie tot kustveiligheid.

De bruto erosie die moet worden gecompenseerd voor het in stand houden van de natuurbouw is daardoor tegelijkertijd onderhoud aan de slijtlaag voor de kustveiligheid en compenseert ook de netto verliezen uit het gebied.



Het onderhoud van de strandhaak staat daar enigszins los van. Daarmee bestaat de totale onderhoudsbehoefte uiteindelijk uit 6.400 m<sup>3</sup>/jaar voor het onderhoud van de aangroeiende strandhaak en 20.000 m<sup>3</sup>/jaar voor het in stand houden van de slijtlaag, strandhaak en de kustveiligheid.

Het benodigde onderhoud varieert afhankelijk van de locatie in het gebied. De erosie is bijvoorbeeld het grootst in de vakken 3 en 5. Dit zijn de vakken waarin de strandhaak ligt waardoor een groot overschot aan zand aanwezig is. Wellicht is het daardoor mogelijk om langere tijd zonder onderhoud of met minimaal onderhoud te kunnen voldoen aan de eisen omtrent de kustveiligheid van het veiligheidsduin.

Aanbevolen wordt om bovenstaande getallen als richtlijn aan te houden voor het onderhoud en daarbij de strategie aan te passen aan de daadwerkelijke ontwikkeling van het gebied.

#### 7.4 Bandbreedte

Op basis van de gevoeligheidsanalyse wordt geadviseerd om een bandbreedte om de resultaten van deze modelstudie aan te houden van -50 % tot +100 %.

Voor het onderhoud betekent dit (verwachtingswaarde vetgedrukt):

- compensatie erosie: 10.000-40.000 m<sup>3</sup>/jaar (**20.000 m<sup>3</sup>/jaar**);
- onderhoud strandhaak: 3.200 -12.800 m<sup>3</sup>/jaar (**6.400 m<sup>3</sup>/jaar**).



## **8 Conclusies en aanbevelingen**

### **8.1 Conclusies**

#### **8.1.1 Morfologisch gedrag en stabiliteit**

De morfologie van de Prins Hendrikzanddijk is berekend voor een periode van 5 jaar met XBeach om inzicht te krijgen in het gedrag en de stabiliteit de Prins Hendrikzanddijk.

De morfologische ontwikkeling van het plangebied bestaat voornamelijk uit:

1. een ontwikkeling richting een evenwichtssituatie door een verflauwing van het zeewaartse profiel langs het gehele plangebied en het vormen van een kustboog;
2. het aangroeien van de strandhaak in noordelijke richting door een grote gradiënt in het langstransport bij het uiteinde van de strandhaak.

Over het algemeen zijn de morfologische veranderingen klein, is het ontwerp stabiel en is de vorm na 5 jaar vrijwel ongewijzigd. De verliezen vanuit de verschillende habitattypen en het totale gebied zijn klein ten opzichte van de totaal aangebrachte volumes zand. De arealen per habitat veranderen weinig en daarmee wordt na 5 jaar nog steeds voldaan aan de minimaal vereiste oppervlakte per habitat. Op basis hiervan kan worden gesteld dat het een stabiel ontwerp is, dat langere tijd (>10 jaar) zonder onderhoud kan bestaan.

Uit de resultaten van de modelstudie is te zien dat het veiligheidsduin na een periode van 5 jaar onaangetast is en op basis van extrapolatie van de resultaten is te verwachten dat ook na 10 jaar het geval is. De slijtlaag en strandhaak reduceert de golfaanval op het veiligheidsduin en dient als een buffer voor het veiligheidsduin. Het veiligheidsduin met slijtlaag wordt slechts aangevallen bij zware stormcondities.

Het totale netto verlies van zand uit het plangebied bedraagt netto ongeveer 5.600 m<sup>3</sup>/jaar. Op basis van de gevoeligheidsanalyse is een bandbreedte op de modelresultaten vastgesteld voor onzekerheden in het model, de randvoorwaarden en natuurlijke variaties. De bandbreedte die dient te worden aangehouden is -50 % tot +100 % op de berekende volumeveranderingen/verliezen. De totale netto verliezen uit het gebied liggen daarmee tussen 2.800 m<sup>3</sup> en 11.200 m<sup>3</sup> per jaar.

#### **8.1.2 Ontwikkeling natuurbouw**

De resultaten van deze studie laten zien, dat op basis van de gehanteerde uitgangspunten, de minimaal vereiste oppervlakten voor de verschillende habitats inpasbaar zijn in het ontwerp waarbij wordt voldaan aan de abiotische randvoorwaarden. Hiermee is de Prins Hendrikzanddijk realiseerbaar binnen de gestelde randvoorwaarden vanuit de Passende beoordeling.

De morfologische modelstudie laat zien dat arealen per habitat in beperkte mate veranderen en dat na 5 jaar nog steeds wordt voldaan aan de minimaal vereiste oppervlakten per habitat. Verschuivingen van habitats vinden wel plaats waardoor de arealen op termijn niet meer voldoen. De erosie (en morfologische activiteit) vindt vooral plaats binnen van nature dynamische habitats. In de habitats waar een lage dynamiek is vereist, vindt geen erosie plaats. Hierdoor kan hier vegetatie ontwikkelen.



Uit de morfologische analyse blijkt dat op de volgende locaties onderhoud benodigd is, te weten:

1. De slijtlaag in de actieve morfologische zone. De slijtlaag dient ten behoeve van de kustveiligheid onderhouden te worden. Dit onderhoud dient plaats te vinden in de buitenste rand van het veiligheidsduin en de strandhaak. Het onderhoudsvolume is circa 20.000 m<sup>3</sup>/jaar en kan waarschijnlijk geheel of grotendeels worden geplaatst in een habitatype dat niet gevoelig is voor onderhoud. De helmbegroeiing op het buitentalud van het veiligheidsduin vraagt slechts op beperkte schaal om onderhoud. Na herstel (met aanplant van helm) herstelt deze begroeiing zich relatief snel.  
De initiële omvang van de slijtlaag bepaalt de onderhoudsvolumes en -frequenties, een frequentie van lager dan eens per 10 jaar is daarbij haalbaar;
2. de geulmonding tussen de strandhaak en sectie 8 dient ten behoeve van het voortbestaan van de lagune periodiek uitgebaggerd te worden. Het baggervolume bedraagt circa 6.400 m<sup>3</sup> per jaar. Vooral de kwaliteit van het bodemleven in het inter-getijdengebied en in het sublitoraal (gebied onder de laagwaterlijn) wordt door dit onderhoud aangetast;
3. voor het overige is (lijkt) voor behoud van de gewenste habitatarealen geen extra (kust)onderhoud noodzakelijk. De afname van H1110A langs de buitenrand van het project als gevolg van erosie van de 'slijtlaag' is gering en vraagt niet om aanvullend onderhoud/baggeren. Vegetaties met een langere ontwikkeltijd, met name grijze duinen en kweldervegetaties, worden naar verwachting niet aangetast door periodieke erosie en onderhoud.

De algemene conclusie op basis van de morfologische modelstudie is dat de Prins Hendrikzanddijk op hoofdlijnen goed houdbaar is.

### **8.1.3 Onderhoudsbehoefte**

De onderhoudsbehoefte is gebaseerd op de bruto erosie die optreedt in de verschillende habitatypen. Deze erosie bedraagt ongeveer 20.000 m<sup>3</sup>/jaar en dient op de lange termijn te worden gecompenseerd om het gebied in stand te houden. Daarnaast vindt sedimentatie plaats aan de noordzijde van de strandhaak ter grootte van 6.400 m<sup>3</sup>/jaar. Dit moet op de lange termijn gecompenseerd worden om instroming van het getij in het gebied achter de strandhaak te handhaven.

Rekening houdend met de bandbreedte op de modelresultaten betekent dit voor het onderhoud (verwachtingswaarde vetgedrukt):

- compensatie erosie: 10.000-40.000 m<sup>3</sup>/jaar (20.000 m<sup>3</sup>/jaar);
- onderhoud strandhaak: 3.200-12.800 m<sup>3</sup>/jaar (6.400 m<sup>3</sup>/jaar).

Het benodigde onderhoud varieert afhankelijk van de locatie in het gebied. De erosie is het grootst in de vakken van de strandhaak. Hierdoor is een groot overschot aan zand aanwezig. Wellicht is het daardoor mogelijk om langere tijd zonder onderhoud of met minimaal onderhoud te kunnen voldoen aan de eisen omtrent de kustveiligheid van het duin.

Het initiële ontwerp ontwikkelt zich richting een dynamische evenwichtssituatie. De eerste jaren is de berekende bruto erosie daardoor groter en de bruto erosie neemt na het instellen van het morfologisch evenwicht af. De gepresenteerde getallen voor het benodigde onderhoud nemen daardoor af.



Wat betreft de strandhaak is een onderhoudsvrije monding voor een periode van minstens 15 jaar een realistisch uitgangspunt voor het huidige ontwerp van het plangebied.

Het toepassen van harde erosiebeschermende maatregelen is niet onderzocht in de voorliggende modelstudie. Het op een slimme manier toepassen van erosiebeschermende maatregelen kan de erosie significant reduceren. Gezien de relatief lage onderhoudsinspanning in de situatie zonder erosiebeschermende maatregelen wordt toepassing van beschermende maatregelen echter niet nodig geacht.

#### **8.1.4 Berekeningen maatgevende omstandigheden**

Bijlage VII geeft de resultaten van uitgevoerde erosieberekeningen voor maatgevende ontwerpcondities. De berekeningen zijn uitgevoerd met het Xbeach 2D model. Het volume duinafslag is bepaald en vergeleken met de resultaten van het vigerende 1D toetsmodel DUROS+. Daarnaast is het verlies door gradiënten in langstransporten berekend.

De conclusie wat betreft de toetsing van het veiligheidsduin is dat alle raaien ruimschoots voldoen qua veiligheid op basis van de XBeach-2D berekeningen. Het maximale verlies door gradiënten in het langtransport zoals berekend met XBeach-2D is zonder slijtlaag en strandhaak ongeveer 10 m<sup>3</sup>/m en met slijtlaag en strandhaak ongeveer 2 m<sup>3</sup>/m. Het wordt aanbevolen om geen extra toeslag voor DUROS+ toe te passen, omdat uit deze studie naar voren komt dat DUROS+ reeds een conservatieve inschatting van de afslag geeft groter dan 25 % ten opzichte van XBeach-2D.

## **8.2 Aanbevelingen**

### **8.2.1 Onderhoudsstrategie**

Op basis van de gehanteerde uitgangspunten in deze modelstudie is het ontwerp van de Prins Hendrikzanddijk stabiel en verandert weinig gedurende 5 jaar morfologische ontwikkeling. Hoe het plangebied zich precies ontwikkelt, is afhankelijk van een groot aantal factoren, waarbij veranderingen ook positieve gevolgen voor met name ecologie kunnen hebben. Op de lange termijn is het wellicht niet altijd noodzakelijk om het gebied in zijn originele staat in stand te houden.

Aanbevolen wordt om bovenstaande getallen als richtlijn aan te houden voor het onderhoud en daarbij de strategie aan te passen aan de daadwerkelijke ontwikkeling van het gebied.

### **8.2.2 Modelberekeningen**

Het toegepaste model is een goede tool om de morfologie van de Prins Hendrikzanddijk te onderzoeken. Door middel van de gevoeligheidsanalyse is daarbij een bandbreedte van een factor 2 op de resultaten bepaald. Om de nauwkeurigheid van het model verder te vergroten wordt het volgende aanbevolen:

- kalibratie met metingen; vanwege het ontbreken van meetgegevens, was het niet mogelijk om het model nauwkeurig te kalibreren, waardoor de golfhoogte en de golfasymmetrie in de morfologisch actieve zone wellicht worden onder- of overschat;





- onderzoek naar meenemen golf-stroominteractie in het model; de stroomsnelheden in de Texelstroom in kustlangse richting vlak voor de Prins Hendrikpolder zijn groot. Dit kan een effect hebben op de voortplanting van golven richting het plangebied.



## 9 Referenties

1. Witteveen+Bos, Planstudie dijkversterking Waddenzeedijk Texel, zandige oplossing Prins Hendrikpolder, 22 september 2011, referentie EDM70-5/torm/018.
2. Witteveen+Bos, Nadere studie zandige oplossing Prins Hendrikpolder, 2 maart 2012, referentie EDM70-15/winb/007.
3. Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), <http://www.ahn.nl/>, geraadpleegd: oktober 2014.
4. TU Delft, SWAN, <http://swan.tudelft.nl/>, geraadpleegd: 04-12-2014.
5. Deltares, Delft3D-FLOW\_Waddenzee-PACE\_j09\_v06 metadata Waterkwaliteitsmodelschematisatie, 1 januari 2014, kenmerk: 1207726-000-ZKS-0034.
6. [http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Referentiewaarden%20waterstanden\\_tcm174-326696.pdf](http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Referentiewaarden%20waterstanden_tcm174-326696.pdf), Waternormaal Oude Schild.
7. Duran-Matute, M., Gerkema, T., de Boer, G. J., Nauw, J. J., and Gräwe, U. (2014). Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study, *Ocean Sci.*, 10, 611-632, doi:10.5194/os-10-611-2014.
8. Deltares (2013a). XBeach voor WTI2017. 1207810-002-HYE-004.
9. McCall, R.T. et al., 2010. Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island. *Coastal Engineering*: doi:10.1016/j.coastaleng.2010.02.006.
10. De Vet, P.L.M., 2014. Modelling sediment transport and morphology during overwash and breaching events. Delft University of Technology. MSc. thesis. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:d4e21d44-fcef-498b-b2e5-83df3b0e0c47>.
11. Witteveen+Bos, PHZD Morfologische studie, 7 mei 2015, referentie EDM70-19-140/15-007.737.



**Bijlage I XBEACH Modelopzet**

## I.1. Introductie XBeach

Voor de berekeningen is de code van XBeach (Trunk, revision 4116; gedownload 16-10-2014 van oss.deltares.nl) lokaal gecompileerd voor gebruik op het Witteveen+Bos rekencluster. Lokaal zijn enkele wijzigingen in de code aangebracht.

Omdat XBeach constant verder ontwikkeld wordt, kunnen te allen tijde verbeteringen in het model worden aangebracht die van belang zijn voor de beoordeling van het ontwerp. Zo bieden recente studies [Ref. 9 en Ref. 10] wellicht mogelijkheden om een betere voorspelling van de overwash te doen.

In deze bijlage wordt verder voor een aantal relevante instellingen een extra toelichting gegeven.

## I.2. Toelichting parameter instellingen

### Brekerformulering

Voor de brekerformulering zijn de volgende (standaard) instelling aangehouden:

- stationair: formulering van *Baldock*,  $\gamma=0.7$ ;
- instationair: formulering van *Roelvink*,  $\gamma=0.55$ .

Deze instelling zijn aangehouden, omdat het XBeach model op basis van deze instellingen is afgeregeld voor een zandige, Hollandse kust. Op basis van een vergelijking met SWAN is te zien dat de berekende golfhoogtes goed overeenkomen tussen beide modellen in de stationaire modus. In de instationaire modus, zijn er kleine verschillen tussen de resultaten van XBeach en SWAN.

Door de gamma-instelling (verhouding  $H_s/h$  waarbij golven breken) van XBeach in de instationaire modus te verlagen, kunnen de resultaten van SWAN worden gereproduceerd (zie bijlage IV). Dit zou echter een significante verlaging van de gamma-instelling betekenen naar  $\gamma=0.4$ , die niet overeenkomt met de standaard waarde van  $\gamma=0.55$ . Omdat het hier een vergelijking tussen twee verschillende modellen betreft en er verder geen metingen beschikbaar zijn, is er onvoldoende onderbouwing om van de standaardwaarde af te wijken en is besloten om de standaardwaarde  $\gamma=0.55$  aan te houden.

### Zeewaartse rand

Op de zeewaartse rand wordt een (1D) zwak-reflecterende randvoorwaarde toegepast (*abs\_1D*). Deze randvoorwaarde zorgt ervoor dat golven, die reflecteren op de kust en de rand weer bereiken en loodrecht invallen, worden geabsorbeerd en niet nogmaals het domein in lopen. Daarnaast is de zeewaartse rand aangepast, zodat deze in kustlangse richting uniform is, om randeffecten te voorkomen. Daarna is de rand over enkele gridcellen geïnterpoleerd naar de werkelijke modelbodem.

Idealiter wordt de 2D versie van deze randvoorwaarde toegepast, zodat ook schuin invallende golven worden geabsorbeerd. Door problemen met de XBeach programma-code was dit niet mogelijk zonder randeffecten.

### Laterale rand

*Neumann* rand. Met deze randvoorwaarde zijn de gradiënten van stroming, golven en waterstanden over de laterale randen van het domein 0, zodat randeffecten worden geminimaliseerd. Daarnaast wordt de bodem over de laatste 4 - 5 cellen in kustlangse richting uniform gehouden, ook om randeffecten te voorkomen.

Met de meest recente programmacode van het model vindt er een interactie plaats tussen de invallende golven en de laterale randen, waardoor onrealistische stromingen en waterstandsvariaties ontstaan. Om dit tegen te gaan is de code zodanig aangepast dat de golfkrachten op de rand gelijk worden gesteld aan 0. Dit heeft verder geen gevolgen voor de resultaten in het interessegebied.

### **Bodemwrijving**

De bodemwrijving is gespecificeerd als een ruimtelijk variërende Chézy waarde die is berekend op basis van een ruwheid  $k=0.051$ . Dit komt overeen met de ruwheid in Delft3D, op basis waarvan de stroming is gekalibreerd. In de ondiepe delen ( $< 5$  m) is een standaardwaarde van  $C=55$  aangehouden, omdat de variaties van de waterstand daar een relatief groot effect hebben op de waterdiepte en daarmee op de berekening van de bodemwrijving. Daardoor zouden onrealistisch hoge waarden voor de bodemwrijving kunnen ontstaan.

### **Morfologie**

#### *Morfac*

De morfologische factor (morfac) is de factor waarmee de berekende bodemveranderingen per tijdstap worden vermenigvuldigd om met een relatief korte simulatie voor een langere periode morfologie te kunnen berekenen. Daarmee wordt gezorgd dat de rekentijd niet onnodig lang wordt.

De dagelijkse condities worden telkens voor een jaar doorgerekend, waarbij een morfoc=10 wordt toegepast om de rekentijd te verkorten. De duur van de simulatie is dan nog zodanig lang dat een groot deel van de getij-cyclus wordt doorgerekend, zodat het effect daarvan op de golven en de morfologie voldoende wordt meegenomen in de resultaten.

De stormen zijn relatief kort. Om voldoende van de variatie in waterstanden en golfcondities mee te nemen in de simulatie, is ervoor gekozen om de stormen zonder morfoc ('real-time') door te rekenen.

Het toepassen van de morfoc mag uiteraard de resultaten niet significant beïnvloeden. De resultaten van een berekening met en zonder morfoc zijn daarom vergeleken. Dit wordt beschreven in de bijlage over de gevoeligheden en tests die zijn gedaan, bijlage IV.

#### *Spin-up*

De zogenaamde 'spin-up'-tijd van het model dient om de hydrodynamica van het model eerst goed te laten inspelen, zodat eventuele inspeleffecten geen gevolgen hebben voor de morfologie.

Voor de simulaties met jaarlijkse condities wordt een volledige getij-periode (=12 uur) aangehouden als inspeeltijd. Voor de storms simulaties is de inspeeltijd vastgesteld op 1,5 uur, omdat er hier (bijna) geen stroming als gevolg van het getij is (alleen verticaal getij).

### **Golf-stroom-interactie**

De propagatie van golven kan worden beïnvloed door de aanwezigheid van stroming. Daarbij kan de golfrichting en -hoogte (licht) veranderen. Dit kan relevant zijn in het geval van de PHZD omdat er in de geul voor het plateau stroming door het getij plaatsvindt.

XBeach biedt in principe de mogelijkheid om te rekenen met deze golf-stroom-interactie ( $wci=1$ ). Voor de instationaire modus van XBeach is dit nog experimenteel en tests in het kader van dit project wijzen uit dat deze optie nog niet stabiel is. Ook in de instationaire

modus is de interactie niet volledige stabiel en zien we bij hoge hoeken van inval ongewenste effecten optreden. Een aantal voorbeelden hiervan worden gegeven in bijlage IV.

Op dit moment is er daarom onvoldoende vertrouwen in de golf-stroom-interactie in XBeach en is ervoor gekozen om te rekenen zonder deze optie.

### I.3. Voorbeeld params.txt - storm condities

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% XBeach parameter settings input file
%%%
%%% date: 28-May-2013 16:09:43
%%% function: xb_write_params
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%% General %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
morphology = 1
sedtrans = 1
mpiboundary = x

%%% Grid parameters %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
gridform = delft3d
xyfile = nw03_int.grd
thetanaut = 1
thetamin = 0
thetamax = 240
dtheta = 16
depfile = nw_depnew.dep

%%% Morphology %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
struct = 1
ne_layer = ne_depnew.dep
morfac = 1
morfacopt = 0
D50 = 0.0003
D90 = 0.00035
morstart = 5400

%%% Model time %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tstop = 172700
bedfricfile = chezy_nw_int.dep

%%% Wave boundary condition parameters %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
front = abs_1d
instat = 41
bcfile = storm.txt

break = roelvink2
gamma = 0.55

zs0file = surge.txt
tideloc = 2
paulrevere = sea
```

%%% Output variables %%%%%%%%%%

outputformat = netcdf

tstart = 0

tintg = 3600

tintm = 3600

tintp = 600

nglobalvar = 5

H

ue

ve

zb

zs

nmeanvar = 10

H

ue

ve

Susg

Svsg

Subg

Svbg

taubx

tauby

thetamean

npoints=5

121021.362 561736.272 %XBEACH1□

114345.491 556209.861 %XBEACH2□

116642.253 557818.342 %Texel4□

117359.373 558664.740 %Texel5□

118057.024 559575.496 %Texel6□

npointvar = 3

zs

ue

ve

#### I.4. Voorbeeld params.txt - dagelijkse condities

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% XBeach parameter settings input file
%%%
%%% date: 28-May-2013 16:09:43
%%% function: xb_write_params
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%% General %%%%%%%%%%%%%%
morphology = 1
sedtrans = 1
mpiboundary = x

%%% Grid parameters %%%%%%%%%%%%%%
gridform = delft3d
xyfile = nw03_int.grd
thetanaut = 1
thetamin = 0
thetamax = 240
dtheta = 16
depfile = nw_compleet.dep

%%% Morphology %%%%%%%%%%%%%%
struct = 1
ne_layer = nw_nelayer_int.dep
morfac = 14
morfacopt = 0
D50 = 0.0003
D90 = 0.00035
morstart = 43200

%%% Model time %%%%%%%%%%%%%%
tstop = 638000
bedfricfile = chezy_nw_int.dep

%%% Wave boundary condition parameters %%%%%%%%%%%%%%
front = abs_1d
instat = 40
bcfile = stat.txt
taper = 0.001

wavint = 600

break = baldock
gamma = 0.7

zs0file = surge.txt
tideloc = 2
zs0 = 0
paulrevere = sea
```



%%% Output variables %%%%%%%%%%

outputformat = netcdf

tstart = 0

tintg = 3600

tintm = 3600

tintp = 600

nglobalvar = 5

H

ue

ve

zb

zs

nmeanvar = 10

H

ue

ve

Susg

Svsg

Subg

Svbg

taubx

tauby

thetamean

npoints=5

121021.362 561736.272 %XBEACH1□

114345.491 556209.861 %XBEACH2□

116642.253 557818.342 %Texel4□

117359.373 558664.740 %Texel5□

118057.024 559575.496 %Texel6□

npointvar = 3

zs

ue

ve



## **Bijlage II Bepaling randvoorwaarden voor Xbeach met Delft3D pace**

## II.1. Validatie aanpassingen PACE model

Het PACE-model is opgezet als 3D stromingsmodel met zout-zoetmenging in de Waddenzee. Het bevat processen zoals dichtheidstransporten (onder andere saliniteit en warmte). Voor de PHZD zijn deze processen minder belangrijk.

### 2DH versus 3D

Met het PACE model zijn 3D-berekeningen en 2DH-berekeningen uitgevoerd. Dit gaf geen noemenswaardige verschillen voor de stroming in het interessegebied. Hierbij is heatflux achterwege gelaten, maar zijn wind en saliniteit wel meegenomen. Sommige coëfficiënten moeten veranderd worden voor een 2DH-berekening (bijvoorbeeld ruwheid Z0, wat veranderd is in White-Colebrook formulering). De eddy-viscositeit coëfficiënt is op 30 gezet en beginvoorwaarden zijn aangemaakt op basis van 3D modelresultaten.

Er is in de berekeningen geen noemenswaardige verandering in het stromingspatroon op verschillende locaties in de Waddenzee geconstateerd.

### Saliniteit

Vervolgens zijn simulaties met het 2DH model uitgevoerd zonder saliniteit en de resultaten zijn vergeleken met de eerdere simulaties. De saliniteit heeft geen grote invloed op het stromingspatroon en is niet verder meegenomen in de berekeningen.

### Horizontale eddy-viscosity coëfficiënt

Het effect van de horizontale eddy viscositeit coëfficiënt is bepaald door vergelijking van de 2DH simulaties (horizontale eddy viscositeit van 30 m<sup>2</sup>/s, 10 m<sup>2</sup>/s en 1 m<sup>2</sup>/s) en de originele 3D simulatie (horizontale eddy viscositeit van 5 m<sup>2</sup>/s).

Bij een horizontale eddy viscositeit van 30 m<sup>2</sup>/s wordt de dieptegemiddelde stroomsnelheid onderschat, terwijl bij een horizontale eddy viscositeit van 1 m<sup>2</sup>/s de dieptegemiddelde stroomsnelheid wordt overschat. Een horizontale eddy viscositeit van 10 m<sup>2</sup>/s gaf de beste overeenkomst met de 3D simulatie.

## II.2. Randvoorwaarden voor XBeach

Met het aangepaste Delft3D PACE model is een berekening uitgevoerd voor de maand mei. Het resultaat zijn onder andere waterstanden voor een periode van 31 dagen, wat neerkomt op iets meer dan tweemaal een volledige doortij-springtij cyclus.

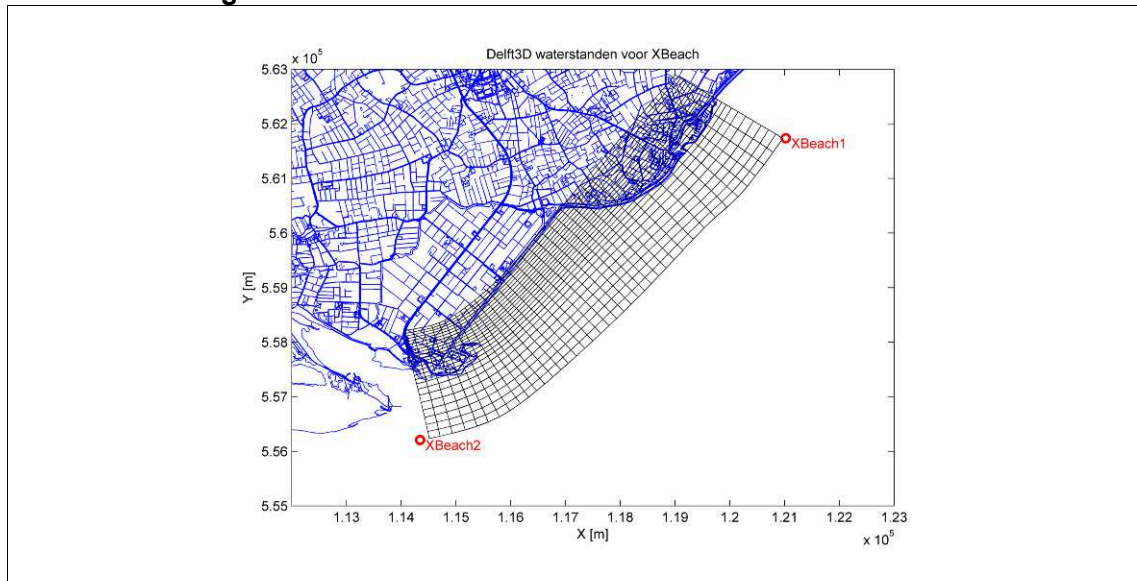
Voor de simulatie van het getij in XBeach zijn waterstanden benodigd op twee uitvoerpunten nodig op de zeewaartse rand van het grid. Deze uitvoerpunten zijn aan het model toegevoegd ter plaatse van de zeewaartse rand van het XBeach grid, zie afbeelding II.1. In XBeach wordt een periode van ongeveer 7 dagen doorgerekend, waarvoor een periode van waterstanden geselecteerd moet worden uit de totale periode van 31 dagen.

De resulterende waterstanden zijn weergegeven in afbeelding II.2, onderste afbeelding. Het PACE model is gekalibreerd inclusief opzet van de waterstand door wind (bovenste twee figuren, opzet: zwarte lijn in onderste figuur)) en de stormopzet is ook verwerkt in de randvoorwaarden van het PACE model. Het effect van de wind op de waterstand komt daarom terug in de randvoorwaarden voor XBeach. Daar is rekening mee gehouden door een representatieve periode van circa 7 dagen te kiezen, waarin voldoende spreiding voorkomt in de waterstanden. Dit is aangegeven met de rode rechthoek in afbeelding. In deze periode is er een goede spreiding van waterstanden tussen NAP - 1 m en NAP + 1 m.

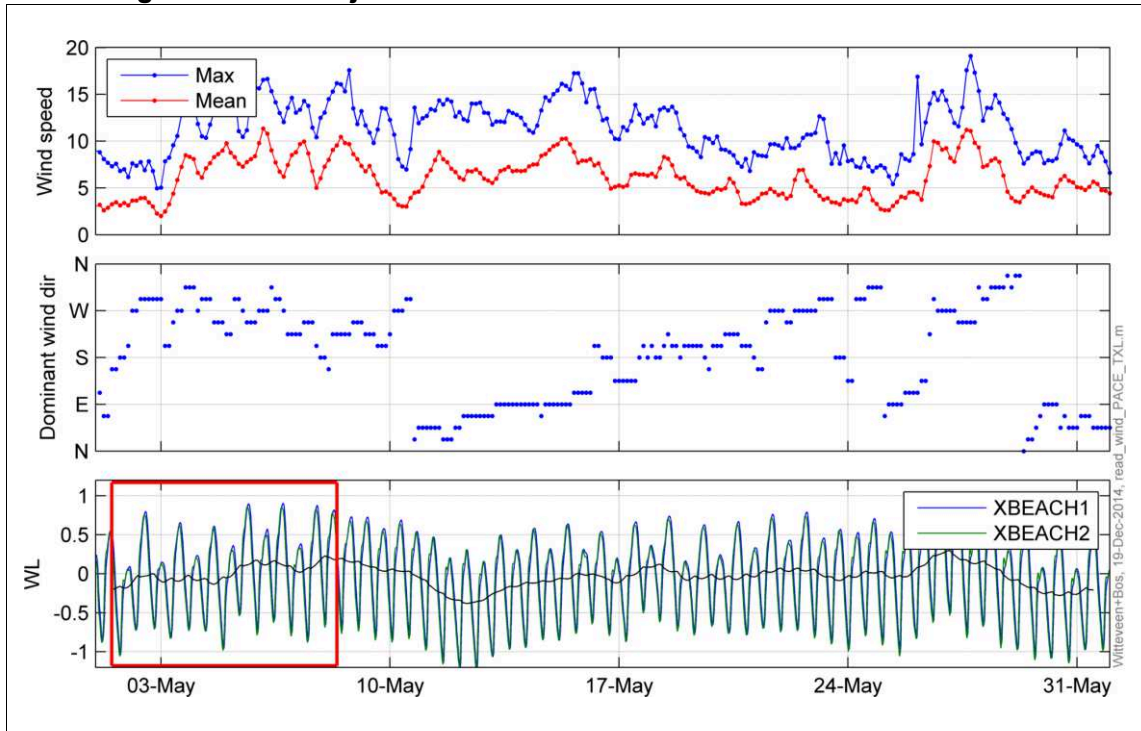
Voor de randvoorwaarden voor de simulaties met de dagelijkse condities voor de verschillende jaren is geen rekening gehouden met de correlatie tussen wind, waterstanden en golven. Het morfologisch golfklimaat dat voor deze simulaties is bepaald met SWAN op basis van windstatistiek, wordt aangenomen onafhankelijk te zijn van de wind en de stormopzet en het effect daarvan op de waterstand in het Delft3D PACE model.

Deze aanname is acceptabel, omdat het voor de morfologie met name belangrijk is dat er voldoende variatie is in waterstanden en stroomsnelheden in combinatie met de verschillende condities.

### Afbeelding II.1. Locatie waterstandspunten Delft3D ten opzichte van XBeach model-grid



**Afbeelding II.2. Selectie tijdserie waterstanden uit Delft3D**



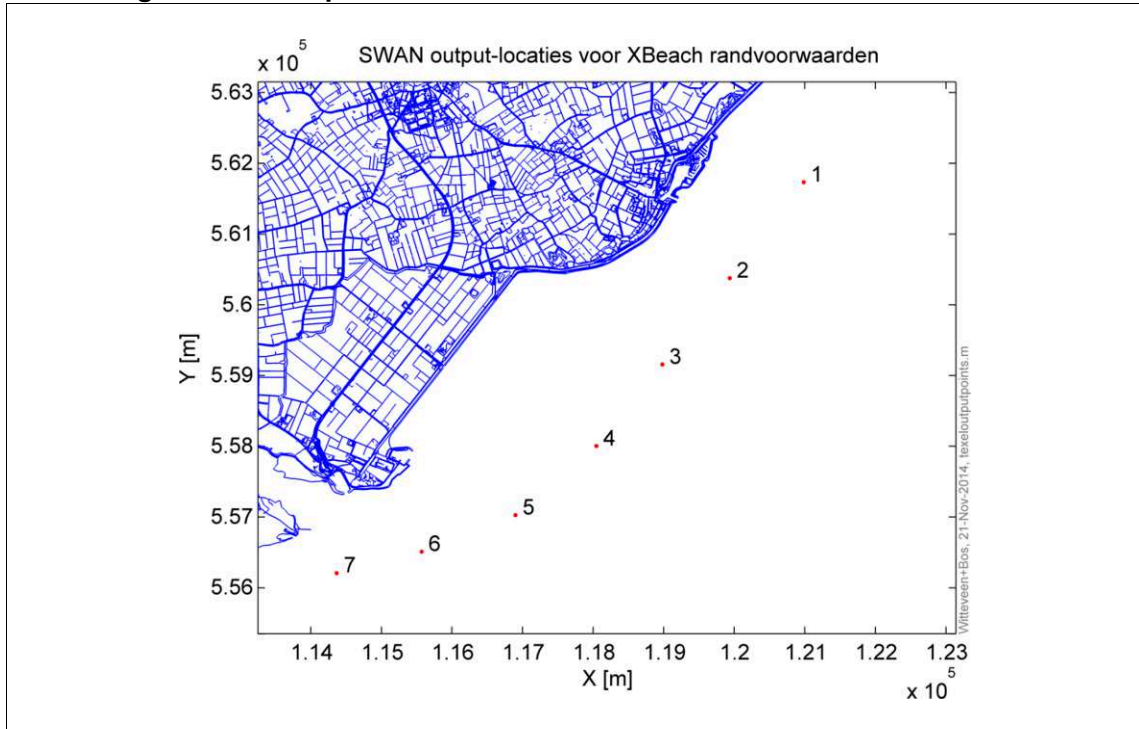


### **Bijlage III Bepaling morfologisch golfklimaat en stormen met SWAN**

### III.1. SWAN modelbeschrijving

Om de golven te modelleren in XBeach zijn er op de zeewaartse modelrand golfcondities opgelegd die berekend zijn met het WTI Waddenzee SWAN-model. Daarvoor zijn in SWAN 7 uitvoerpunten vastgesteld die overeenkomen met modelrand van het XBeach grid (afbeelding III.1).

**Afbeelding III.1. Uitvoerpunten XBeach in SWAN**

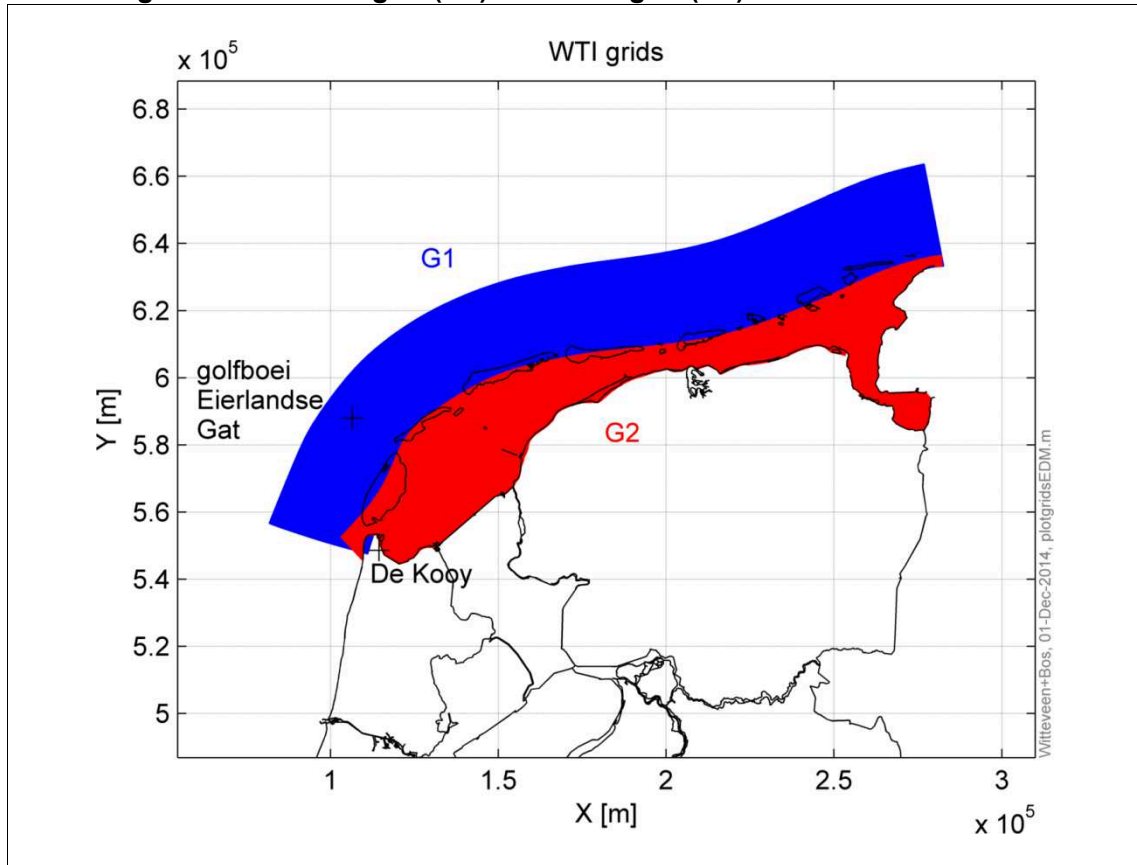


SWAN (Simulating WAVes Nearshore) is in staat een realistische schatting van golfparameters in kustgebieden, estuaria en meren te geven bij gegeven wind, bodem en stromingscondities. SWAN is ontwikkeld en wordt onderhouden door de Technische Universiteit Delft [ref. 4.] Het is geverifieerd met veldmetingen en fysische modeltesten. Het model is gebaseerd op de golfactie balansvergelijking (of golfenergie balans, in afwezigheid van stroming).

Het WTI (SWAN) model maakt deel uit van het instrumentarium om de Hydraulische Randvoorwaarden (HR2011) af te leiden voor de Nederlandse Waddenzee. Het model is daarom gekalibreerd voor extreme condities. In dit project wordt het model gebruikt voor het bepalen van dagelijkse condities tot condities met een herhalingsperiode van 10 jaar. Het model is gebruikt om randvoorwaarden voor het XBeach model te genereren. We verwachten dat het model voor dagelijkse condities niet tot significante afwijkingen zal leiden ten opzichte van een model dat gekalibreerd is voor deze mildere condities.

Het WTI Waddenzee SWAN-model is opgebouwd uit twee geneste curvilineaire grids; een buitengrid (G1) en een binnengrid (G2). De resolutie van het binnengrid is met een factor 3 gereduceerd ten opzichte van het originele WTI model om de rekentijd van het model te beperken. De resulterende grids zijn in afbeelding III.2. weergegeven.

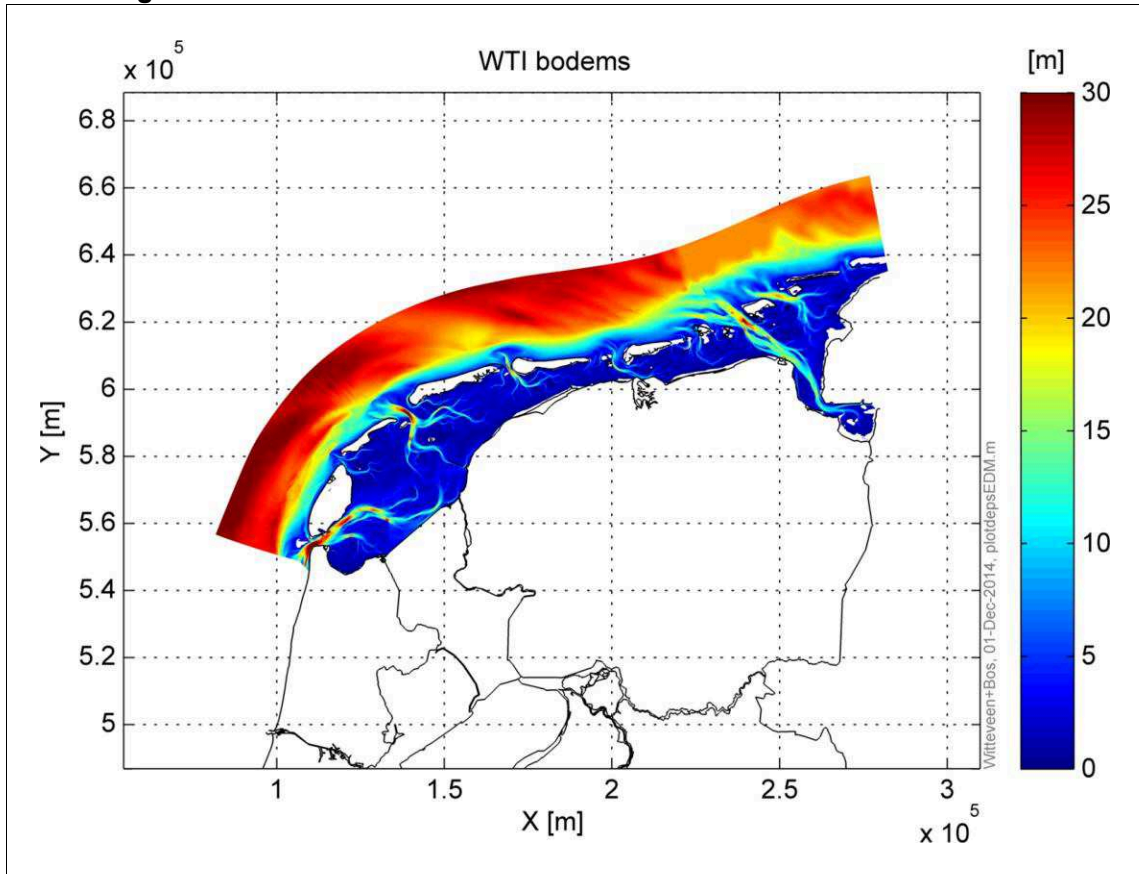
**Afbeelding III.2. WTI buitengrid (G1) en binnengrid (G2)**



De bodemligging van het model is overgenomen van het WTI Waddenzee model. De bodemligging is weergegeven in afbeelding III.3.



**Afbeelding III.3. Bodem van de WTI modellen**



De volgende fysische en numerieke instellingen zijn toegepast in de SWAN berekeningen (ongewijzigd ten opzichte van het WTI Waddenzee model).

```
GEN3 WESTH
WCAP WESTH cds2=5.00000e-05 br=0.00175000 p0=4.00000 powst=0.00000 powk=0.00000 &
  nldisp=0.00000 cds3=0.800000 powfsh=1.00000
QUAD iquad=2 lambda=0.250000 Cnl4=3.00000e+07
LIMITER ursell=10.0000 qb=1.00000
FRIC JONSWAP cfjon=0.0380000
BREA WESTH alpha=0.960000 pown=2.50000 bref=-1.39630 shfac=500.000
TRIAD trfac=0.10000 cutfr=2.50000
NUM STOPC dabs=0.00 drel=0.01 curvat=0.001 npnts=99. STAT mxist=50 alfa=0.001
```

### III.2. Randvoorwaarden voor SWAN

Golven in dit deel van de Waddenzee worden over het algemeen lokaal opgewerkt en komen vrij snel tot verzadiging qua golfhoogte en periode. De westelijke modelrand van SWAN ligt vrij dicht op de projectlocatie. Er is een initieel golfspectrum op het buitenmodel opgelegd om de lokale golfgroei door wind voldoende te laten ontwikkelen. Deze randvoorwaarden zijn bepaald door een analyse van een tijdserie van de golfboei Eierlandse gat. De afgeleide randvoorwaarden zijn op alle open randen van het buitenste grid opgelegd.

### III.3. Berekening randvoorwaarden voor XBeach

Voor de bepaling van deze randvoorwaarden is een tijdserie (34 jaar) van windstation de Kooy geanalyseerd. Er is een frequentietabel opgesteld voor windsnelheid en windrichting (bins van 30 graden). Voor de gevonden combinaties zijn de golfparameters (golfhoogte, -periode en -richting) bepaald bij het Eierlandse Gat en de waterstanden bij Den Oever en Texel. Dit heeft geleid tot 113 combinaties van windparameters, golfparameters en waterstanden, weergegeven in tabel III.1, tabel III.2 en III.3, tabel III.4 en tabel III.5.

In het SWAN model zijn uitvoerpunten ter plaatse van de zeevaartse rand van het XBeach model gelegd om randvoorwaarden voor het XBeach model te genereren. De verschillen tussen de uitvoerpunten zijn zodanig klein dat één uitvoerpunt is geselecteerd dat representatief wordt geacht voor de golven die het interessegebied bereiken.

**Tabel III.1. Golfhoogte (Hs) bij het Eierlandse Gat bij gegeven windrichting en -snelheid. De kleur correspondeert met de golfhoogte van laag (blauw) naar hoog (rood)**

		windrichting [°N]													
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330		
		30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360		
open water windsnelheid [m/s]	0	2	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	
		2	4	1.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1
		4	6	1.1	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	0.9	0.9	1.0	1.2	1.3	1.4
		6	8	1.5	1.1	1.0	1.0	1.0	1.3	1.3	1.2	1.4	1.6	1.8	1.9
		8	10	1.8	1.5	1.4	1.2	1.2	1.5	1.5	1.4	1.8	2.1	2.3	2.4
		10	12	2.7	1.9	1.7	1.6	1.6	1.9	1.9	1.8	2.3	2.7	3.1	3.2
		12	14	3.5	2.4	2.2	1.8	1.9	2.2	2.3	2.3	2.9	3.4	4.0	3.9
		14	16	4.6	2.7	2.4	2.4		2.4	2.6	2.9	3.5	4.1	4.7	4.8
		16	18		3.5				3.0	3.0	3.4	4.1	4.5	5.3	
		18	20							3.3	3.8	4.8	4.7	5.7	
		20	22							3.8	3.9	4.9	5.7		
		22	24							3.8		5.3			
		24	26												
		26	28												
	28	30													
	30	32													

**Tabel III.2. Golfperiode (Tm02) bij het Eierlandse Gat bij gegeven windrichting en - snelheid. De kleur correspondeert met de periode van laag (blauw) naar hoog (rood)**

		windrichting [°N]												
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
		30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	
open water windsnelheid [m/s]	0	2	4.8	4.7	4.8	4.7	4.7	4.7	4.8	4.7	4.7	4.7	4.8	4.9
	2	4	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.4	4.4	4.5	4.6	4.6	4.7	4.8
	4	6	4.6	4.4	4.3	4.0	4.0	4.2	4.2	4.3	4.5	4.7	4.8	4.8
	6	8	4.6	4.3	4.2	4.0	3.9	4.3	4.3	4.3	4.6	4.9	5.1	5.1
	8	10	4.9	4.5	4.4	4.1	4.0	4.4	4.5	4.4	4.8	5.2	5.5	5.5
	10	12	5.6	4.8	4.7	4.5	4.3	4.8	4.8	4.7	5.2	5.6	6.1	6.2
	12	14	6.3	5.3	5.1	4.6	4.5	5.0	5.1	5.2	5.7	6.2	6.8	6.7
	14	16	7.4	5.5	5.3	5.1		5.2	5.4	5.6	6.1	6.6	7.3	7.4
	16	18		6.3				5.6	5.6	6.0	6.5	6.9	7.7	
	18	20							5.8	6.2	6.9	6.9	8.0	
	20	22							6.2	6.2	6.9	7.6		
	22	24							6.1		7.3			
	24	26												
	26	28												
	28	30												
	30	32												

**Tabel III.3. Golfrichting (°N) bij het Eierlandse Gat bij gegeven windrichting en - snelheid**

		windrichting [°N]												
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
		30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	
open water windsnelheid [m/s]	0	2	330	321	319	310	306	307	317	317	316	322	329	333
	2	4	333	316	260	233	243	267	280	293	307	314	328	336
	4	6	327	37	43	56	196	227	238	264	290	309	329	339
	6	8	317	28	40	56	157	219	228	244	274	306	330	339
	8	10	27	29	43	60	160	216	225	237	269	299	327	340
	10	12	33	32	45	58	149	215	224	233	264	292	325	339
	12	14	35	33	45	55	103	213	223	231	263	292	322	340
	14	16	342	37	48	57		214	222	230	261	291	321	340
	16	18		20				213	222	228	259	287	319	
	18	20							221	229	262	284	315	
	20	22							221	230	255	283		
	22	24							219		243			
	24	26												
	26	28												
	28	30												
	30	32												

**Tabel III.4. Gemiddelde waterstanden Texel (°NAP + m) bij gegeven windrichting en -snelheid. De kleur correspondeert met de waterstand van laag (blauw) naar hoog (rood)**

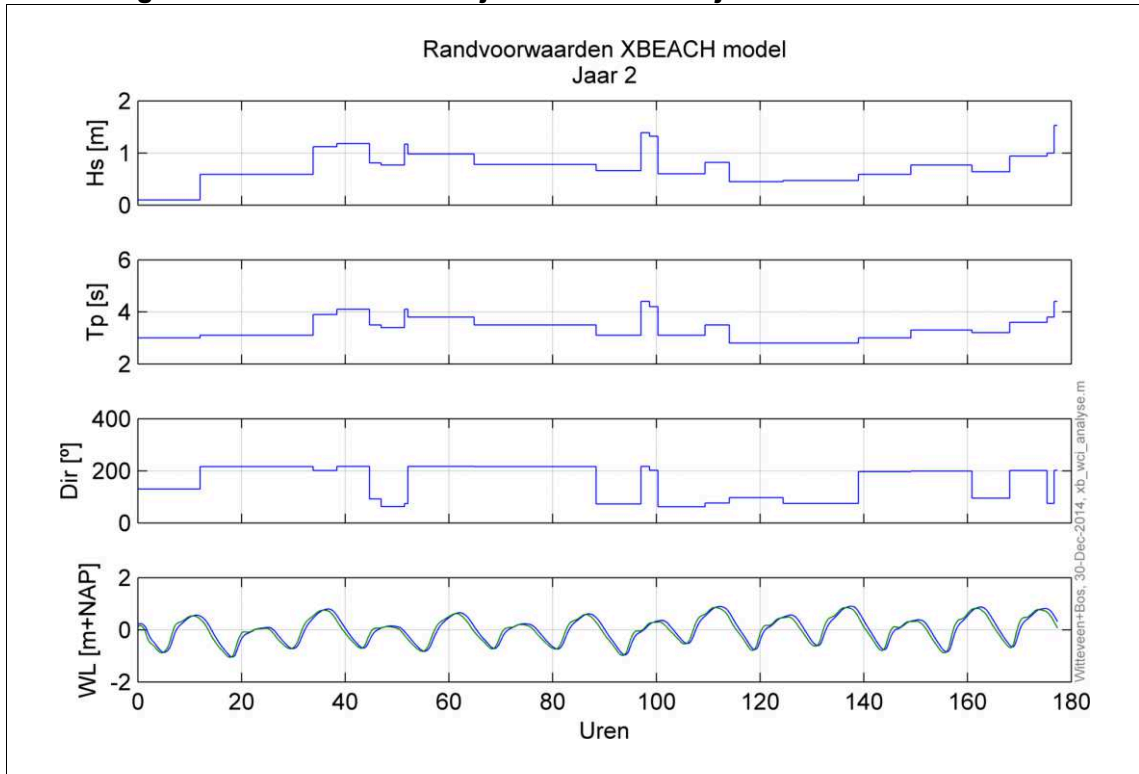
		windrichting [°N]											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
		30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
open water windsnelheid [m/s]	0 2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1
	2 4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4 6	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
	6 8	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0
	8 10	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2
	10 12	-0.1	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5	0.3
	12 14	0.0	-0.3	-0.6	-0.6	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.7	0.8	0.4
	14 16	0.1	-0.5	-0.7	-1.0		0.0	0.2	0.3	0.6	0.9	1.1	0.8
	16 18		-0.5				0.0	0.2	0.4	0.9	1.0	1.3	
	18 20							0.3	0.4	1.1	1.2	1.4	
	20 22							0.4	0.5	1.1	1.2		
	22 24							0.1		1.0			
	24 26												
	26 28												
	28 30												
30 32													

**Tabel III.5. Percentage van voorkomen windcondities. De kleur correspondeert met het percentage van voorkomen van laag (blauw) naar hoog (rood)**

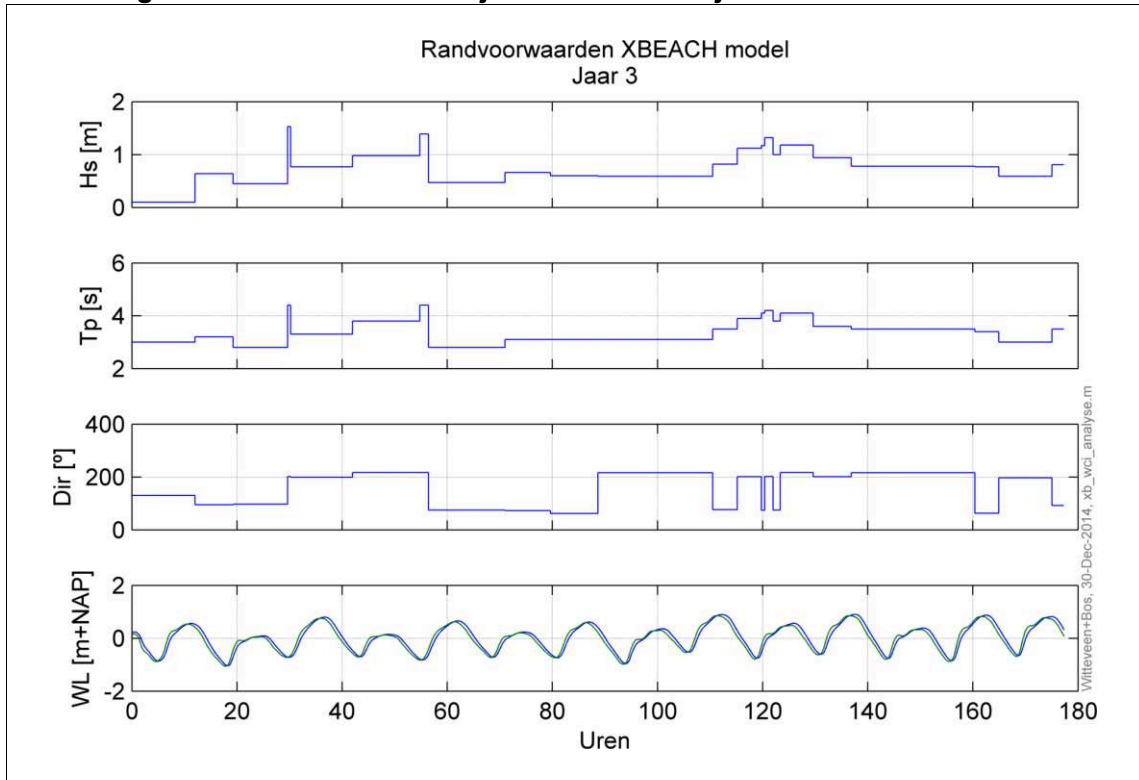
		windrichting [°N]											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
		30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
open water windsnelheid [m/s]	0 2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.7	0.6	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4
	2 4	1.4	1.5	1.6	1.3	1.6	2.4	1.6	1.2	1.5	1.5	1.4	1.1
	4 6	1.4	2.4	2.0	2.3	2.0	2.7	1.8	2.5	2.6	1.8	1.4	1.7
	6 8	1.2	1.6	1.7	1.2	0.7	1.5	1.5	3.0	2.3	2.0	1.9	1.3
	8 10	0.5	1.0	1.0	0.8	0.5	0.8	1.2	2.5	1.9	1.8	1.0	0.8
	10 12	0.2	0.5	0.5	0.3	0.1	0.4	1.3	2.7	1.5	0.8	0.7	0.3
	12 14	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.8	1.5	0.9	0.6	0.2	0.1
	14 16	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0
	16 18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0
	18 20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0
	20 22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	22 24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	24 26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	26 28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	28 30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30 32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

### III.4. Morfologisch klimaat jaar 2 en 3

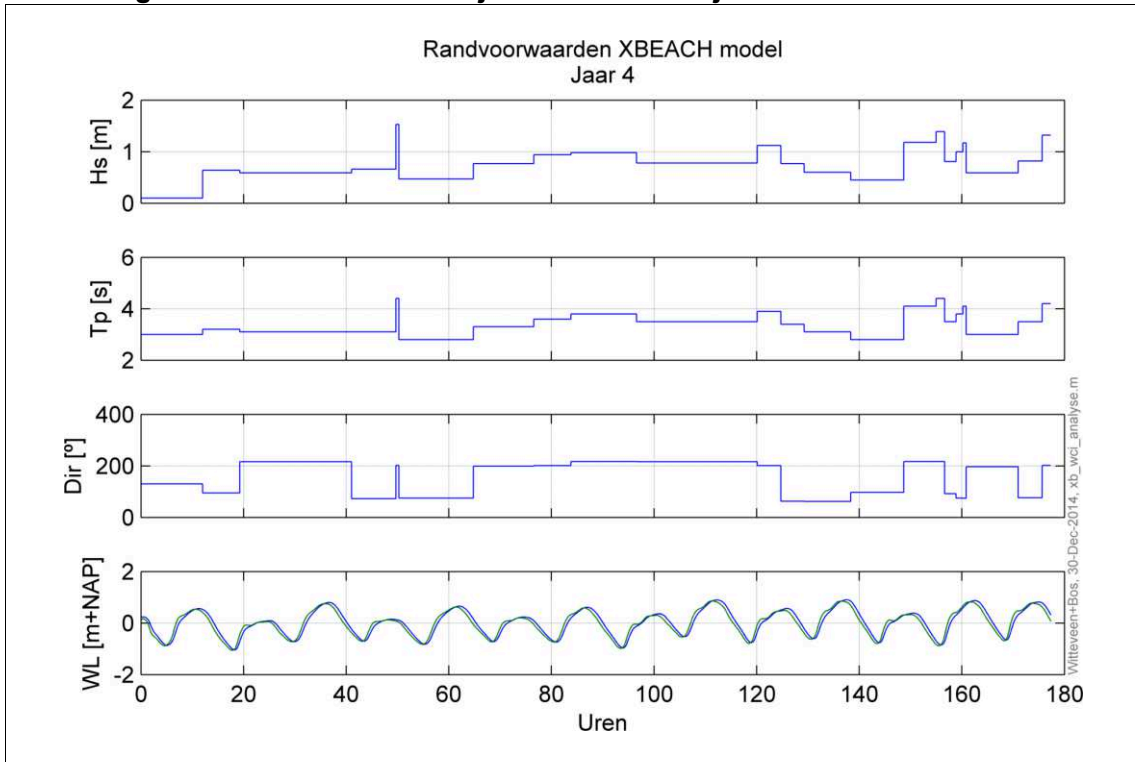
Afbeelding III.4. Randvoorwaarden jaarrond conditie jaar 2



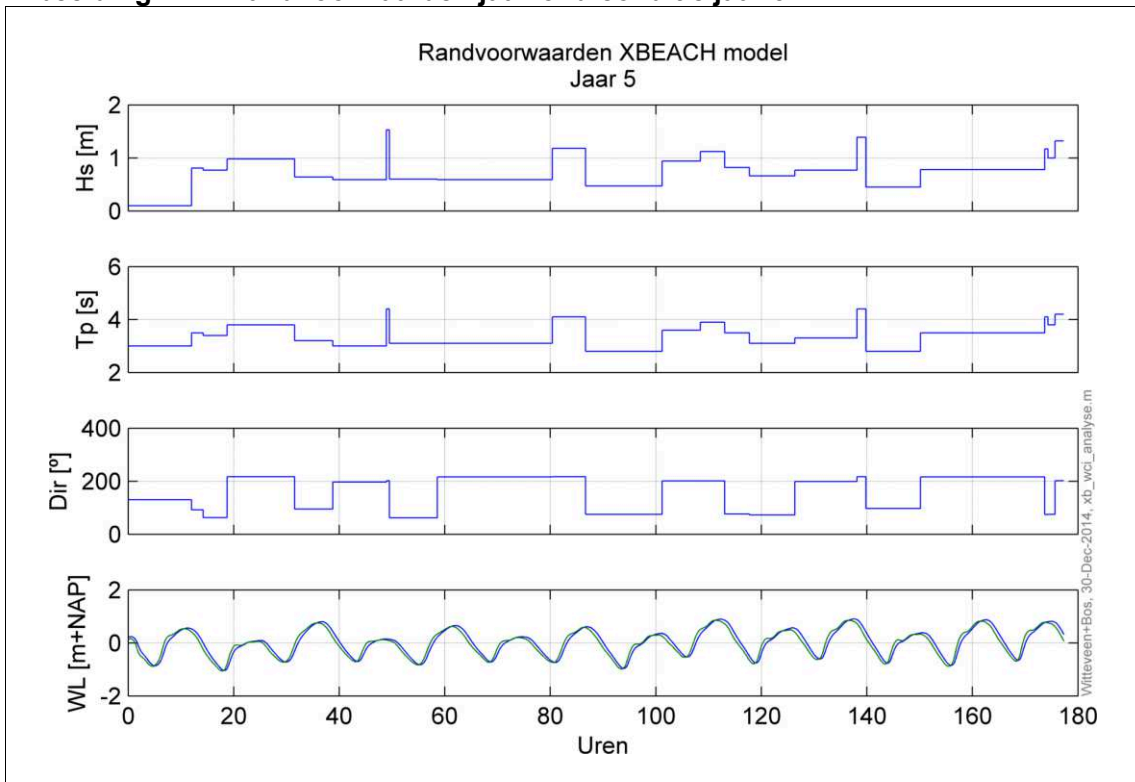
Afbeelding III.5. Randvoorwaarden jaarrond conditie jaar 3



**Afbeelding III.6. Randvoorwaarden jaarrond conditie jaar 2**

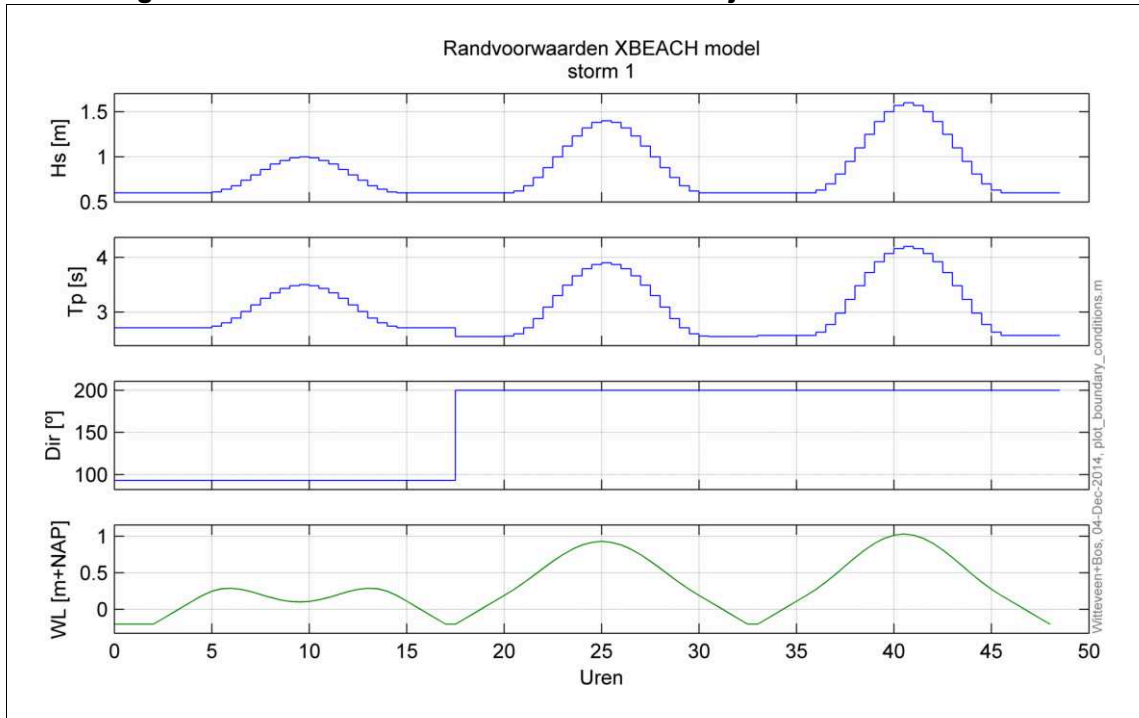


**Afbeelding III.7. Randvoorwaarden jaarrond conditie jaar 3**

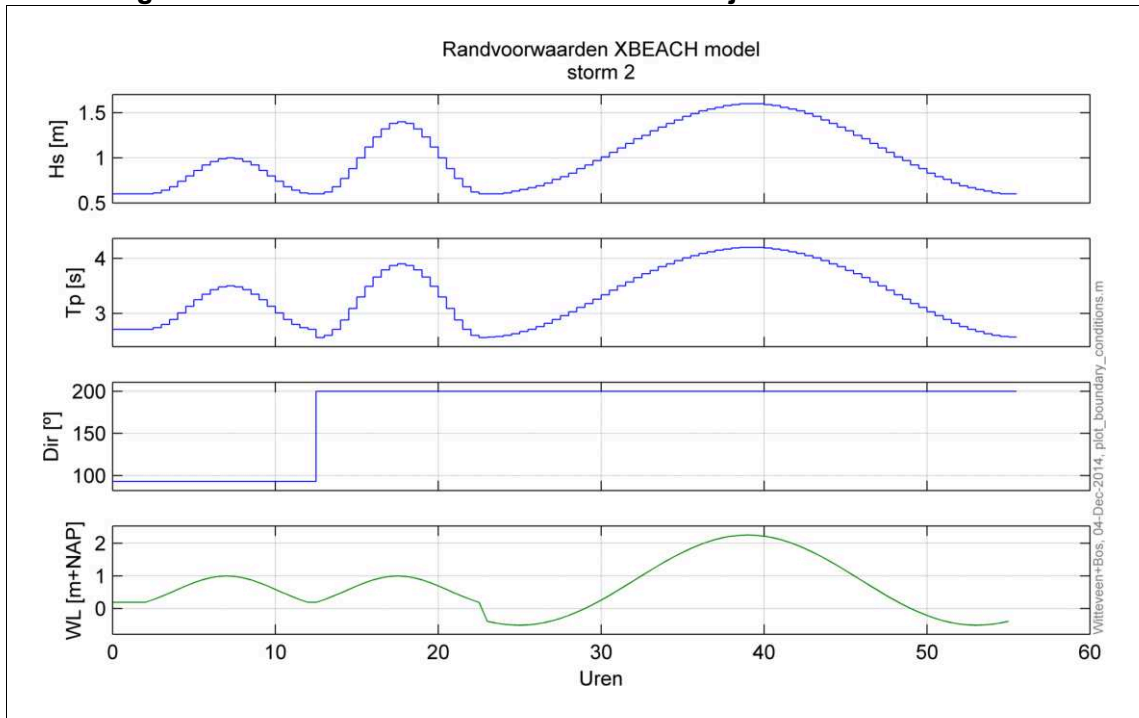


### III.5. Stormen jaar 1 en 2

**Afbeelding III.8. Randvoorwaarden stormcondities na jaar 1**



**Afbeelding III.9. Randvoorwaarden stormcondities na jaar 2**





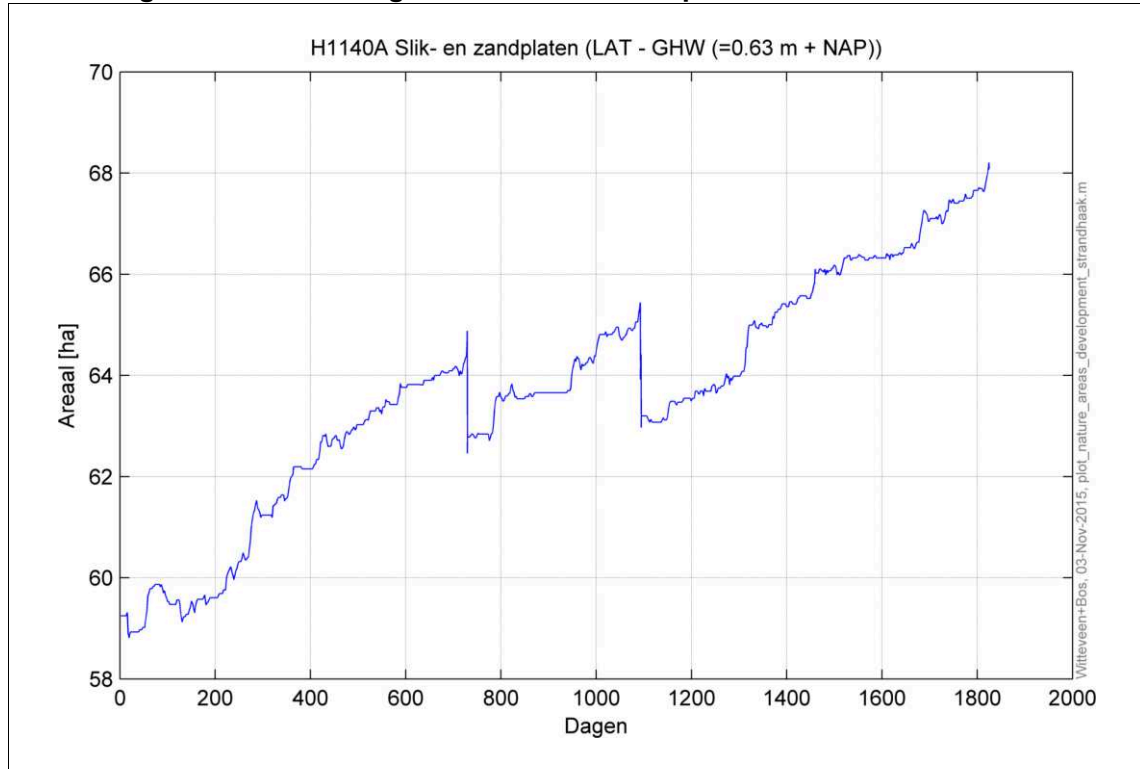
## **Bijlage IV   Ontwikkeling arealen habitattypen**



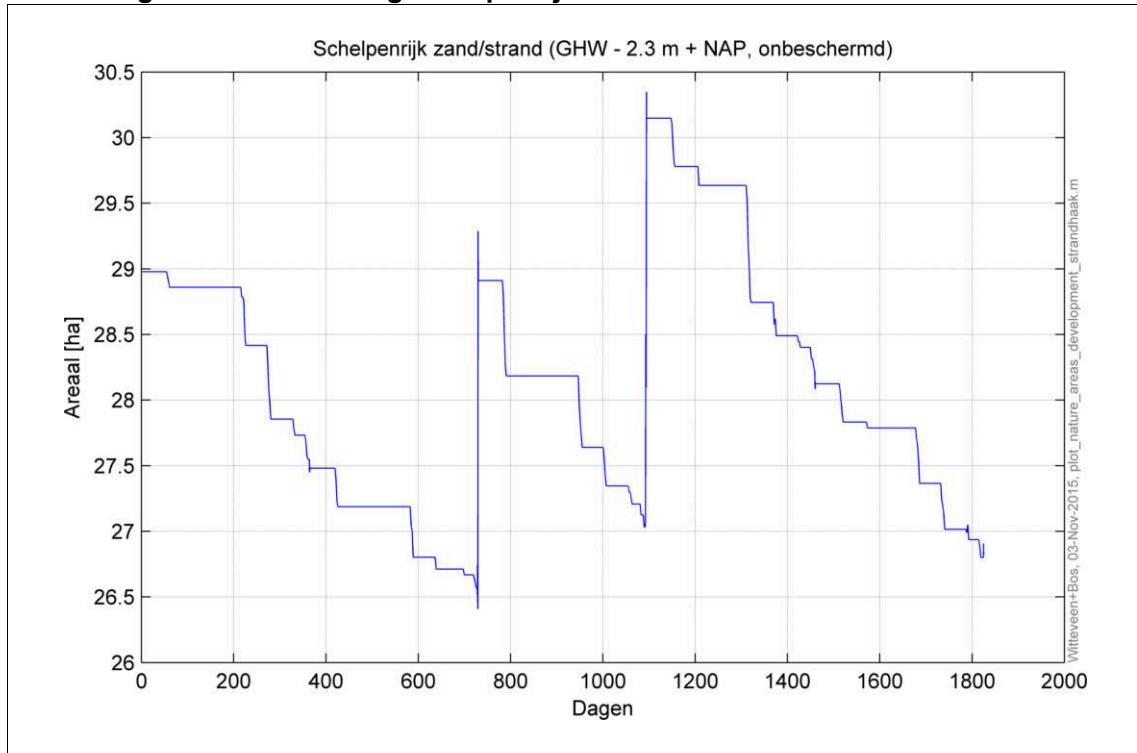
## IV.1. Ontwikkeling habitatarealen

In onderstaande afbeeldingen is de ontwikkeling van de arealen in de tijd per habitatype weergegeven.

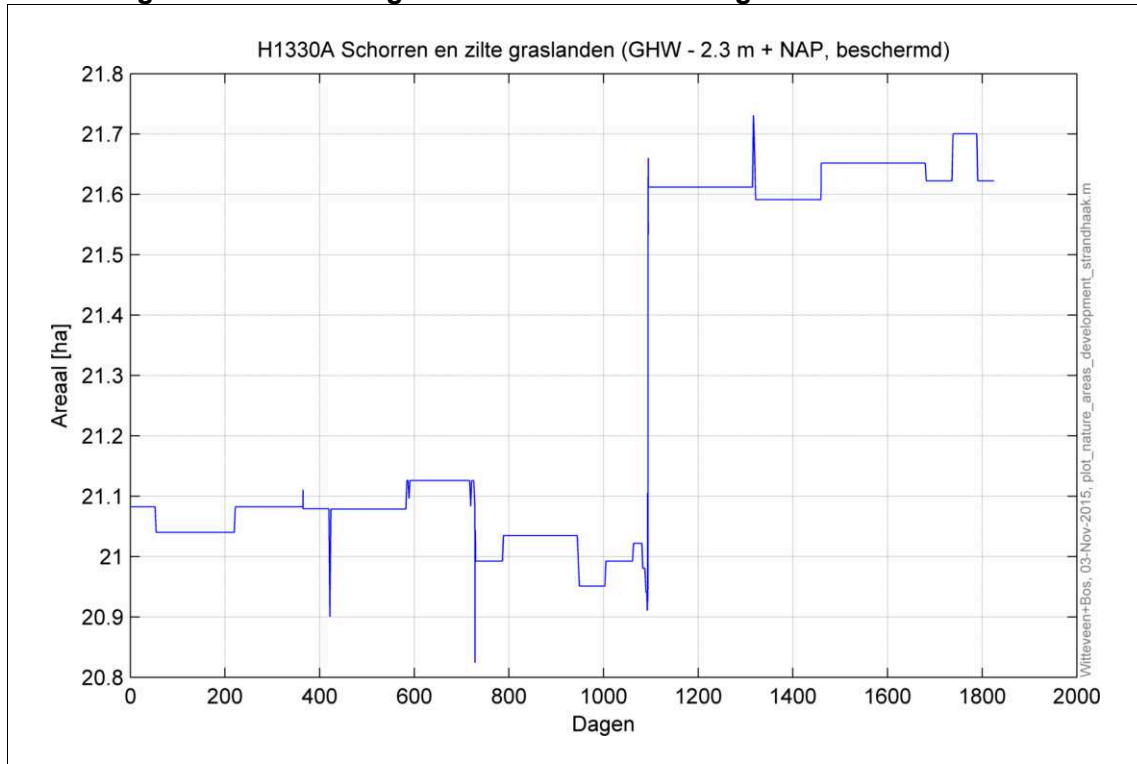
**Afbeelding IV.1. Ontwikkeling H1140A slik- en zandplaten**



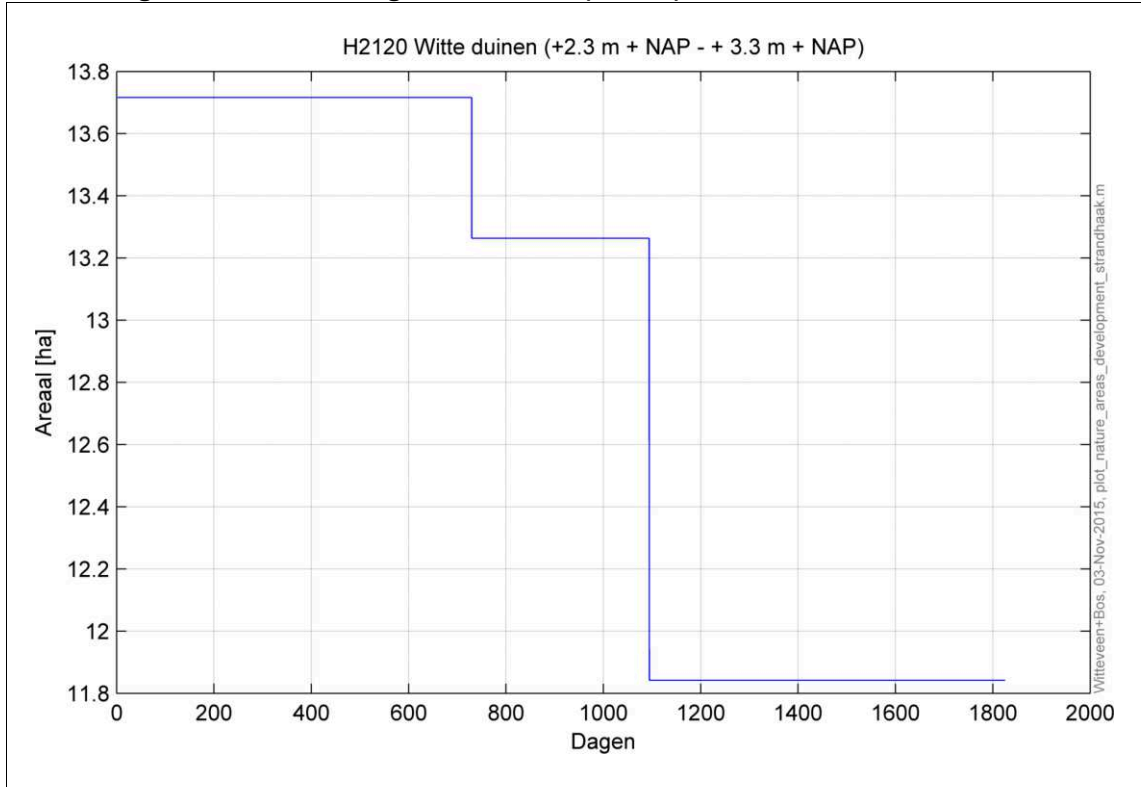
**Afbeelding IV.2. Ontwikkeling Schelpenrijk zand/strand**



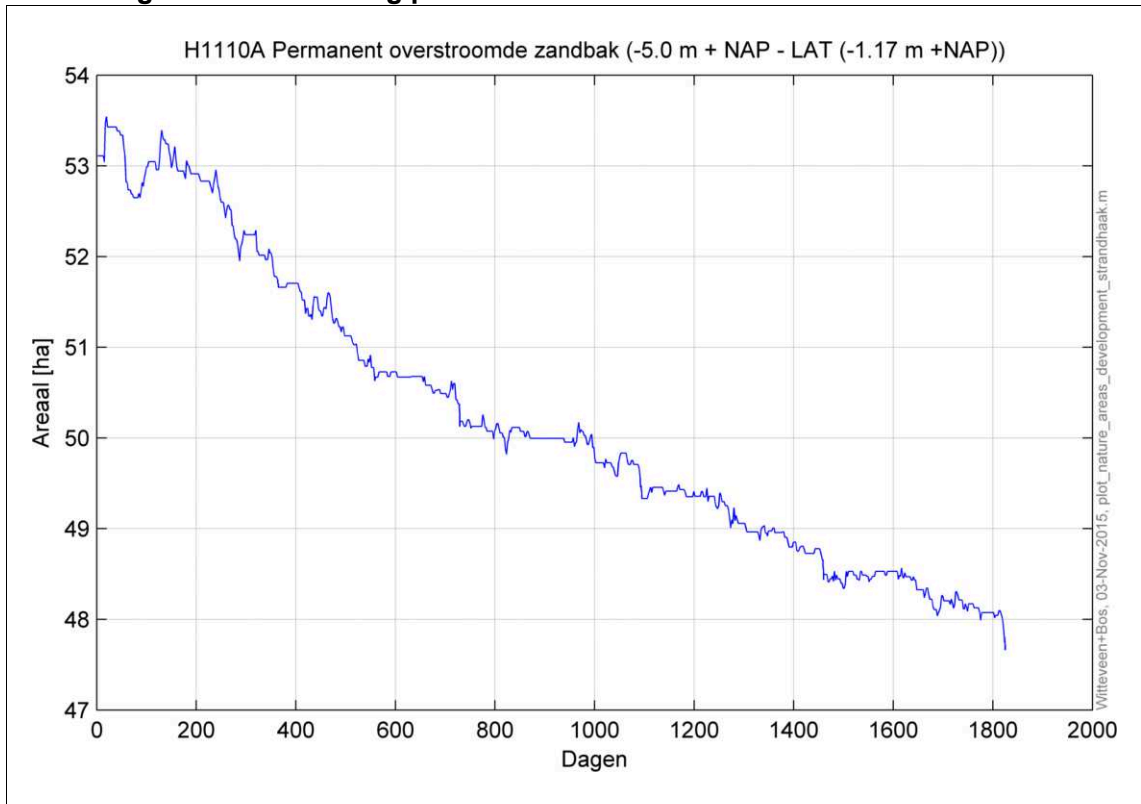
**Afbeelding IV.3. Ontwikkeling H1330A Schorren en zilte graslanden**



**Afbeelding IV.4. Ontwikkeling witte duinen (H2120)**



**Afbeelding IV.5. Ontwikkeling permanent overstroomde zandbak**



## IV.2. Erosie/sedimentatie per vak natuurbouw

Onderstaande tabellen geven de erosie- en sedimentatievolumes weer per vak en per habitatype per jaar.

**Tabel IV.1. Erosie-/sedimentatievolumes per jaar vak 1**

VAK 1	ontwikkeling volumes per habitatype per jaar		netto per habitatype
	erosie	sedimentatie	
H1110A bui	-292	720	428
H1110A mid	0	0	0
H1140A bui	-1.62	1.609	<b>-353</b>
H1140A mid	0	0	0
H1140A bin	0	0	0
strand bui	-280	112	<b>-168</b>
H1330A	-159	188	30
H2130A	0	0	0
H2120	0	0	0
<b>totaal netto verlies</b>			<b>-521</b>

**Tabel IV.2. Erosie-/sedimentatievolumes per jaar vak 2**

VAK 2	ontwikkeling volumes per habitatype per jaar		netto per habitatype
	erosie	sedimentatie	
H1110A bui	-750	2.284	1.533
H1110A mid	0	0	0
H1140A bui	-6.090	5.249	<b>-842</b>
H1140A mid	0	0	0
H1140A bin	0	0	0
strand bui	-2.993	1.487	<b>-1507</b>
H1330A	0	0	0
H2130A	0	0	0
H2120	0	0	0
<b>totaal netto verlies</b>			<b>-2348</b>

**Tabel IV.3. Erosie-/sedimentatievolumes per jaar vak 3**

VAK 3	ontwikkeling volumes per habitatype per jaar		netto per habitatype
	erosie	sedimentatie	
H1110A bui	-4.191	8.512	4.320
H1110A mid	0	0	0
H1140A bui	-16.616	10.995	<b>-5.621</b>
H1140A mid	0	0	0
H1140A bin	0	0	0
strand bui	-5.280	1.758	<b>-3.522</b>
H1330A	0	0	0
H2130A	0	0	0
H2120	0	0	0
<b>totaal netto verlies</b>			<b>-9.144</b>

**Tabel IV.4. Erosie-/sedimentatievolumes per jaar vak 5**

VAK 5	ontwikkeling volumes per habitatype per jaar		netto per habitatype
	erosie	sedimentatie	
H1110A bui	-2.925	4.399	1474
H1110A mid	0	0	0

<b>VAK 5</b>	<b>ontwikkeling volumes per habitatype per jaar</b>		<b>netto per habitatype</b>
H1140A bui	-12.943	10.107	<b>-2.836</b>
H1140A mid	-39	83	44
H1140A bin	-271	404	133
strand bui	-6.145	1.881	<b>-4.263</b>
H1330A	-205	224	19
H2130A	0	0	0
H2120	0	0	0
<b>totaal netto verlies</b>			<b>-7.100</b>

**Tabel IV.5. Erosie-/sedimentatievolumes per jaar vak 6**

<b>VAK 6</b>	<b>ontwikkeling volumes per habitatype per jaar</b>		<b>netto per habitatype</b>
	erosie	sedimentatie	
H1110A bui	-1.108	2.754	1.645
H1110A mid	0	0	0
H1140A bui	-9.911	14.688	4.777
H1140A mid	0	0	0
H1140A bin	0	0	0
strand bui	-1.416	397	<b>-1.019</b>
H1330A	-187	105	<b>-82</b>
H2130A	0	0	0
H2120	0	0	0
<b>totaal netto verlies</b>			<b>-1.101</b>



**Bijlage V    Review rapport PHZD Morfologische studie M. Boers, Deltares**

## Memo

Aan  
LS

<b>Datum</b> 20 januari 2015	<b>Kenmerk</b> 1203849-084-GEO-0001	<b>Aantal pagina's</b> 3
<b>Van</b> Marien Boers	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88335 8473	<b>E-mail</b> marien.boers@deltares.nl

**Onderwerp**  
Review Rapport PHZD Morfologische studie

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	jan. 2015	Marien Boers		Gerard van Meurs		Leo Voogt	

## 1 Algemeen

De algemene indruk van het rapport is positief. Dit betreft onder andere de volgende punten:

- Het aangepast ontwerp is morfologisch gezien veel beter doordacht. Naar verwachting zullen de inspanningen om veiligheid, zandvoorraad en natuurwaarden duurzaam op orde te houden zeker beheersbaar zijn.
- De modelberekeningen met XBeach geven een betrouwbaar beeld van de te verwachten morfologische ontwikkelingen.
- Er is goed nagedacht over de vertaling van de modelresultaten naar de gevolgen voor habitattypen.
- Er is voor aannemers nog voldoende ruimte om het ontwerp te optimaliseren, zeker wanneer gebruik wordt gemaakt van harde beschermingsmaatregelen.

## 2 Inhoudelijke opmerkingen

### Beoordeling van het ontwerp op veiligheid

Het wordt aanbevolen om het aangepast ontwerp ook te beoordelen op veiligheid, waarbij aanvullende modelberekeningen worden uitgevoerd voor maatgevende condities.

### Aandachtspunt: toegang tot havens

Geef aan wat de effecten van het ontwerp zijn voor de toegangsgreuelen voor Havens.

### Waterstanden (paragraaf 2.4)

Voor de waterstanden wordt gebruik gemaakt van de slotgemiddelden uit 1991. Er wordt aanbevolen om gebruik te maken van meer recente gegevens zoals te vinden op: [http://www.rws.nl/images/OUUSD\\_tcm174-335811.pdf](http://www.rws.nl/images/OUUSD_tcm174-335811.pdf). Overigens zijn er ook andere bronnen zoals Hydra-Zout en het programma PCTrans (dat een LAT<sup>1</sup> waarde geeft van -1,18 m).

<sup>1</sup> De LAT betekent: Lowest Astronomical Tide. Dit is de laagst mogelijke waterstand op basis van zon en maan. Lagere waterstanden onder invloed van het weer kunnen echter wel optreden. De LAT is in 2006 officieel bepaald door de Hydrografische dienst van de marine (<http://www.defensie.nl/onderwerpen/hydrografie/inhoud/coordinatenstelsels-op-zee/dieptebeoordeling-op-zee>).

In onderstaande tabellen staan de verschillen tussen beide waterstanddata. Hieruit blijkt dat de LAT 10cm lager is dan in het rapport is aangenomen. De hoogwaters zijn identiek, wat van belang is voor de hydraulische randvoorwaarden. De LAT is echter 10 à 11 cm lager, wat betekent dat het habitattype H1140 te laag wordt ingeschat. (zie ook par 5.3.4)

frequentie	Slotgemiddelden 1991	Slotgemiddelden 2011
1/10 jaar hoog water	+2,95	+2,95
1/2 jaar hoog water	+2,4	+2,4
1/1jaar hoog water	+2,25	+2,25
gemiddeld hoog water	+0,63	+0,64
gemiddelde waterstand	+0,03	+0,04
LLWS	-1,07	
LAT		-1,17
5x per jaar laagwater		-1,50
2x per jaar laagwater		-1,65
1x per jaar laagwater		-1,75

### Dimensies geul (paragraaf 2.7.3, 5.3.3)

Ik wil hierbij de suggestie doen om een kwantitatieve maat voor de diepte van de geul aan te geven waarbij geen sprake is van beloopbaarheid / doorwaadbaarheid van het eiland. Betrek hierbij ook de overschrijdingskansen voor laagwater (zie bovenstaande grafiek).

### Model XBeach (paragraaf 4.1, Bijlage 3)

Ten behoeve van de reproduceerbaarheid en de mogelijkheid om vergelijkingen te kunnen maken met vervolgberekeningen wordt het volgende aanbevolen

- Neem het versienummer van XBeach op
- Zorg ervoor dat de modelschematisaties goed worden gearchiveerd.
- Beschrijf in het rapport waar deze modelschematisaties kunnen worden opgevraagd.
- Benoem de mogelijkheid dat er nog verbeteringen in XBeach kunnen worden verwacht die van belang zijn voor de beoordeling van het ontwerp. Zo biedt het afstudeerwerk van Lodewijk de Vet (referentie staat al in het rapport) de mogelijkheid om een betere voorspelling van de overwash te doen.

### Presentatie dwarsraaien (par 2.7.2, 5.3.3)

In genoemde paragrafen wordt een aantal dwarsraaien getoond. Onduidelijk is waar deze raaien zich op de kaart bevinden. Graag in de kaarten deze raaien laten zien. Dit mogen er wat mij betreft best meer zijn.

### Fase 2B (par 5.2.3, 5.2.4)

De informatiewaarde van deze paragrafen is laag. Wat is de boodschap? Toon ook voor deze fase een aantal dwarsraaien (zie hierboven)

### Verificatie Langstransporten (par 5.3.2)

Een echte verificatie van XBeach aan de hand van UNIBEST, zoals eerder in de vergelijking tussen XBeach en SWAN, is niet mogelijk, aangezien:

- Unibest is toegepast op een heel ander ontwerp
- Er wordt gerekend met verschillende hydraulische randvoorwaarden
- De betrouwbaarheid van UNIBEST voor een dergelijk complex ontwerp kan worden betwijfeld



Houd het daarom op een vergelijking en constateer dat de orde van de transporten van beide berekeningen niet onrustbarend afwijken.

### 3 Kleine details

- Wissel Afbeelding 2.8 en 2.7 om. Geef bij figuur 2.8 aan dat de zwarte lijn correspondeert met figuur 2.7. NB: Klopt dat?
- Afbeelding 2.10: Delflandse
- Par 4.1 2e alinea. Ipv voetnoot verwijzen naar: Deltares (2013a). XBeach voor WT12017. 1207810-002-HYE-0004
- Nummering alinea's H5: 5.2.3 moet worden 5.3
- Par 5.2.5 verwacht ik voor fase 2b
- Pag 44: referenties niet in voetnoot, maar in referentielijst



**Bijlage VI Bevindingen morfologische studie Prins Hendrik Zanddijk -  
J.A. Roelvink, Unesco-IHE**

**From**

Prof.dr.ir. J.A. Roelvink  
T +31 15 215 18 38  
E d.roelvink@unesco-ihe.org

UNESCO-IHE  
P.O. Box 3015  
2601 DA Delft  
Netherlands

Joyce Hoed  
Technisch Manager Waddenzee- en IJsselmeerdijken  
Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Postbus 250  
1700 AG Heerhugowaard

Our reference  
WSE-HECEPD/DRO/TMO

**Date**  
January 28, 2014

**Subject**

Bevindingen morfologische studie Prins Hendrik Zanddijk

Geachte mevrouw Hoed,

Hierbij geef ik kort mijn bevindingen weer betreffende de morfologische studie betreffende het veiligheidsduin en natuurontwikkeling voor de Prins Hendrik Zanddijk op Texel, uitgevoerd door Witteveen en Bos.

Ik ben gedurende de studie in een viertal voortgangsbesprekingen op de hoogte gehouden van de vorderingen in de studie en heb daarbij de gelegenheid gehad in detail mee te kijken met de opzet en resultaten van de studie.

In de modelmatige opzet van de studie is na uitgebreide overwegingen besloten uit te gaan van een gedetailleerd XBeach model, genest in een bestaande Delft3D modellentrein. de overwegingen hierbij ondersteun ik van harte, namelijk dat in deze opzet zowel gemiddelde condities efficiënt kunnen worden doorgerekend als enige stormen per jaar, en waarbij in beide gevallen kustdwarse processen, zowel opbouwend als afbrekend, redelijk kunnen worden weergegeven. Daarnaast kan door het gebruik van parallel rekenen op een cluster een tijdswinst gehaald worden die essentieel is voor het welslagen van dit project.

De schematisatie van randvoorwaarden heeft zorgvuldig plaatsgevonden en de modelopzet is waar mogelijk geverifieerd door vergelijking met het overall model en een kwalitatieve vergelijking met eerdere uitkomsten van andere modellen.

Hoewel voor deze nog aan te leggen situatie geen goede validatie vooraf gedaan kan worden acht ik de resultaten realistisch. De ontwikkeling van het gebied als geheel en van dwarsprofielen over de aan te leggen natuurontwikkeling is glad en uit zich als een doorgaande ontwikkeling waarbij de effecten van verschillende condities en stormen een aannemelijk verdrag vertonen, en ook na vijf jaar simulatie geen ontsparingen plaatsvinden.

Postgraduate education, training  
and capacity building in water,  
environment and infrastructure

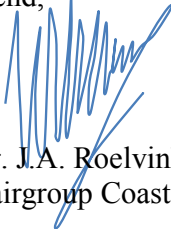
**Visiting Address**  
UNESCO-IHE  
Westvest 7  
2611 AX Delft

T +31 15 215 17 15  
F +31 15 212 29 21  
E info@unesco-ihe.org  
I www.unesco-ihe.org

In de maatregelen om de erosie en sedimentatie te beperken zijn oestermatten gesimuleerd als onerodeerbare elementen. Hierbij raad ik aan zowel naar de duurzaamheid van deze matten te kijken alsook naar de wenselijkheid deze aan te leggen op een hoogte waarbij geen kolonisatie kan plaatsvinden.

Over het geheel genomen ben ik van mening dat dit een zorgvuldige, volgens state-of-the-art methoden uitgevoerde modelstudie is met aannemelijke resultaten, en volgens een goed communicatief proces tot stand gekomen.

Hoogachtend,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several vertical and diagonal strokes, positioned to the right of the word 'Hoogachtend,'.

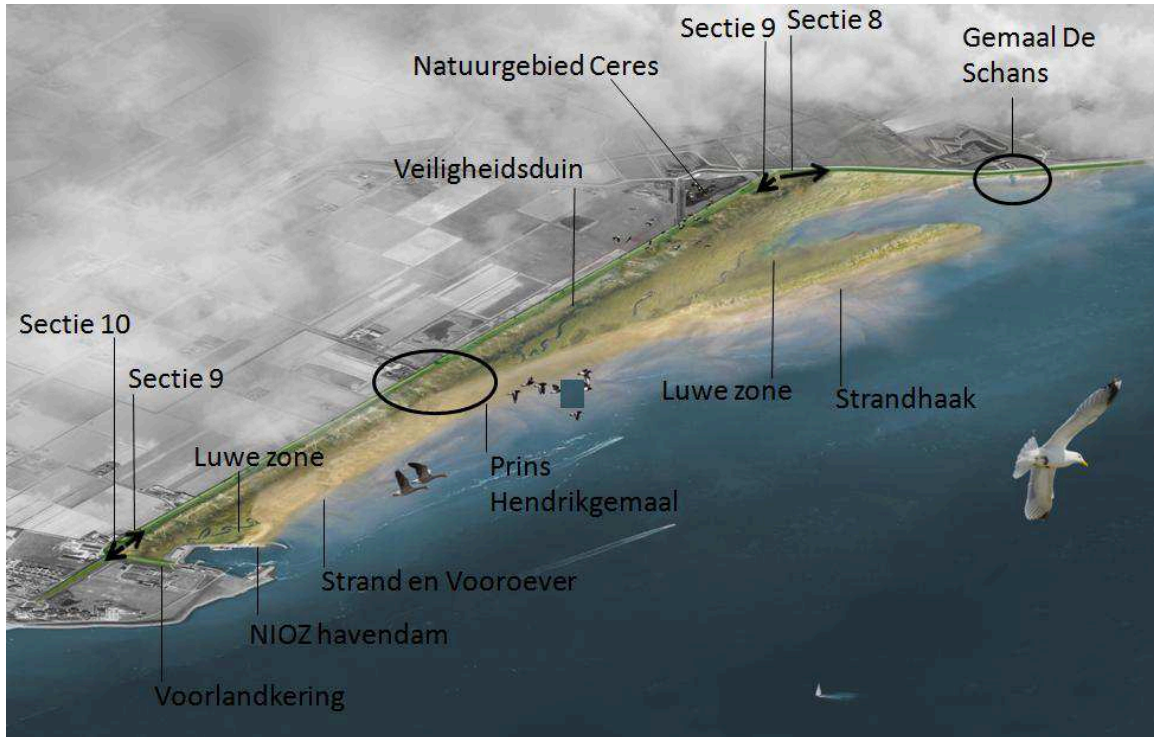
Prof. dr. ir. J.A. Roelvink  
Head, Chairgroup Coastal Systems & Engineering and Port Development



## **Bijlage VII Berekeningen maatgevende condities**



Afbeelding 1.1 Indicatieve visualisatie plan PHZD [Ref. 1]



Het veiligheidsduin verzorgt het basisvolume van de waterkering en het voorliggende strand en strandhaak fungeren als slijtlaag. Het basisvolume is het minimale volume dat altijd aanwezig moet zijn voor de kustveiligheid en de slijtlaag vangt de dagelijkse erosie op. In de morfologische modelstudie is met behulp van XBeach de robuustheid van het ontwerp en het verwachte onderhoud aan de natuurbouw en het veiligheidsduin onder dagelijkse omstandigheden bepaald voor een periode van 5 tot 10 jaar [Ref. 1]. De belangrijkste conclusie op basis van de resultaten van deze studie was dat het een stabiel ontwerp betreft dat langere tijd (>10 jaar) zonder onderhoud aan de slijtlaag kan bestaan.

Het basisvolume en het profiel van het veiligheidsduin is ontworpen en getoetst aan de maatgevende ontwerpcondities met behulp van DUROS+ zoals beschreven in [Ref. 2]. In de modelstudie met XBeach is gerekend met gemiddelde condities tot 1/10 jaar condities en zijn geen maatgevende ontwerpcondities (1/4.000 jaar storm) doorgerekend.

In 2016 zijn nieuwe maatgevende ontwerpcondities afgeleid voor de 1/4000 jaar situatie in [Ref. 3] die als basis dienen voor de XBeach-2D en DUROS+ berekeningen in de voorliggende notitie.

Duros+ wordt in de vigerende toetsvoorschriften voorgeschreven als toetsinstrumentarium voor duinafslag [Ref. 4]. Om een aantal redenen is het zinvol om de maatgevende ontwerpcondities ook met XBeach-2D door te rekenen:

- 1 DUROS+ is niet geschikt om een complex gebied door te rekenen waarbij mogelijk sprake is van effecten van langstransport die bijdragen aan de duinafslag. Daarmee levert het onderzoek aanvullende informatie op die van belang kan zijn voor het ontwerp van het veiligheidsduin;
- 2 een andere reden om bij het uitgevoerde onderzoek gebruik te maken van XBeach-2D (naast het feit dat het model al is gebruikt bij [Ref. 1]) is dat in de toekomst XBeach (eerst 1D) wellicht DUROS+ deels zal vervangen in de toetsing van de waterkering. Op dit moment is echter nog onduidelijk wanneer dat zal zijn.

In voorliggende notitie worden de resultaten van deze aanvullende berekeningen voor de maatgevende ontwerpcondities gepresenteerd en toegelicht. Daarnaast worden de gehanteerde uitgangspunten voor de berekeningen en de toetsing van het veiligheidsduin besproken en vastgelegd.

Deze notitie vormt een aanvulling op de eerdere modelstudie maar is tevens geschreven als een zelfstandig leesbaar document.

## 1.2 Doelstelling

De doelstelling van de aanvullende berekeningen is om inzicht te verkrijgen in de ontwikkeling van het veiligheidsduin tijdens de maatgevende ontwerpcondities die 1/4.000 jaar optreden, om deze te vergelijken met DUROS+ berekeningen en om inzichtelijk te maken wat de effecten van (gradiënten in) langstransport op de mate van duinafslag zijn.

Er wordt opgemerkt dat de vergelijking van de mate van afslag met DUROS+ wordt gemaakt ter indicatie en dat een rechtstreekse vergelijking weinig waarde heeft vanwege de andere randvoorwaarden (i.e. golfrichting) die worden gehanteerd voor DUROS+ ten opzichte van XBeach-2D.

Het volgende wordt beschouwd:

- toetsing van het veiligheidsduin op basis van de resultaten van de berekeningen met XBeach-2D op vergelijkbare wijze als de methode met DUROS+ uit het Technisch Rapport Duinafslag 2007 [Ref. 4] en VTV2006 [Ref. 5] en vergelijking met DUROS+ berekeningen:
  - voor de maatgevende ontwerpcondities zoals gehanteerd in [Ref. 2] behorende bij een 1/4.000 jaar storm met windrichting 270°N;
  - voor de condities behorende bij drie andere windrichtingen;
  - gradiënten in langstransport langs het veiligheidsduin. Indien significant kunnen deze worden gebruikt om een eventuele toeslag voor DUROS+ vast te stellen;
- effect van natuurbouw op veiligheidsduin:
  - effect op gradiënten in langstransport. Indien significant kunnen deze worden gebruikt om een eventuele toeslag voor DUROS+ vast te stellen;
  - effect op veiligheid (afslagvolumes, achteruitgang).

## 2 UITGANGSPUNTEN EN RANDVOORWAARDEN

### 2.1 Model

Er wordt in principe uitgegaan van het XBeach model en het schetsontwerp dat gebruikt is voor de morfologische studie van de PHZD [Ref. 1]. Met name vanwege de hogere waterstanden en de focus op het veiligheidsduin zijn op een aantal punten kleine aanpassingen gemaakt. Het gaat hierbij om:

- bodem:
  - betere aansluiting landzijde duin op dijk en aansluiting aan noord- en zuidzijde;
  - de havendam is in meer detail in het model geïmplementeerd;
  - het ondiepe plateau voor de dijk, waarop de natuurbouw en het duin worden aangelegd, wordt in tegenstelling tot de eerdere morfologische studie wel als erodeerbare laag opgenomen in het model. Er wordt daarbij één zandfractie (300µm) gehanteerd voor alle erodeerbare gebieden. De geulrand en de bodem verder zeewaarts blijven niet-erodeerbaar;
- grid:
  - er is een verfijning aangebracht rond het veiligheidsduin van ~10 m tot ~2 m. Deze verfijning was nodig om de relatief steile hogere delen van het duin en het afslagproces daar voldoende nauwkeurig weer te geven in het model.



Er worden verder geen aanpassingen gemaakt in de model<sup>1</sup> instellingen (voor de stormcondities) ten opzichte van de eerdere studie, die veelal op de default waarde zijn gezet. Deze studie maakt geen gebruik van de in [Ref. 6] voorgestelde instellingen voor het gebruik van XBeach-1D als Wettelijk ToetsInstrument (WTI). Deze WTI-instellingen zijn gekalibreerd op basis van metingen van zowel schaalproeven als veldcampagnes. Op basis van gevoeligheidsberekeningen voor [Ref. 1] en berekeningen voor de Belgische kust [Ref. 8] is de verwachting is dat de WTI-instellingen tot minder afslag zullen leiden, zodat het gebruik van de huidige instellingen waarschijnlijk conservatief is.

## 2.2 Randvoorwaarden

### 2.2.1 Randvoorwaarden 2016

De maatgevende ontwerpcondities voor de situatie die 1/4000 jaar voorkomt voor de PHZD zijn afgeleid in [Ref. 3]. Voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden is gebruik gemaakt van een geavanceerde 'directionele' probabilistische methode die rekening houdt met de bijdrage vanuit verschillende windrichtingen. In [Ref. 3] zijn voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden 3 verschillende methoden toegepast die gekenmerkt worden een toenemende verfijning. In de voorliggende notitie wordt uitgegaan van de hydraulische randvoorwaarden conform "methode 3". In methode 3 zijn de ontwerpcondities gebaseerd op de statistiek van de maatgevende combinatie van 3 windrichtingen.

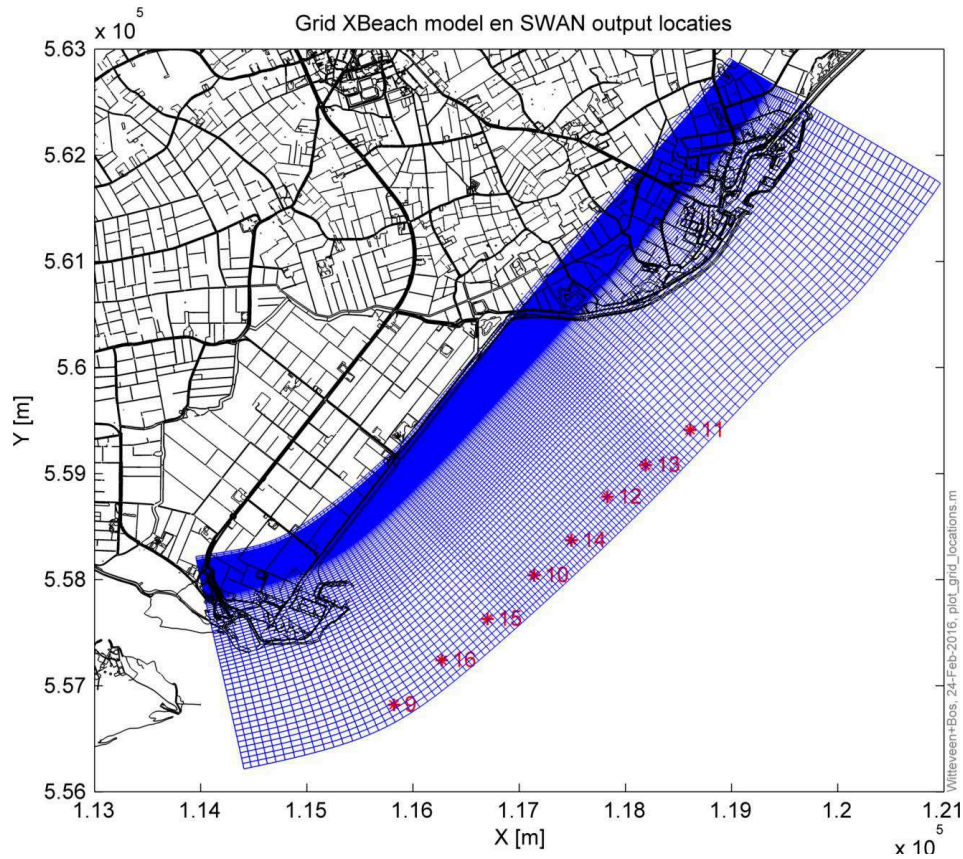
Voor de PHZD zijn 16 uitvoerpunten op de rand van het Xbeach model gedefinieerd. De locaties van de uitvoerpunten voor het Xbeach model zijn gegeven in Afbeelding 2.1. De randvoorwaarden die zijn gegenereerd voor deze locaties worden gehanteerd voor zowel de XBeach als de DUROS+ berekeningen.

In Afbeelding 2.1 is de locatie van de SWAN uitvoerpunten te zien ten opzichte van het XBeach rekenrooster. De locaties komen niet exact overeen met de offshore rand van het model. De ruimtelijke variatie in golfcondities tussen de uitvoerpunten onderling en de rand is klein doordat de punten allemaal op diep water liggen. Daarom is het uitgangspunt van deze berekeningen dat de condities in de uitvoerpunten ongewijzigd kunnen worden opgelegd op de rand van het XBeach model.

---

<sup>1</sup> Voor de berekeningen is de code van XBeach (Trunk, revision 4116; gedownload 16-10-2014 van oss.deltares.nl) lokaal gecompileerd voor gebruik op het Witteveen+Bos rekencluster. Lokaal zijn enkele wijzigingen in de code aangebracht.

Afbeelding 2.1 Locatie SWAN uitvoerpunten ten opzichte van XBeach grid

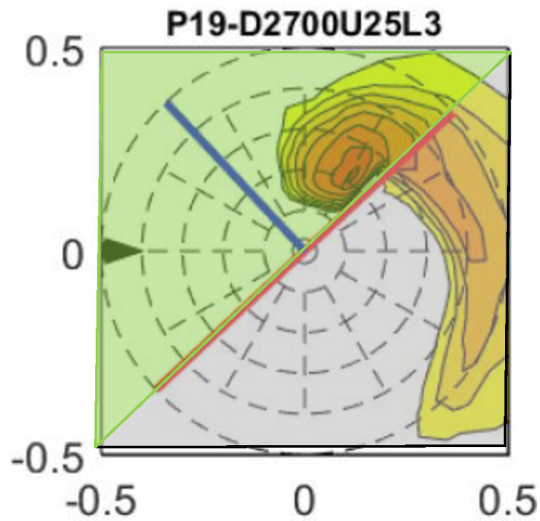


## 2.2.2 Golfrichting

De hoogste waterstanden en zwaardere golfcondities komen over het algemeen voor bij windrichtingen uit het zuidwesten tot noordwesten. De golfberekeningen uit [Ref. 3]. laten zien dat de richting van de golven daarbij een grote westelijke component heeft, waardoor de gemiddelde golfrichting van de kust af is in het geval van de Prins Hendrikpolder. Dit is geïllustreerd in Afbeelding 2.2 waarin de verdeling van de golfenergie over de verschillende richtingen is weergegeven door middel van een tweedimensionaal spectrum voor een windrichting van  $270^\circ\text{N}$ . De blauwe lijn is de kustnormaal en de rode lijn geeft de richting parallel aan de kust weer ( $90^\circ$  ten opzichte van kustnormaal).

Uit de afbeelding blijkt dat er deels sprake is van strijkgolven die het duin slechts in geringe mate zullen raken, omdat een deel van de energie van de kust af beweegt (grijs kader). De ontwerpcondities ( $H_s$ ,  $T_p$ , richting) voor het duin zijn daarom vastgesteld op basis van de kustwaartse componenten in het spectrum (dus alle componenten die minder dan  $90^\circ$  afwijken van de kustnormaal, groen kader).

Afbeelding 2.2 Genormaliseerde polaire 2D-spectra: contourlijnen op de niveaus 0,9, 0,5, ¼, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64 en 1/128.  
 Windrichting (zwarte driehoek), kustnormaal (blauwe lijn), kustlangse scheidingslijn (rode lijn). Frequenties in Hz.  
 Berekend met SWAN met een windsnelheid van 25 m/s en een waterstand van NAP +3 m



Ook na deze bewerking is de golfrichting in het gegeven voorbeeld met 206°N bijna parallel aan de kustlijn van het duin (~ 235°N). In de schematisatie van DUROS+ vallen de golven altijd loodrecht in. Er wordt geen rekening gehouden met het effect van refractie bij schuin invallende golven, waardoor de golfhoogte afneemt en de daaruit resulterende duinafslag. Bij het gebruik van een 2D model zoals XBeach, zal de golfrichting wel een belangrijke rol spelen. Het is dan mogelijk dat golven uit een andere richting maatgevend blijken te zijn voor de afslag van het veiligheidsduin, omdat de hoek met de kustnormaal kleiner is. Om dit te onderzoeken worden ook berekeningen uitgevoerd voor drie andere windrichtingen en bijbehorende hydraulische condities voor de situatie met alleen het veiligheidsduin.

### 2.3 Toetsing en toeslag

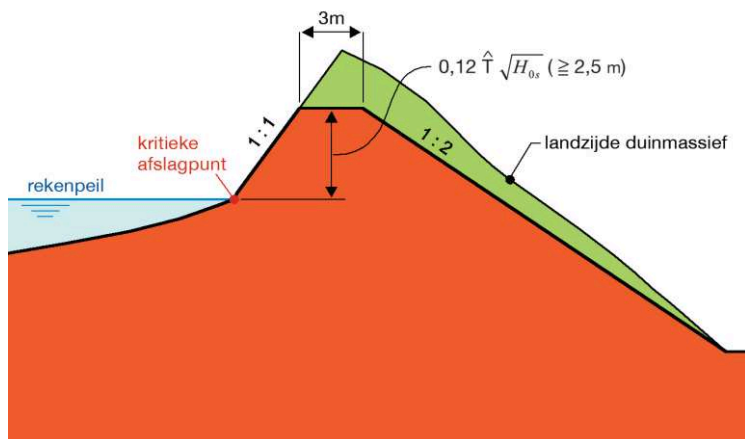
De toetsing wordt uitgevoerd conform de beschreven methode in het Technisch Rapport Duinafslag 2007 [Ref. 4] en VTV2006 [Ref. 5]. Dit houdt in dat landwaarts van het kritieke afslagpunt er nog een minimaal, maar stabiel profiel aanwezig dient te zijn: het grensprofiel (Afbeelding 2.3).

In Afbeelding 2.3 zijn de minimaal benodigde afmetingen van het grensprofiel conform het technische rapport Duinafslag [Ref. 4] aangegeven. Het grensprofiel heeft een kruinbreedte van 3 m en een minimale hoogte van 2,5 m boven Ontwerppeil/Rekenpeil. Voor de berekeningen met XBeach is de locatie van het grensprofiel zodanig gedefinieerd dat deze samenvalt met de landwaartse zijde van het duin, zie bijvoorbeeld

afbeelding 4.5.

In DUROS+ wordt een toeslag van 25 % op het afslagvolume boven het Ontwerppeil gehanteerd voor (model)-onzekerheden. Aanbevolen wordt op basis van [Ref. 6] om voor XBeach ook een toeslag van 25 % te hanteren. Dit geeft een eenduidige vergelijking met DUROS+.

Afbeelding 2.3 Definitie grensprofiel (bruin/oranje) [Ref. 4]



## 2.4 Toetsprofiel en aanlegprofiel veiligheidsduin en slijtlaag

Voor het te toetsen veiligheidsduin is de vorm en het volume zoals bepaald in de eerdere studie gehanteerd (zie Ref. 2]. De vorm van het veiligheidsduin is als volgt:

- kruinbreedte van 15m;
- kruinhoogte duin van NAP +8,0 m;
- een helling van 1:3 tussen NAP +8,0 m en NAP +3,0 m;
- helling van 1:20 tussen NAP +0,0 m en NAP +3,0 m;
- helling van 1:50 onder NAP +0,0 m tot het aanlegprofiel aansluit op de huidige bodem.

In de voorliggende studie is de afstand tussen de buitenkruinlijn van het duin en de buitenzijde van de berm van de dijk circa 45 m. Deze afstand is voldoende om een duin met voldoende volume te realiseren waarbij tevens ruimte is voor eventuele wijzigingen in de hydraulische randvoorwaarden (ten gevolge van de nieuwe normering) dan wel de mogelijkheid om het veiligheidsduin verder richting de dijk te schuiven. Het effect van de ligging van het duin ten opzichte van de dijk is zeer gering ten aanzien van morfologische effecten. Het schetsontwerp en profiel schuiven immers mee met de ligging van het duin.

Het minimale veiligheidsprofiel is getoetst zoals beschreven in paragraaf 2.3. In deze toetsing zijn reeds toeslagen voor onzekerheden opgenomen en is gedefinieerd wat het minimale grensprofiel is.

Het minimale veiligheidsprofiel (het profiel dat getoetst wordt) dienen gedurende de gehele levensduur aanwezig te zijn. Voor het ontwerp van het aanlegprofiel dienen de volgende onderdelen opgenomen te worden ter compensatie van verwachte toekomstige veranderingen teneinde het zandlichaam duurzaam in stand te kunnen houden:

- 1 slijtlaag ter compensatie van zandverliezen gedurende jaarrond golf- en stromingscondities;
- 2 toeslag voor zettingen;
- 3 toeslag voor grootschalige bodemdaling;
- 4 landschappelijke inpassing duinlandschap;
- 5 slijtlaag tbv winderosie op duin- en natuurbouw.

Ad 1) In het referentieontwerp van het duin en de natuurbouw zoals te zien in afbeelding 3.2 is reeds een slijtlaag opgenomen. Uit de morfologische modelstudie kan worden geconcludeerd dat na 10 jaar nog het vereiste minimum profiel resteert van het veiligheidsduin ten aanzien van kustveiligheid en dat de Strandhaak de achterliggende Luwe Zone nog steeds beschermt.

Ad 2) Toeslag zettingen. Zettingen zijn ingeschat op basis van ([ref. 10]). De maximale berekende zettingen zijn circa 0,5m gedurende een duur van 30 jaar en zijn bepaald bij het hoogste punt van het duin (NAP +8 m) en worden lager bij een kleinere hoogte van het duin. De berekende zettingen zijn conservatief, onder andere doordat de standaard NEN-waarden voor grondparameters zijn gehanteerd. Het veiligheidsdeel van het duin dient altijd de minimale hoogte (dan wel volume) te bezitten en daarom dient hier te worden uitgegaan van de conservatieve waarden voor de zettingen. Bij aanleg van het duin dient de hoogte voor de zettingen te worden gecompenseerd. Voor het natuurdeel gelden minimale en maximale waarden voor de hoogte die gespecificeerd zijn per habitatype. Hiervoor geldt dus dat een te hoge waarde ook niet goed is en daarom is het onjuist om zoals voor het veiligheidsdeel de conservatieve waarden te hanteren (dat leidt immers tot een te hoge ligging van het natuurdeel). Daarom kan hier beter van verwachtingswaarden worden uitgegaan.

Ad 3) toeslag voor grootschalige bodemdaling;

In het rapport Scenario's externe krachten voor WB21 [12.] is de verwachte bodemdaling (inclusief NAP-daling) van Nederland bepaald voor 50 en 100 jaar en de drie klimaatscenario's. De bodemdaling bevat verschillende componenten, zoals:

- tectonische beweging waardoor Nederland kantelt;
- menselijke activiteiten zoals zout- en gaswinning;
- ontwatering van veen- en kleilagen in het Holocene pakket.

Voor algemene bodemdaling wordt in het middenscenario 5 cm bij een planperiode van 50 jaar aangehouden. Bij aanleg van het duin dient de hoogte voor de bodemdaling te worden gecompenseerd.

Ad 4) er wordt geen toeslag op de duinvolumes of duinprofiel gehanteerd ten behoeve van landschappelijke inpassing.

Ad 5) Door verstuiving kan zandvolume uit het veiligheidsduin verdwijnen. Conform [ref.11] is het verlies van het duin en strand door eolisch transport bij de juiste maatregelen beperkt en is het verlies door eolisch transport vele malen kleiner dan verlies door marine processen. Uitgangspunt voor het ontwerp van het aanlegprofiel is dat voldoende verstuivingsbeperkende maatregelen worden opgenomen en daarom wordt geen additionele slijtlaag ingepast om te compenseren voor verlies door eolisch transport.

## 3 AANPAK

### 3.1 Hydraulische randvoorwaarden

#### 3.1.1 XBeach

Er is ruimtelijke variatie in de hydraulische parameters tussen de SWAN-uitvoerpunten. Er is daarom voor gekozen de randvoorwaarden op de rand van XBeach ruimtelijk te variëren, zodat deze aansluiten bij de randvoorwaarden zoals bepaald voor de uitvoerpunten 9-16.

Daarbij wordt alleen de golfhoogte ruimtelijk gevarieerd om eventuele randeffecten door verschillen in golfperiode en waterstanden te vermijden. De waterstand en de golfperiode zijn gemiddeld over de uitvoerlocaties 9-16.

Op de golfhoogte en de golfperiode wordt een robuustheidstoelag van 10 % toegepast op de uitkomsten van het onderzoek in [Ref. 3]. De waterstand (inclusief 2/3 decimeringshoogte en toeslagen) is afhankelijk van de windrichting en is het Rekenpeil (RP) voor duinafslag dat hoort bij die richting. Het Rekenpeil bij de maatgevende windrichting is het peil waarop het duin ontworpen dient te worden. Daarom wordt hiernaar gerefereerd als Ontwerppeil (OP).

De randvoorwaarden behorend bij de windrichtingen 210°N, 240°N, 270°N en 300°N zijn weergegeven in Tabel 3.1 en Tabel 3.2. De randvoorwaarden bij een windrichting van 270°N worden in eerste instantie aangenomen maatgevend te zijn. Daarnaast worden extra berekeningen uitgevoerd voor de situatie met alleen het veiligheidsduin voor condities behorende bij de windrichtingen 210°N, 240°N en 300°N om te onderzoeken of een andere windrichting wellicht maatgevend blijkt te zijn voor het ontwerp van het duin. Deze richtingen zijn geselecteerd omdat hierbij de hoogste golven in combinatie met hoge waterstanden optreden.

Het waterstandverloop tijdens de ontwerpomstandigheden is een samenstelling van de stormopzet en het astronomische getij (Afbeelding 3.1). Het gemiddelde hoogwater van NAP +0,64 m en getijperiode van 12,4 uur worden aangehouden voor het astronomische getij. Voor het verloop van de stormopzet wordt de voorgeschreven vorm conform de Leidraad Zee- en Meerdijken [Ref. 7] aangehouden. De stormduur  $t_s$  is gelijk aan 45 uur.

De hydraulische parameters worden in de tijd geschaald en aan het model opgelegd volgens het stormverloop in Afbeelding 3.1.

Tabel 3.1 Randvoorwaarden per windrichting [Ref. 3] (\* = inclusief 10 % robuustheidstoelag op de golfperiode)

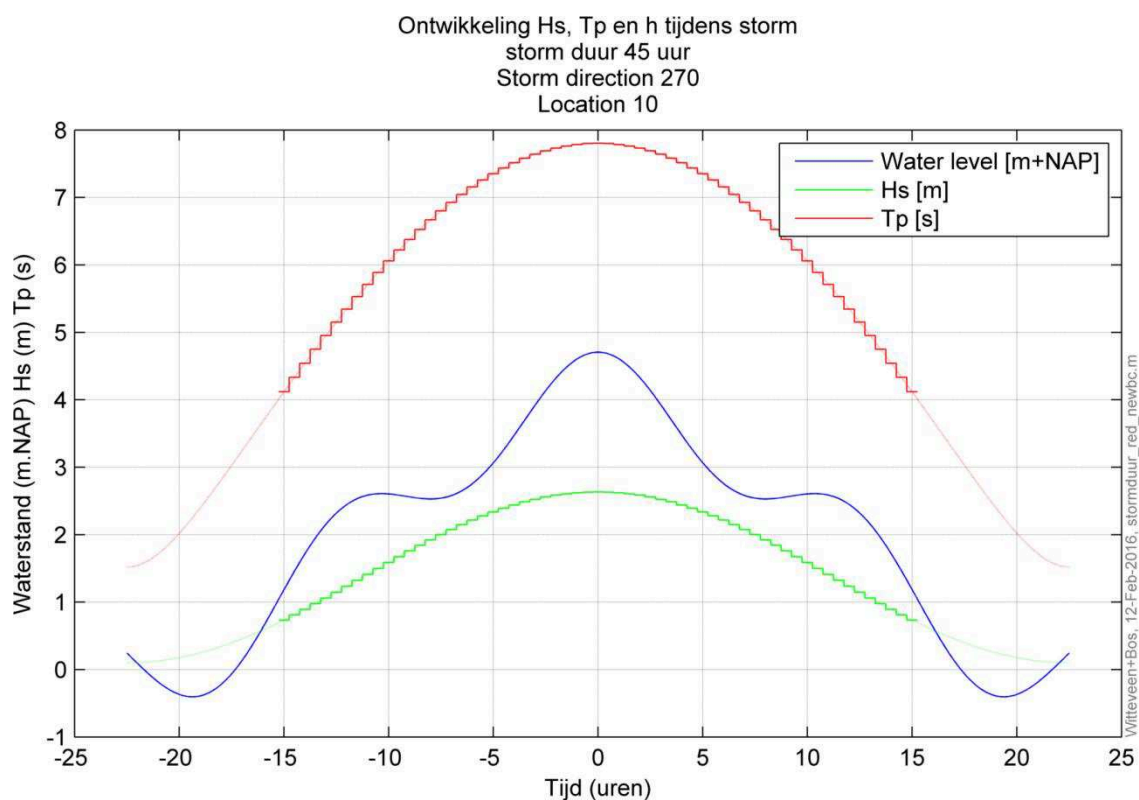
Windrichting [°N]	210	240	270 (maatgevend)	300
waterstand [NAP + m]	2,55	3,73	4,7	5
$H_s$ [m] *	variabel	variabel	variabel	variabel
$T_p$ [s] *	6,46	7,33	7,8	7,58
golfrichting [°N]	200	212	217	219

Tabel 3.2 Golfhoogte [m] per uitvoerlocatie inclusief 10 % robuustheidstoelag [Ref. 3]

locatie	Windrichting [°N]			
	210	240	270	300
9	2,69	2,64	2,11	0,89
10	3,04	3,10	2,63	1,27
11	3,12	3,08	2,60	1,27
12	3,19	3,25	2,79	1,38
13	3,16	3,18	2,70	1,31
14	3,11	3,16	2,69	1,31

	Windrichting [°N]			
locatie	210	240	270	300
15	2,94	2,94	2,49	1,20
16	2,86	2,84	2,36	1,09

Afbeelding 3.1 Verloop golfhoogte, -periode en waterstand tijdens storm met richting 270°N



### 3.1.2 DUROS+

Voor de vergelijking tussen DUROS+ en XBeach worden in DUROS+ dezelfde randvoorwaarden gebruikt als voor het XBeach model. Voor de DUROS+ berekeningen wordt per raai het meest nabijgelegen uitvoerpunt geselecteerd (Tabel 3.3). Zie paragraaf 3.3 voor de definitie van de raaien.

Normaalgesproken ligt het toepassingsbereik van het DUROS+ model bij golfperiodes ( $T_p$ ) van 12 tot 20 s. Een golfperiode van 12 s is vastgesteld als ondergrens van het geldigheidsgebied van DUROS+. Bij de PHZD komen golfperiodes voor van 6-8 s. Het toepassen van een minimale periode van 12 s zou een forse overschatting van de golfbelasting geven. Daarom worden de DUROS+ berekeningen uitgevoerd met de werkelijke golfperiode zodat een goede vergelijking wordt verkregen met XBeach.

Door een kleinere periode dan 12 s te hanteren wordt afgeweken van voorgeschreven minimale piekgolfperiode van 12 s (Technisch Rapport Duinafslag 2007 [Ref. 4]). In [ref. 9] wordt gesteld dat een nadeel van het hanteren van de kleinere periode in DUROS+ is, dat het model hiervoor niet gevalideerd is. Uit het onderzoek in [ref. 9] is wel te concluderen dat DUROS+ met een kleinere periode realistische uitkomsten oplevert (de resultaten blijken in vergelijking met Xbeach en Durosta aan de conservatieve kant).

Middels referentieberekeningen wordt inzichtelijk gemaakt wat het effect is van het hanteren van een kleinere piekperiode (paragraaf 4.4).

Een beperking van DUROS+ is dat de golfrichting niet wordt meegenomen in de berekening, zodat de golven altijd loodrecht op de kust vallen. Dit geeft een overschatting van de afslag ten opzichte van XBeach wanneer de golven in werkelijkheid (zeer) schuin invallen zoals bij de PHZD het geval is.

Tabel 3.3 SWAN uitvoerlocaties voor DUROS+ berekeningen

Raai	11	17	27	33
SWAN uitvoerlocatie	15	10	12	13

## 3.2 Berekeningen

### 3.2.1 XBeach

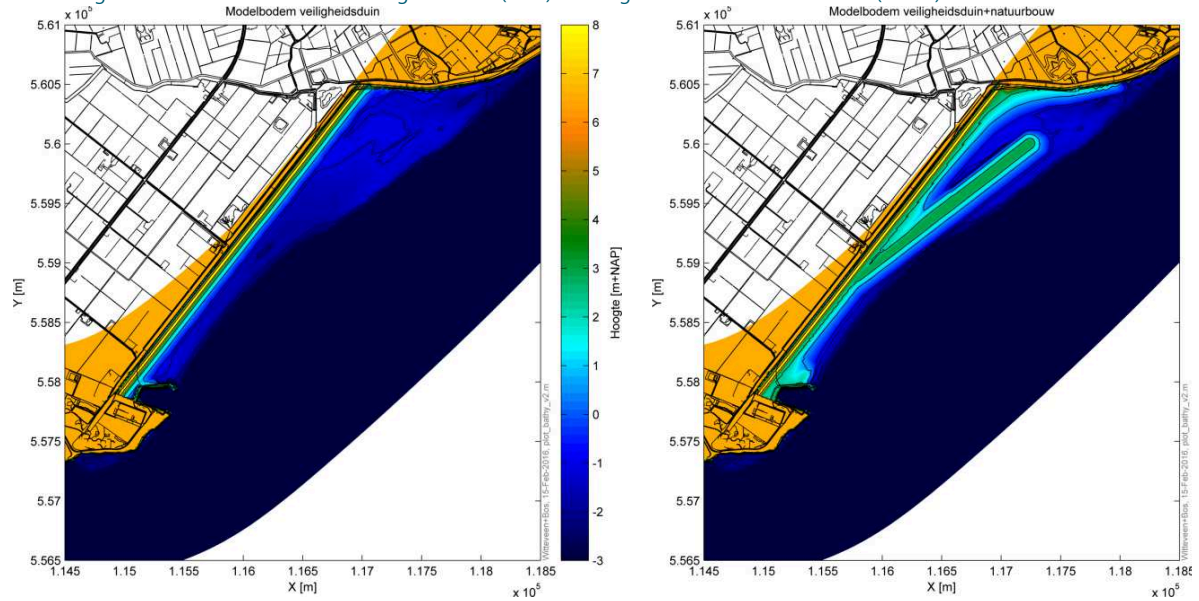
Voor de toetsing van het veiligheidsduin en het effect van de natuurbouw hierop worden vijf berekeningen uitgevoerd (Tabel 3.4). Voor de maatgevende windrichting (270 °N) wordt een berekening uitgevoerd met zowel het veiligheidsduin als een berekening met het veiligheidsduin en de natuurbouw. Voor de windrichtingen 210 °N, 240 °N en 300 °N worden enkel berekeningen uitgevoerd met het veiligheidsduin.

Tabel 3.4 Uitgevoerde berekeningen met XBeach-2D

Windrichting [°N]	Modelbodem: Duin	Modelbodem: Duin+Natuurbouw
210	1: duin210	n.v.t.
240	2: duin240	n.v.t.
270	3: duin270	5: natuurbouw270
300	4: duin300	n.v.t.



Afbeelding 3.2 Modelbodem van alleen veiligheidsduin (links) en veiligheidsduin met natuurbouw (rechts)



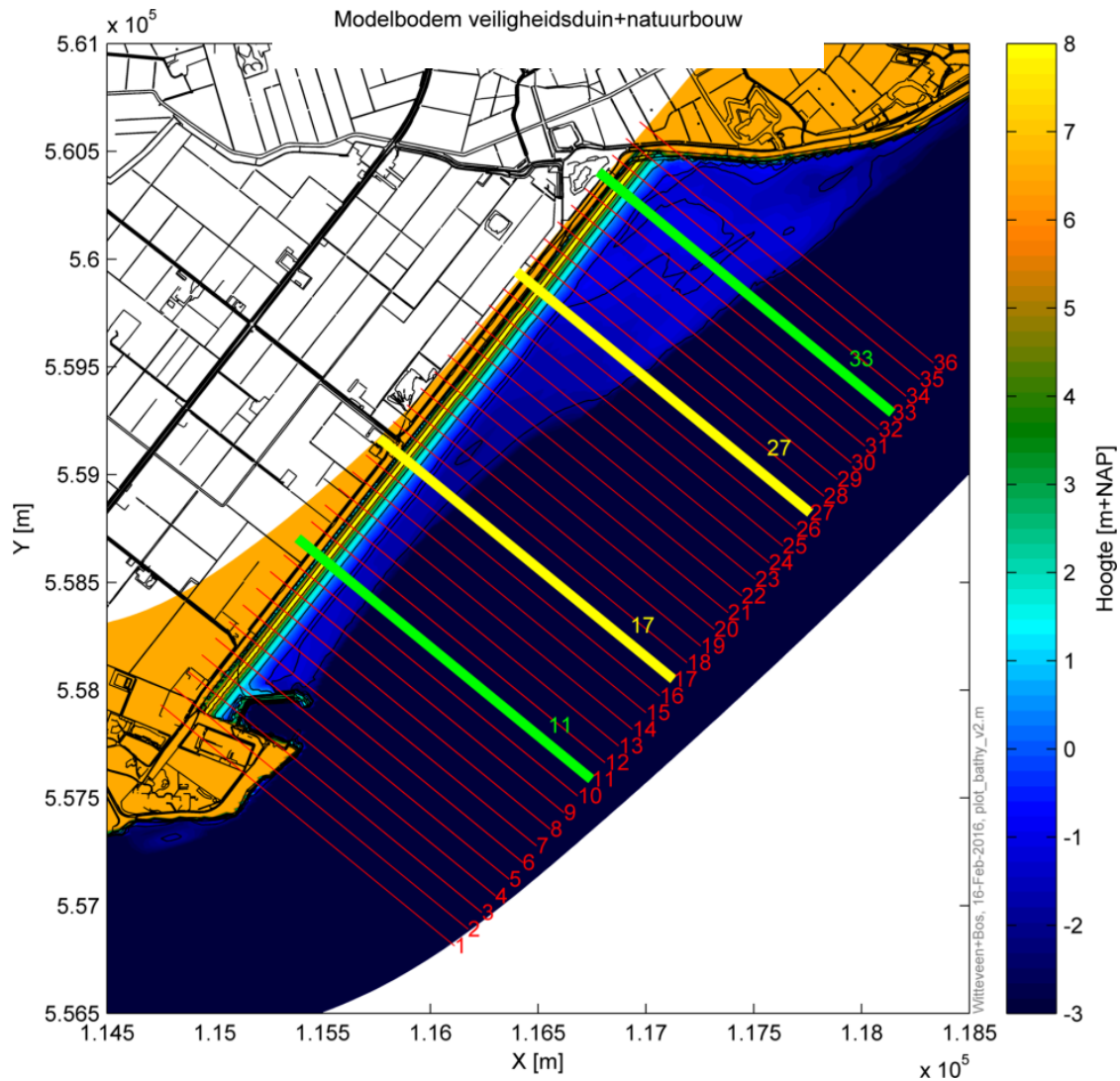
### 3.2.2 DUROS+

Met DUROS+ worden berekeningen uitgevoerd voor de raaien 11, 17, 27 en 33 voor de condities die maatgevend blijken te zijn op basis van de XBeach berekeningen. Deze condities zullen optreden bij een windrichting van 270 graden. Dit blijkt uit referentieberekeningen die zijn uitgevoerd met DUROS+ voor andere windrichtingen (paragraaf 4.4).

### 3.3 Definitie raaien

Voor de vergelijking en de toetsing van het veiligheidsduin met behulp van XBeach zijn kustdwarse raaien gedefinieerd met een onderlinge afstand van 100 m (Afbeelding 3.3). Voor de raaien 11, 17, 27 en 33 wordt een vergelijking gemaakt tussen DUROS+ en XBeach.

Afbeelding 3.3 Definitie dwarsprofielen/raaien; met groen/geel zijn de raaien aangegeven waarvoor met DUROS+ de afslag is berekend



## 4 RESULTATEN

### 4.1 Resultaten DUROS+

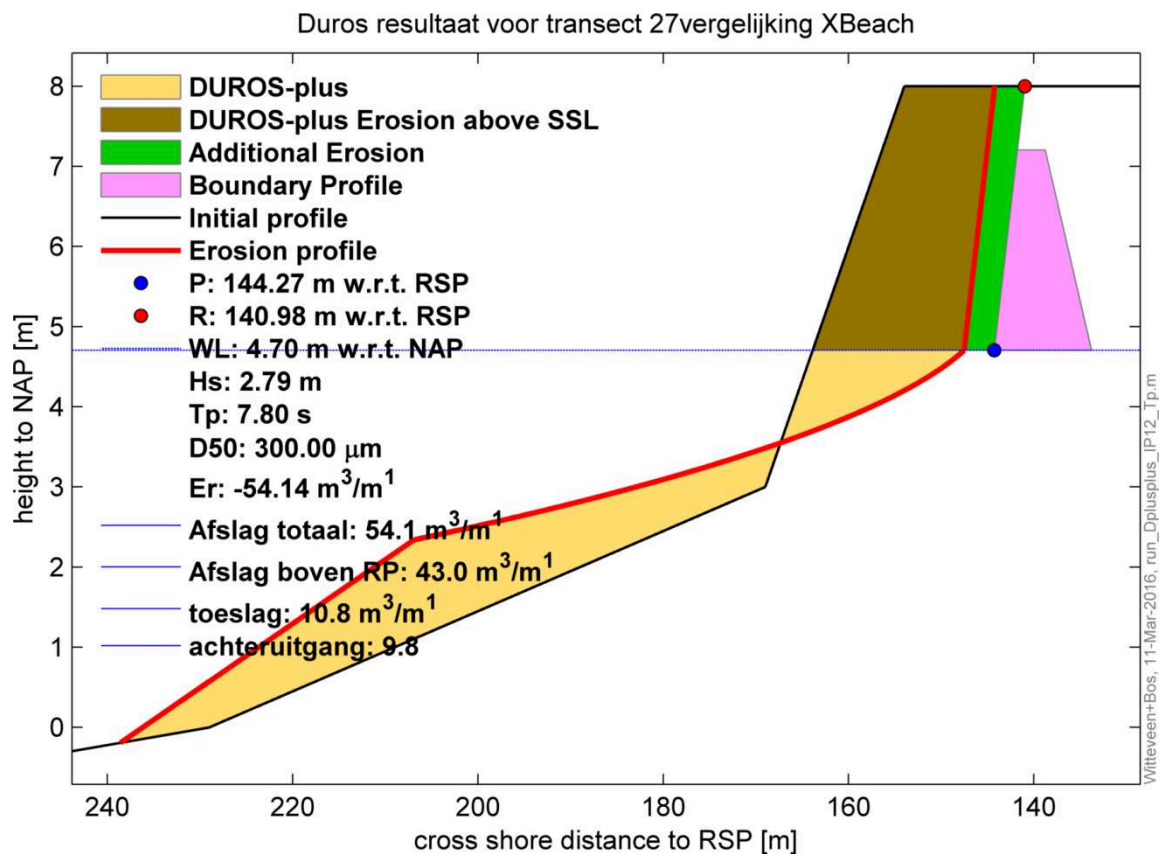
Met behulp van DUROS+ zijn de afslagvolumes vastgesteld voor de hydraulische condities behorende bij een maatgevende storm met een windrichting van 270°N. Het afslagvolume boven Ontwerppeil zonder toeslag varieert van minimaal 38,6 m<sup>3</sup>/m voor raai 11 tot maximaal 43 m<sup>3</sup>/m voor raai 27 (Afbeelding 4.1). Met 25 % toeslag varieert het afslagvolume boven OP van 48,2 m<sup>3</sup>/m tot 54 m<sup>3</sup>/m.

De achteruitgang van het duin op kruinniveau bedraagt maximaal 9,8 m zonder toeslag. Met 25 % toeslagvolume is dit ongeveer 13,1 m. Op basis van de DUROS+ berekeningen en de positie van het afslagpunt op Ontwerppeil wordt vastgesteld dat het afslagpunt zeewaarts ligt van het grensprofiel en dat het ontwerp van het veiligheidsduin voldoet (Afbeelding 4.8).

Tabel 4.1 resultaten DUROS+ berekeningen voor raai 11, 17, 27 en 33

Raainummer	11	17	27	33
Significante golfhoogte [m]	2,49	2,63	2,79	2,70
Piekperiode [s]	7,8	7,80	7,80	7,80
afslagvolume boven Ontwerppeil [m <sup>3</sup> ]	38,6	40,9	43	41,9
afslagvolume boven Ontwerppeil inclusief 25 % toeslag [m <sup>3</sup> ]	48,2	51,1	53,8	52,4
achteruitgang op kruinniveau [m]	8,4	9,1	9,8	9,4

Afbeelding 4.1 Toetsing met DUROS+ voor raai 27



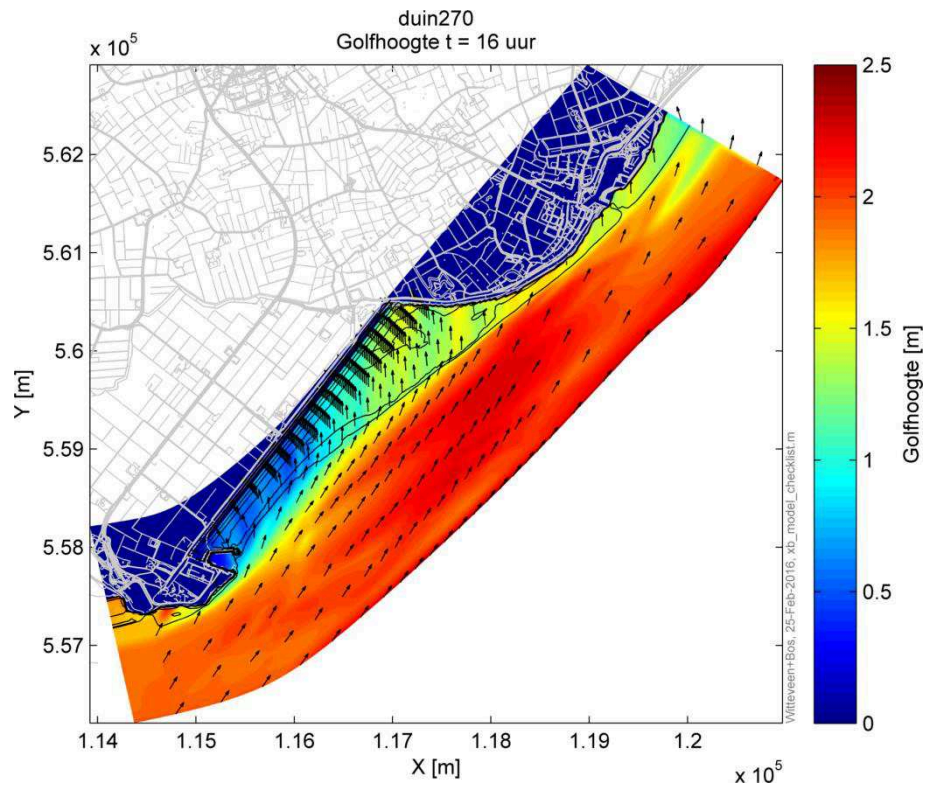
## 4.2 Resultaten XBeach met alleen veiligheidsduin

### 4.2.1 Algemeen

Afbeelding 4.2 toont de ruimtelijke verdeling van de golfhoogte tijdens het piekmoment van de storm bij een windrichting van 270°N. De gemiddelde golfrichting is bijna parallel aan de kust, waardoor slechts een deel van de golven daadwerkelijk het veiligheidsduin bereikt. De hoek van inval bij het duin is groot (>30°) en de golfhoogte aan de voet van het duin varieert sterk van <0,5 m in het zuidelijk deel tot ~1,4 m in het noordelijk deel. Het gevolg is dat er weinig tot geen afslag (verticale erosie: max. 0 - 0,5 m) optreedt in het

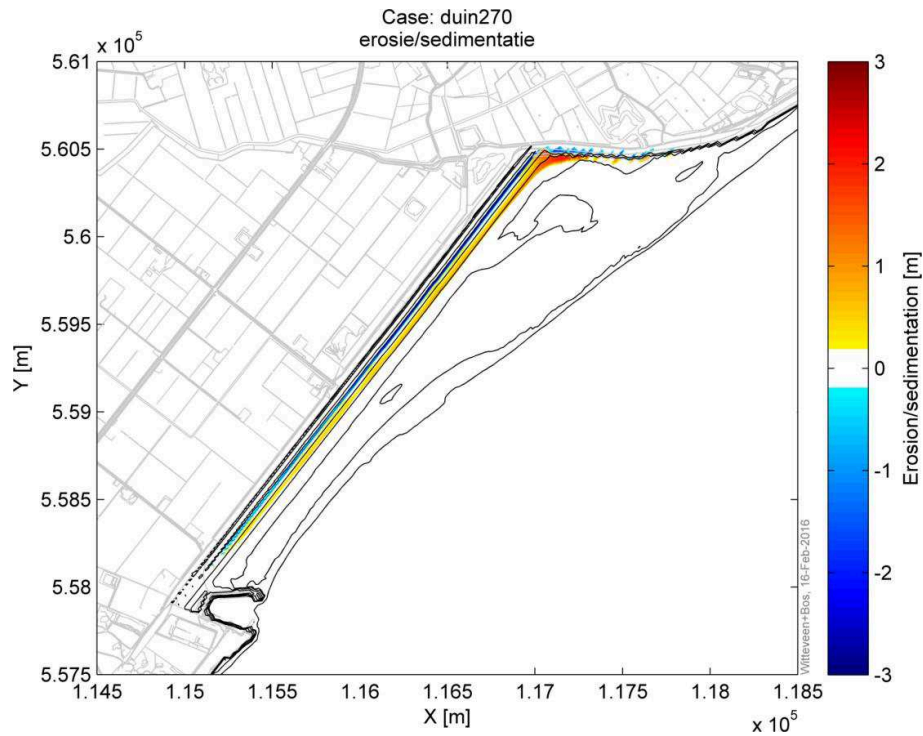
zuidelijk deel van het duin en dat de grootste afslag in het noordelijk deel optreedt (max. 1 - 3 m, Afbeelding 4.3). Het erosie-/sedimentatiepatroon laat verder zien dat ten noorden van de aansluiting van het duin op de dijk 1 - 2 m sedimentatie optreedt. De morfologische veranderingen concentreren zich rond het duin. Op de rest van het plateau voor het duin vinden vrijwel geen morfologische veranderingen plaats.

Afbeelding 4.2 Golfhoogte (Hs) tijdens piekmoment storm (270°N)



In paragraaf 4.2.2 wordt aan de hand van een aantal dwarsprofielen door het duin in meer detail ingegaan op de optredende afslag en sedimentatie rond het duin.

Afbeelding 4.3 Sedimentatie (rood) en erosie (blauw) in meters voor situatie met alleen veiligheidsduin



#### 4.2.2 Toetsing raaien veiligheidsduin

Voor de toetsing van het veiligheidsduin worden de raaien 11, 17, 27 en 33 beschouwd. Het afslagvolume boven Ontwerppeil dat volgt uit de XBeach berekeningen is weergegeven in Tabel 4.2. Dit is fors lager dan de afslagvolumes die zijn bepaald met DUROS+. De afslagvolumes zijn exclusief 25 % toeslag.

Tabel 4.2 Vergelijking afslagvolume boven Ontwerppeil met DUROS+ en XBeach voor raai 11, 17, 27 en 33

Raainummer	11	17	27	33
DUROS+: afslagvolume boven Ont- werppeil [m <sup>3</sup> /m]	38,6	40,9	43	41,9
XBeach 2D: afslagvolume boven Ont- werppeil [m <sup>3</sup> /m]	4,3	5,6	16,7	25,5

In de grafiek van Afbeelding 4.4 zijn de XBeach resultaten (afslag, sedimentatie, achteruitgang) voor alle raaien gepresenteerd. Het ruimtelijke verschil is groot en de hoeveelheid afslag boven Ontwerppeil neemt toe van 0 aan de zuidkant van het duin (raai 1) naar een maximum van 25,5 m<sup>3</sup>/m aan de noordkant van het duin (raai 33). In de afbeelding is ook duidelijk te zien dat er veel sedimentatie plaatsvindt in de laatste drie raaien, wat waarschijnlijk veroorzaakt wordt door het langstransport.

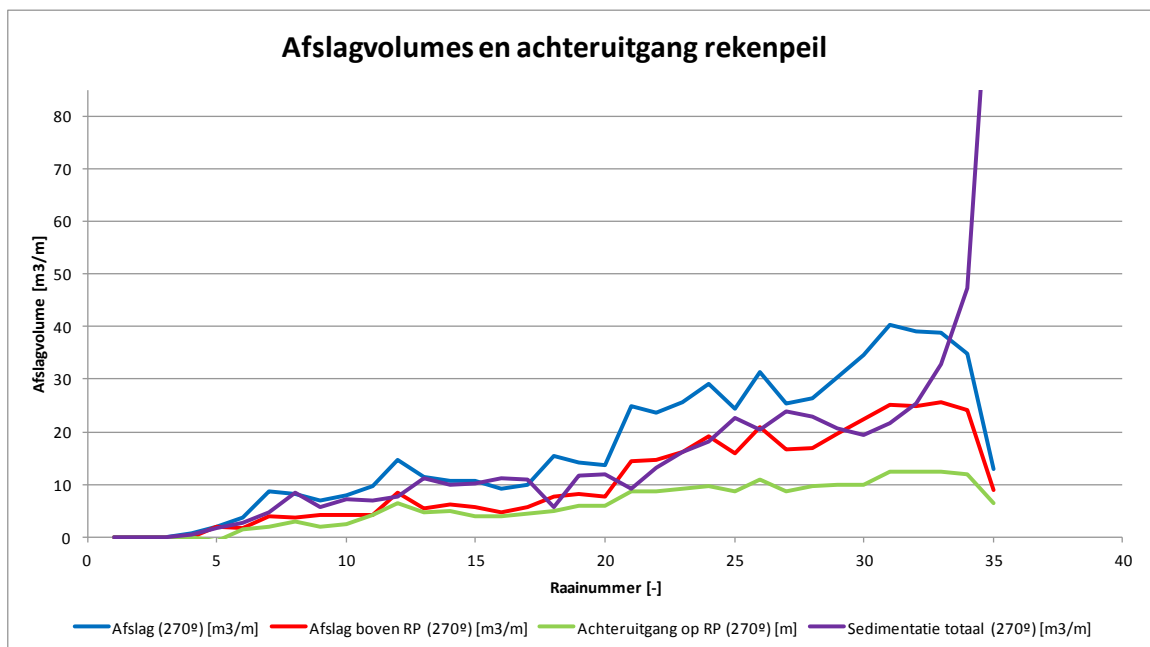
De toetsing is voor raai 33 geïllustreerd in

afbeelding 4.5. Het afslagpunt op Ontwerppeil inclusief toeslag (P) ligt ruimschoots zeewaarts van het Grensprofiel en aangezien dit de maatgevende raai is, voldoet het veiligheidsduin in alle raaien qua veiligheid.

In Afbeelding 4.6, Afbeelding 4.7 en Afbeelding 4.8 is de toetsing weergegeven voor de raaien 11, 17 en 27 met XBeach en DUROS+. Voor alle raaien is er op basis van de DUROS+ berekening ongeveer 2,5-5 meter afstand tussen het kritieke afslagpunt en het grensprofiel. Met XBeach ligt deze afstand tussen de 9m en 18m en is er dus meer marge in het veiligheidsduin aanwezig.

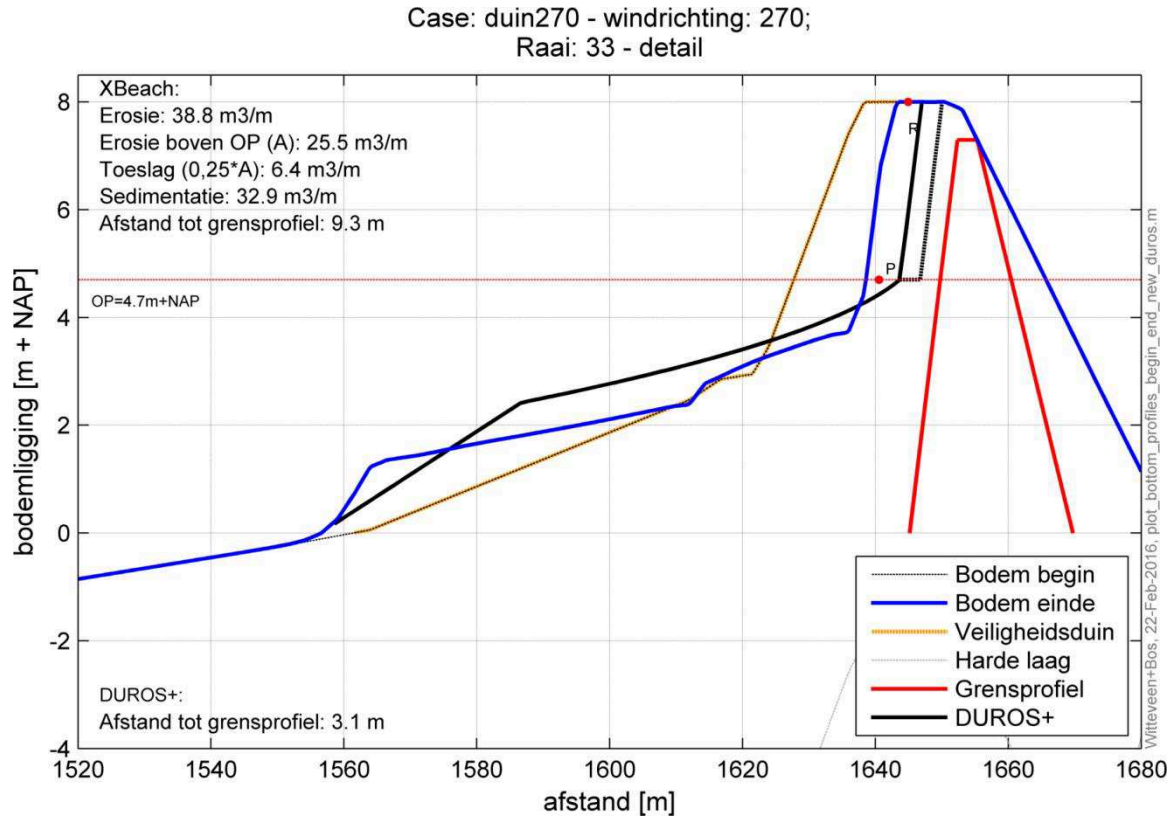
De fors lagere afslag die wordt berekend met XBeach ten opzichte van DUROS+ heeft te maken met het feit dat in DUROS+ een groot aantal processen/effecten niet wordt meegenomen. Het gaat daarbij om de complexiteit van het projectgebied in combinatie met de golfrichting, 2D effecten en effecten van het voorland. Hierdoor varieert de golf aan de duinvoet in werkelijkheid over de lengte van het duin en is deze veel lager dan de golf die in DUROS+ is doorgerekend.

Afbeelding 4.4 Afslag en achteruitgang veiligheidsduin per raai op basis van XBeach berekening (windrichting 270°N, zonder 25% toeslag)

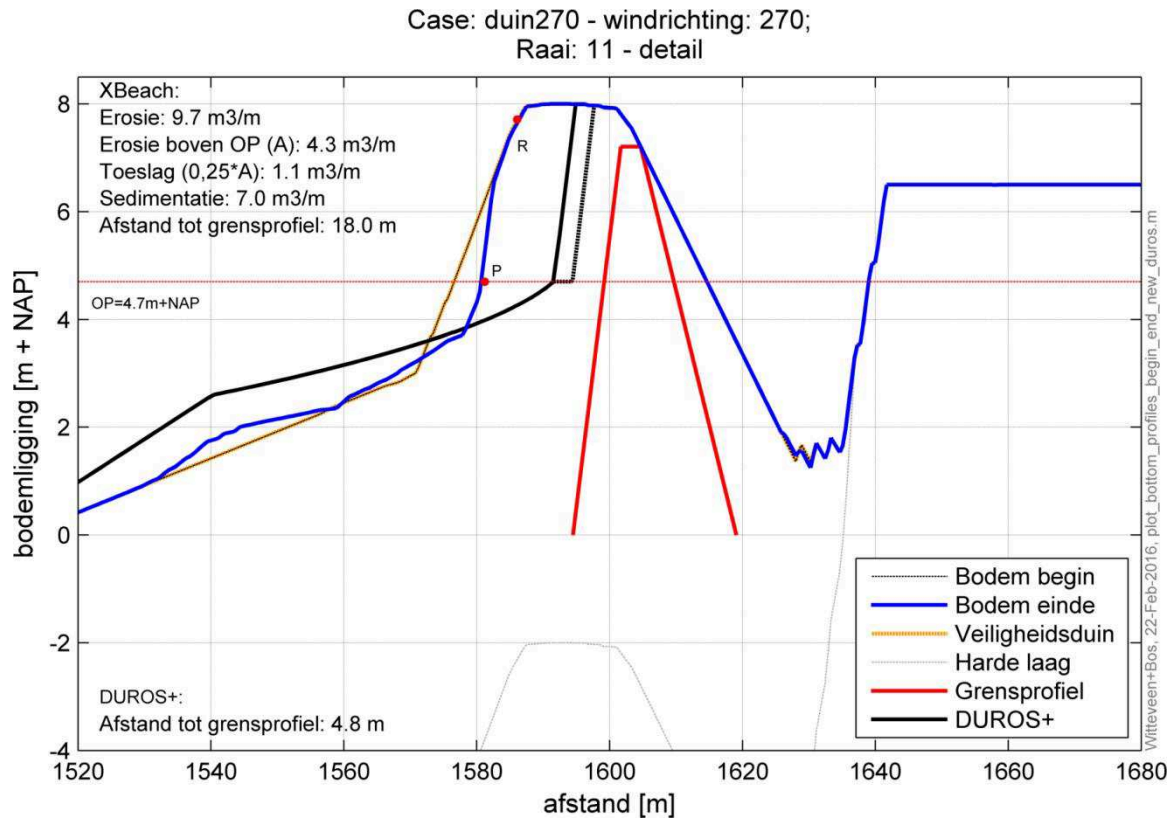




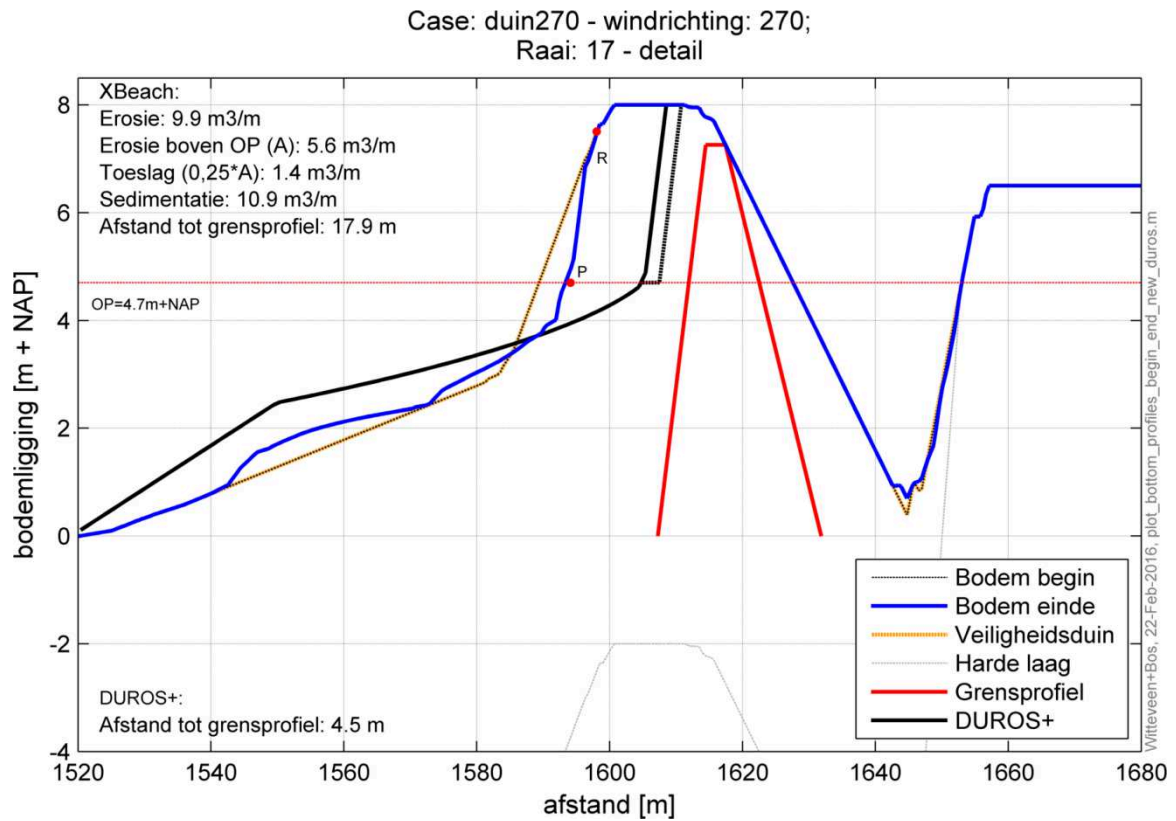
Afbeelding 4.5 Toetsing raai 33 (Ontwerppeil [OP]=NAP + 4,7 m; R=afslagpunt kruin; P=kritiek afslagpunt op OP)



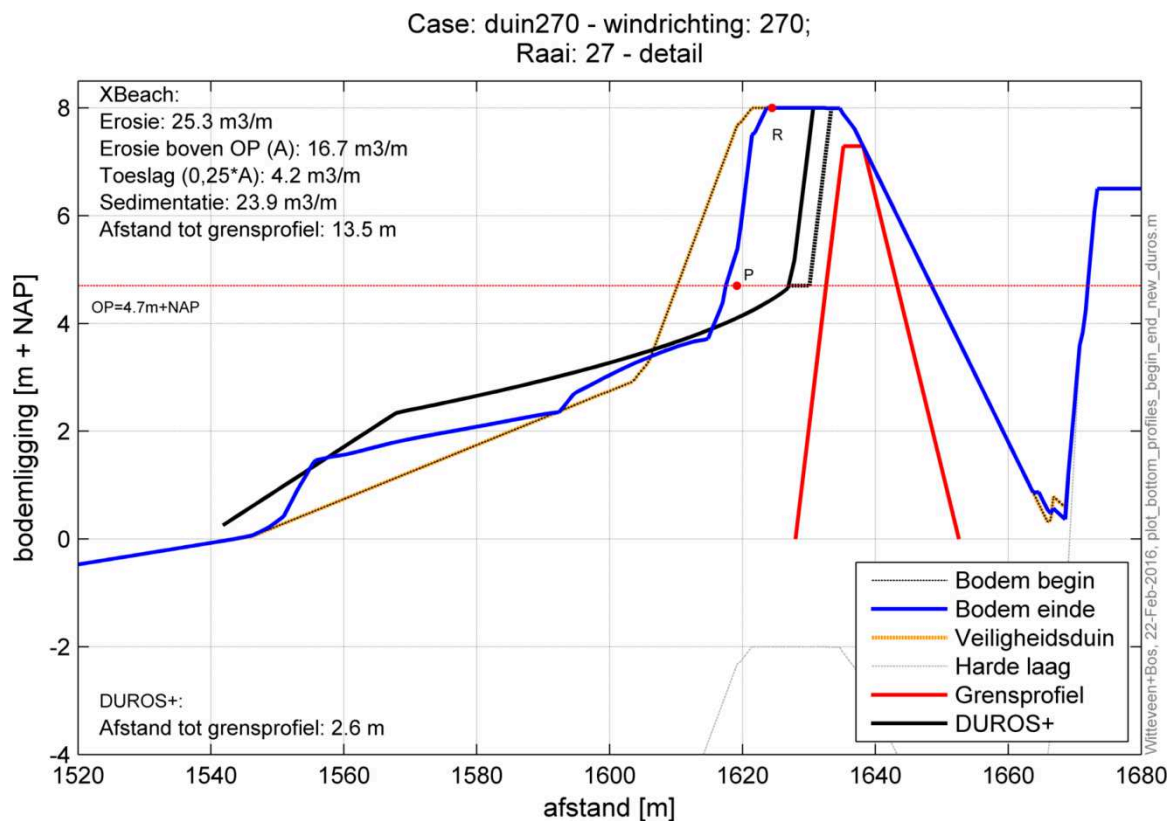
Afbeelding 4.6 Toetsing raai 11 (Ontwerppeil [OP]=NAP+ 4,7 m; R=afslagpunt kruin; P=kritiek afslagpunt op OP)



Afbeelding 4.7 Toetsing raai 17 (Ontwerppeil [OP]=NAP+ 4,7 m; R=afslagpunt kruin; P=kritiek afslagpunt op OP)



Afbeelding 4.8 Toetsing raai 27 (Ontwerppeil [OP]=NAP + 4,7 m; R=afslagpunt kruin; P=kritiek afslagpunt op OP)





### 4.2.3 Bepaling maatgevende windrichting

In de DUROS+ berekeningen speelt de golfrichting geen rol, omdat alle golven loodrecht worden opgelegd aan het model. In DUROS+ blijkt de waterstand de voornaamste maatgevende factor te zijn voor de afslag van het veiligheidsduin. In XBeach speelt de golfrichting wel een rol en ook de ruimtelijke verdeling van de golfhoogte over het gebied wordt gemodelleerd. Het is daarom mogelijk dat een andere windrichting met bijbehorende hydraulische condities maatgevend is voor het ontwerp van het veiligheidsduin. Met XBeach zijn daarom naast de simulaties voor een windrichting van ook 270°N ook simulaties uitgevoerd voor condities bij de windrichtingen 210 °N, 240°N en 300°N.

Wanneer het totale afslagvolume per raai wordt beschouwd, blijkt dat dit met name bij 240°N over het algemeen groter is dan bij 270°N (Afbeelding 4.9). Door de hogere golven op de rand van het model en de golfrichting die meer naar de kust gericht is, zijn de golven aan de duinvoet bij 240°N hoger waardoor er meer afslag optreedt. Voor de veiligheid van het duin is echter niet de hoeveelheid afslag, maar de achteruitgang op het maximale niveau (NAP +4,7 m, Ontwerppeil) maatgevend voor de veiligheid van het duin. Dit bepaalt namelijk de afstand van het afslagpunt tot het grensprofiel.

In principe hoort bij elke windrichting een ander Rekenpeil, zoals in tabel 3.1 is gepresenteerd. Voor een eenduidige referentie is voor de bepaling van de achteruitgang uitgegaan van het snijpunt van het duin met een niveau van NAP + 4,7 m (Ontwerppeil behorend bij een windrichting van 270°N). Afbeelding 4.10 toont daarom de achteruitgang op dit niveau van het veiligheidsduin (punt P in

afbeelding 4.5) voor cases met deze verschillende windrichtingen.

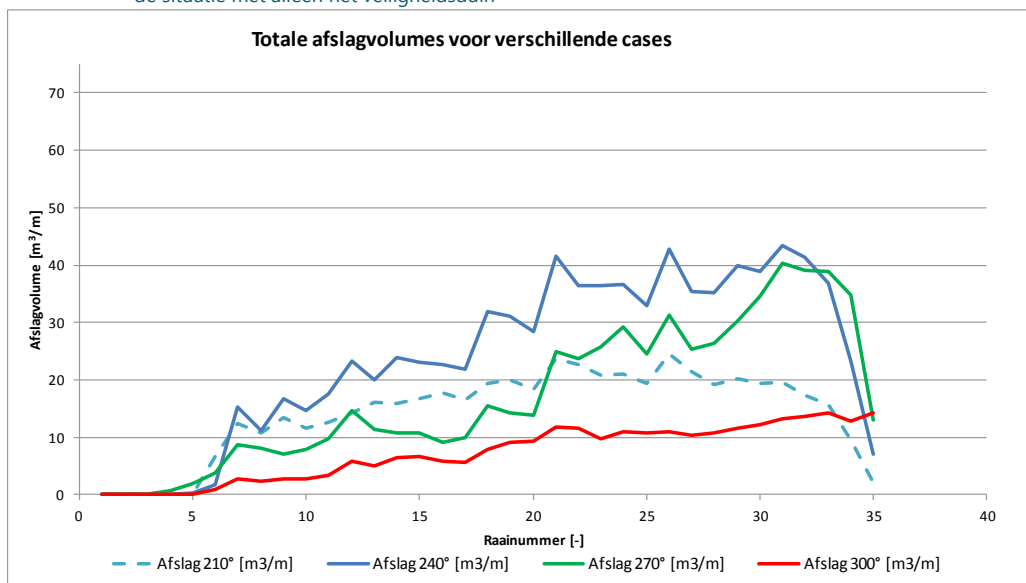
De hydraulische condities bij een windrichting van 210°N geven met deze methode geen achteruitgang van het veiligheidsduin op Ontwerppeil (NAP +4,7 m). Dit wordt veroorzaakt door het lage Rekenpeil (NAP +2,55 m) wat geldt bij deze windrichting. Er vindt wel afslag plaats, echter niet boven het Ontwerppeil. Bij een windrichting van 300°N vindt wel achteruitgang van het duin op het Ontwerppeil plaats, maar deze achteruitgang is in alle raaien kleiner dan die bij 270°N.

Het blijkt dat het verschil in achteruitgang voor 240°N en 270°N tot en met raai 21 niet significant is. Vanaf raai 22 leidt 270°N tot een grotere achteruitgang en daarbij treedt ook de maximale achteruitgang op, in raai 33. Wanneer de maximale achteruitgang over het gehele veiligheidsduin als maat wordt genomen, zijn de hydraulische condities bij 270°N maatgevend.

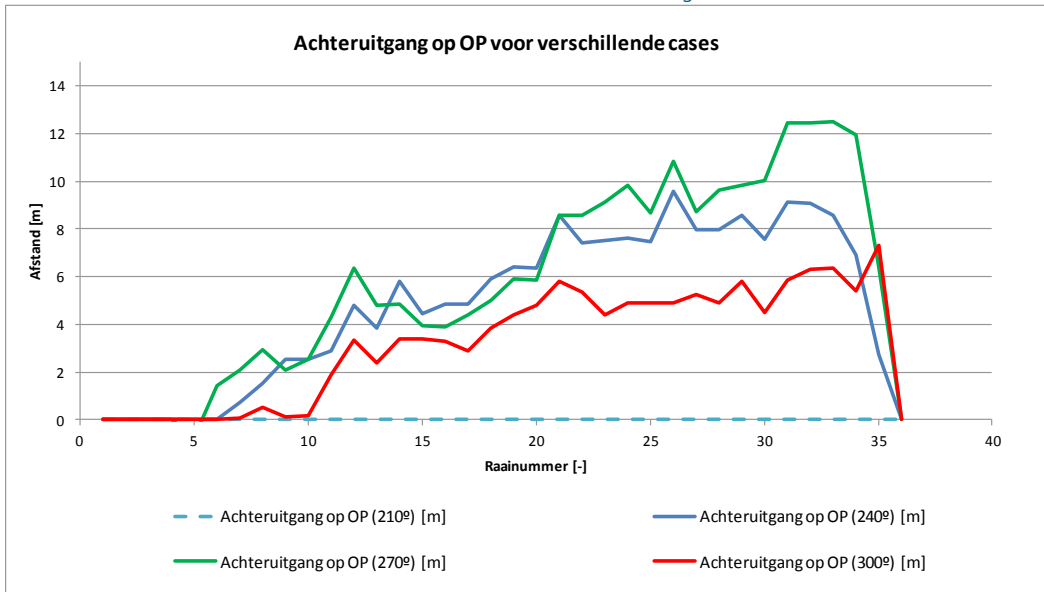
De resultaten laten zien dat de waterstand een belangrijke factor blijft, maar dat de overige hydraulische condities een grotere rol gaan spelen dan in DUROS+. In Afbeelding 4.11 is de verhouding van de golfhoogte van 240°N ten opzichte van 270°N weergegeven,  $H_{s,240}/H_{s,270}$ . Hierin is te zien dat de golfhoogte bij 240°N langs het duin hoger is dan bij 270°N. Echter, wanneer deze verhouding kleiner wordt (ten noorden van raai 22) is de hogere waterstand bij 270°N doorslaggevend voor de mate van afslag van het duin boven het Ontwerppeil.

De condities bij een windrichting van 270°N zijn daarom maatgevend, zowel in XBeach-2D als in DUROS+ (zie voor DUROS+: paragraaf 4.4.2).

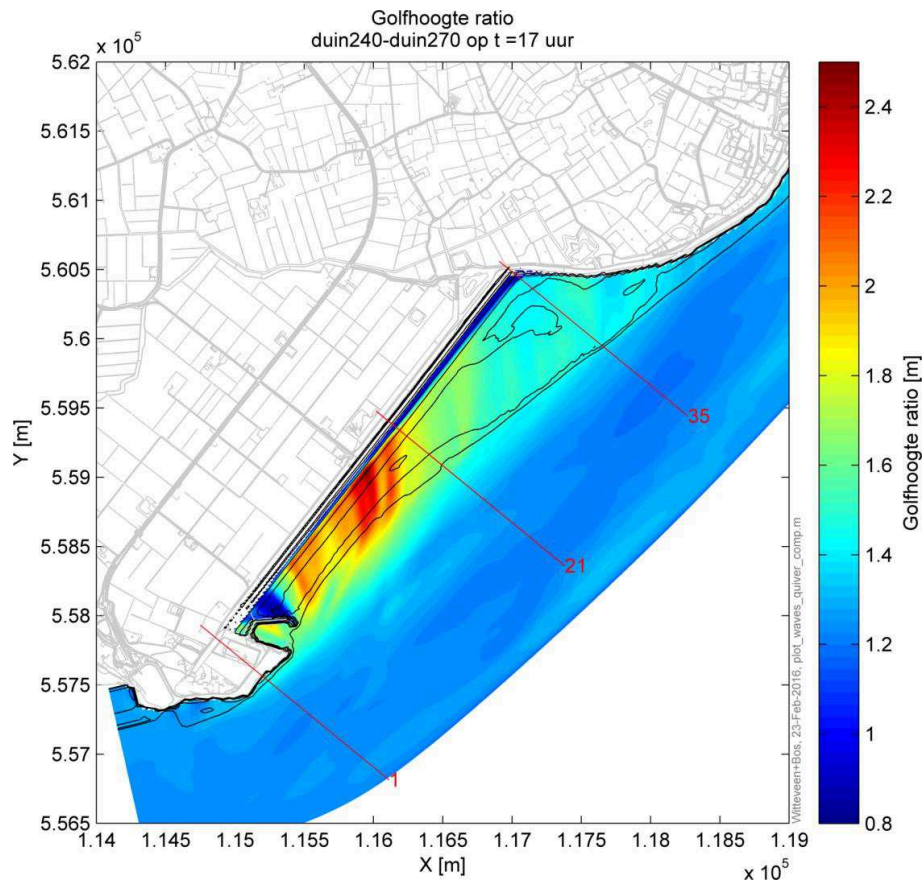
Afbeelding 4.9 Totaal afslagvolume veiligheidsduin voor cases behorende bij windrichtingen 210°N, 240°N, 270°N en 300°N voor de situatie met alleen het veiligheidsduin



Afbeelding 4.10 Achteruitgang veiligheidsduin op Ontwerppeil (NAP +4,7 m) voor cases behorende bij windrichtingen 210°N, 240°N, 270°N en 300°N voor de situatie met alleen het veiligheidsduin



Afbeelding 4.11 Verhouding golfhoogte bij windrichting 240°N en 270°N (ter oriëntatie zijn enkele raaien weergegeven)



### 4.3 Effecten natuurbouw

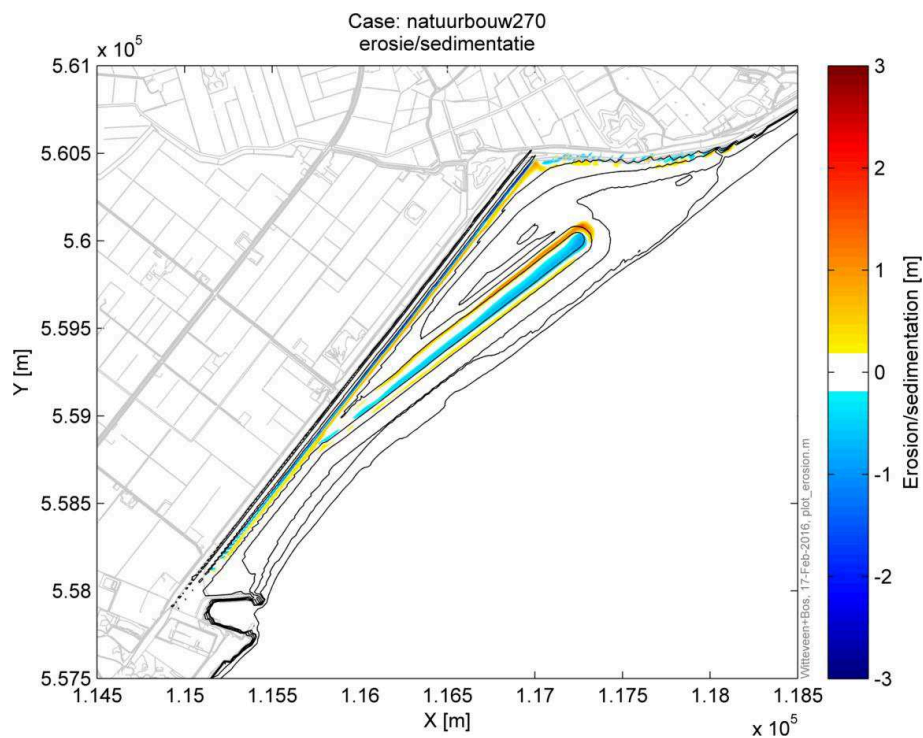
### 4.3.1 Algemeen

In Afbeelding 4.12 is te zien dat de erosie en sedimentatie rond de natuurbouw vrij beperkt is (orde 0 - 0.5 m), de natuurbouw zal dus grotendeels standhouden tijdens ontwerpcondities. De aanwezigheid van de natuurbouw in het voorland op het plateau zou de golfaanval op het achtergelegen veiligheidsduin kunnen beïnvloeden door de mogelijke effecten als blocking, dissipatie en refractie van de inkomende golven.

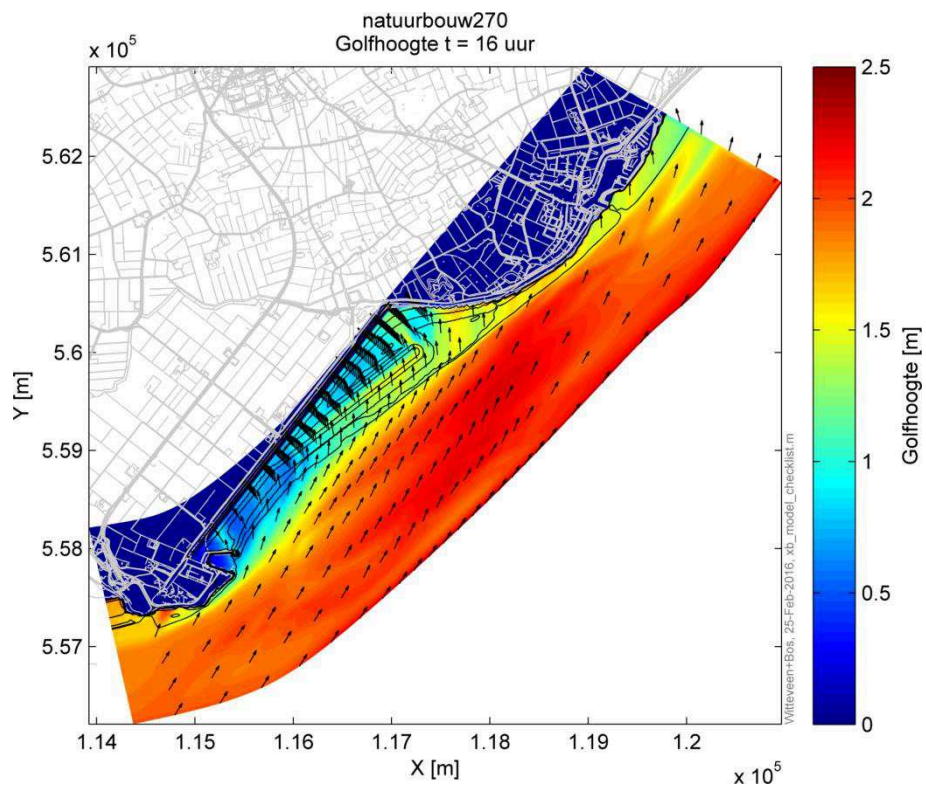
De simulatie met natuurbouw is vooral uitgevoerd om te controleren of de natuurbouw geen negatieve effecten heeft op de veiligheid van het achtergelegen duin. Het wordt niet aanbevolen om eventuele positieve effecten van de natuurbouw op de veiligheid, bijvoorbeeld door reductie van afslag en gradiënten in langtransport, mee te nemen in de beoordeling van de veiligheid van het duin, omdat de natuurbouw daarmee impliciet onderdeel wordt van de waterkering.

De golfhoogte tijdens de piek van de storm in het gebied achter de strandhaak is lager dan in de situatie met alleen het veiligheidsduin, vergelijk Afbeelding 4.13 en Afbeelding 4.2. Dit is duidelijker te zien in de verschilplots van de significante golfhoogte met en zonder natuurbouw (Afbeelding 4.14 en Afbeelding 4.15). De golfhoogte langs het duin neemt door de aanwezigheid van de natuurbouw met 0.5 m af tijdens de piek van de storm ( $t=17$  uur). Bij lagere waterstanden is het blokkerende effect groter en is de afname van de golfhoogte sterker. Zo is op  $t=11$  uur de afname in golfhoogte ongeveer 1,2 m. Geconcludeerd wordt dat de natuurbouw ter hoogte van de strandhaak het achtergelegen duin afschermt tegen hoge golven.

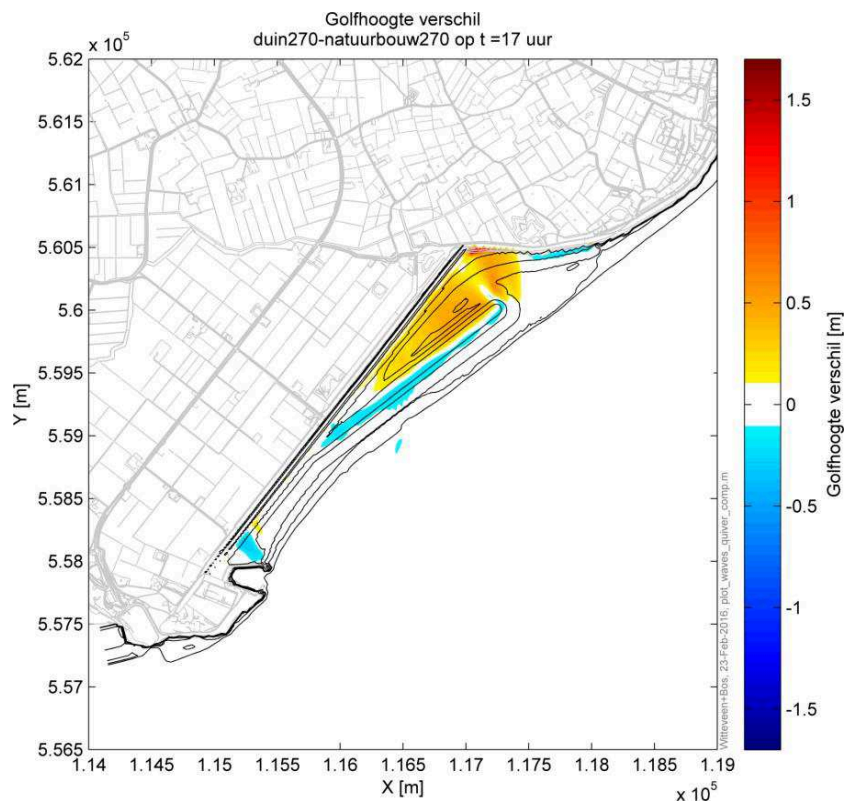
Afbeelding 4.12 Sedimentatie (rood) en erosie (blauw) in meters met natuurbouw



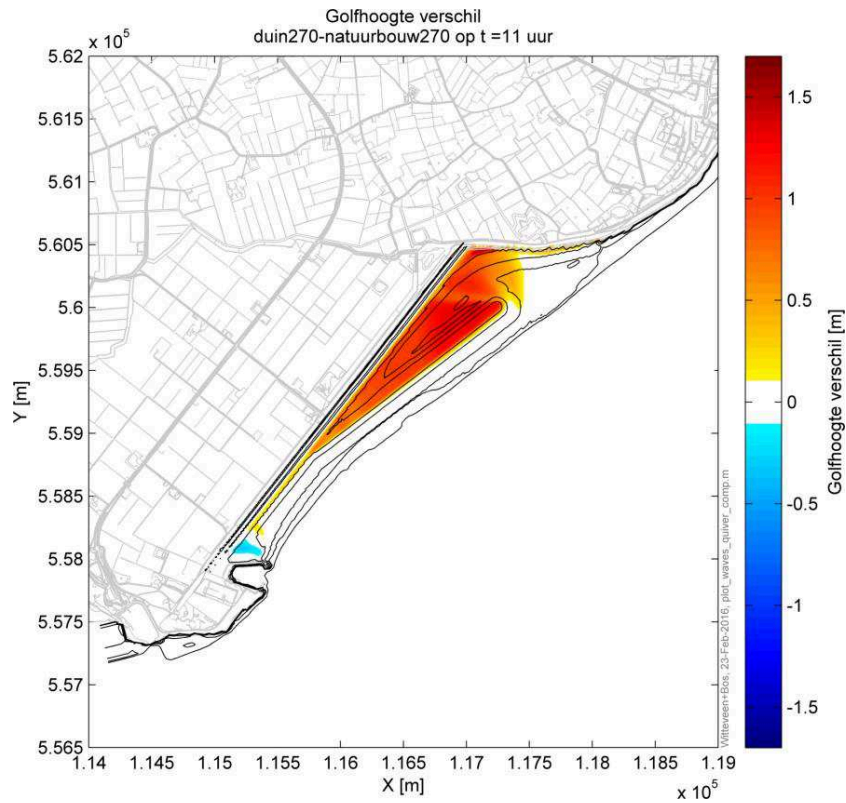
Afbeelding 4.13 Golfhoogte ( $H_s$ ) tijdens piekmoment storm (270°N)



Afbeelding 4.14 Golfhoogte verschil situatie alleen duin - situatie duin+natuurbouw tijdens piek storm (rood → golfhoogte groter met alleen duin; blauw → golfhoogte groter met duin+natuurbouw)



Afbeelding 4.15 Golfhoogte verschil situatie alleen duin - situatie duin+natuurbouw 6 uur voor piek storm (rood → golfhoogte groter met alleen duin; blauw → golfhoogte groter met duin+natuurbouw)



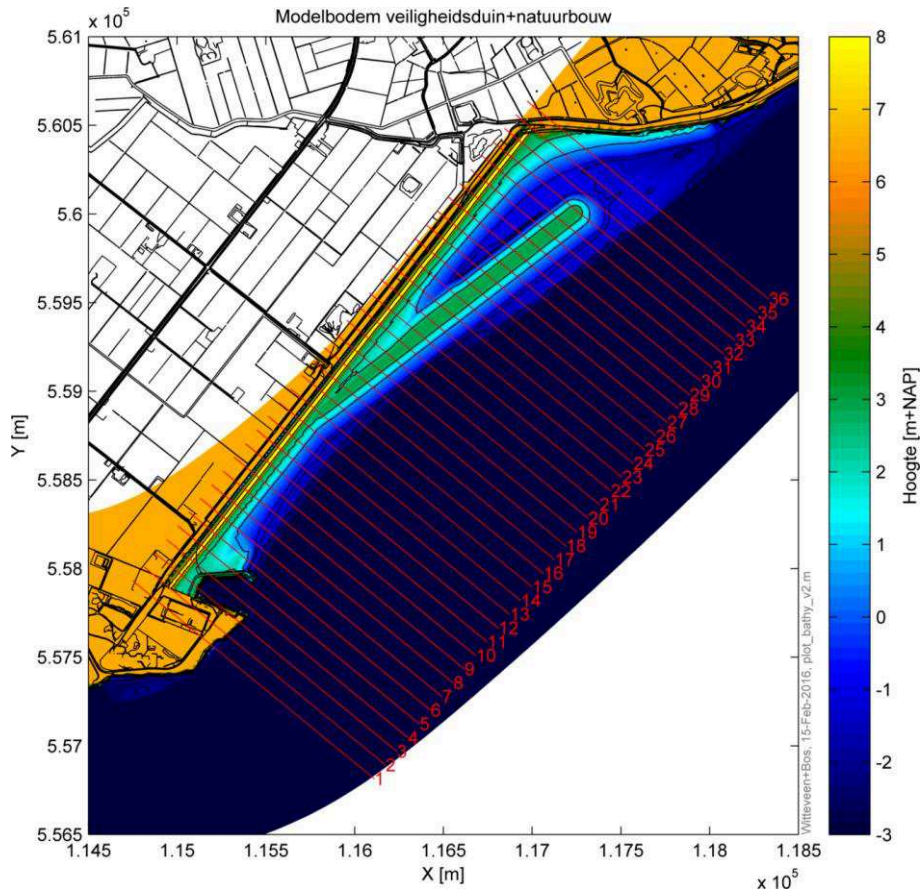
### 4.3.2 Veiligheid

Het effect van de natuurbouw op de veiligheid van het duin verschilt per raai zoals te zien in afbeelding 4.17. De achteruitgang zonder de natuurbouw is overal groter of gelijk aan de situatie met de natuurbouw, maar de verschillen zijn niet significant voor de eerste 20 raaien. Voor raai 21-35 is de achteruitgang zonder natuurbouw een stuk groter. Het blokkerende effect van de natuurbouw op de golven is hier zichtbaar.

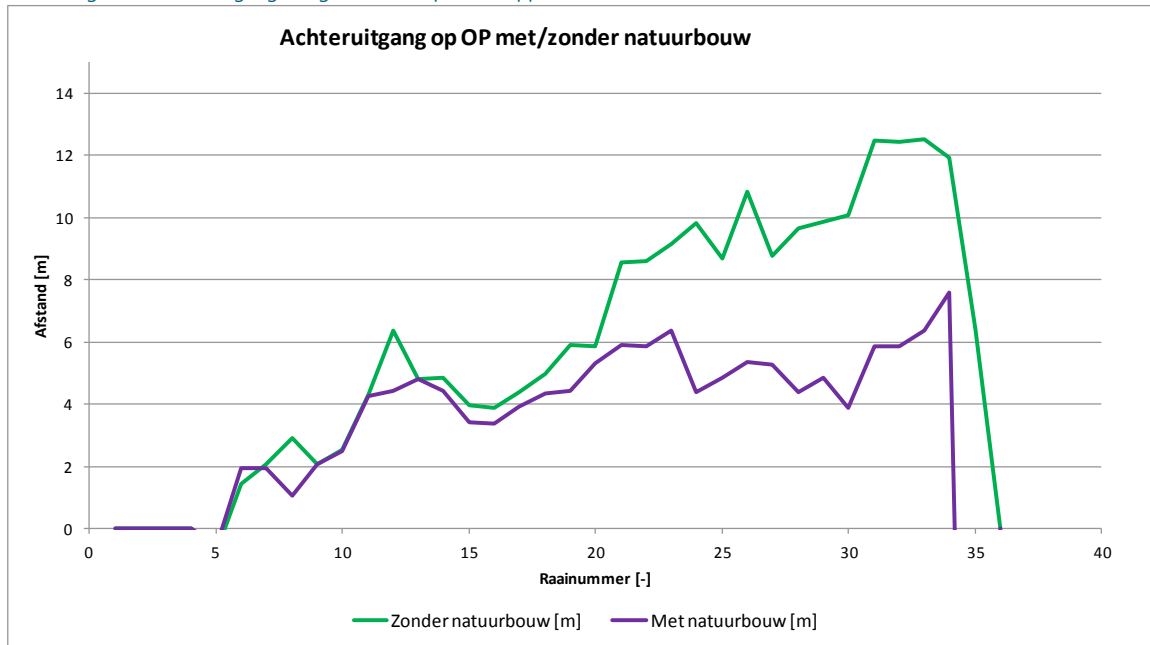
Er wordt vastgesteld dat de natuurbouw een reducerend effect heeft op de afslag van het veiligheidsduin.

Afbeelding 4.16 Raaien ten opzichte van natuurbouw





Afbeelding 4.17 Achteruitgang veiligheidsduin op Ontwerppeil met en zonder natuurbouw



### 4.3.3 Langtransport

De natuurbouw en het plateau voor de duin leiden tot lokale variaties in de golfhoogte langs het veiligheidsduin. Het langtransport langs het duin wordt aangedreven door deze golven. Variaties in

golfhoogte langs het duin kunnen leiden tot sterke gradiënten in het langtransport. Hierdoor kan lokaal extra erosie van het veiligheidsduin optreden.

Afbeelding 4.18 toont het cumulatieve langtransport langs de raaien van het veiligheidsduin over de ontwerpstorm voor de situatie met en zonder de natuurbouw. Het blokkerende effect van de natuurbouw is duidelijk te zien in de lagere transporten die optreden in de situatie met de natuurbouw. Vooral in het gebied achter de strandhaak van de natuurbouw (raai 20-35) zijn de transporten fors lager dan zonder de natuurbouw.

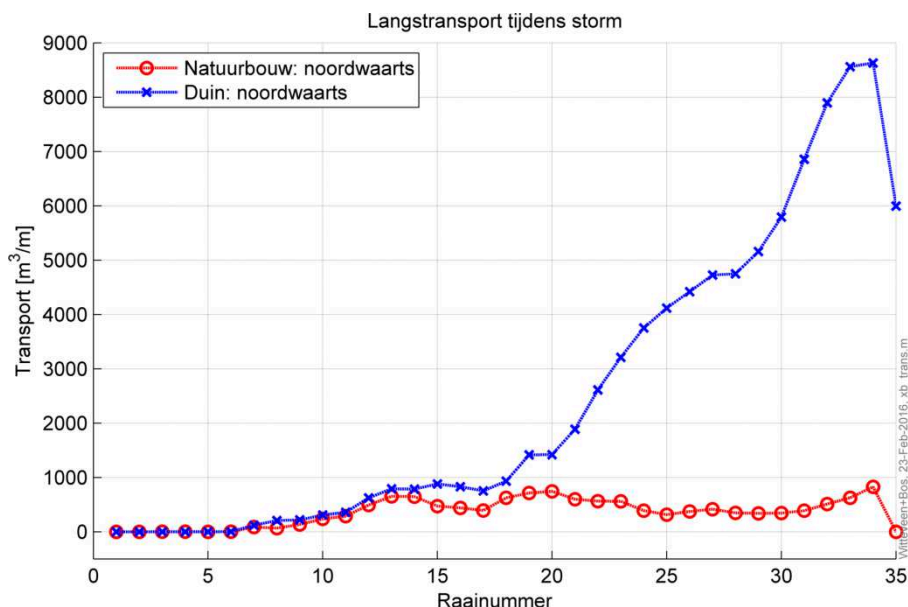
Afbeelding 4.19 toont de gradiënten in het langtransport voor de situatie met en zonder natuurbouw. Een positieve gradiënt in het langtransport leidt tot extra erosie in een raai. In enkele raaien neemt de transportgradiënt licht toe door de natuurbouw. Deze toename is echter relatief klein ten opzichte van de maximale gradiënten die optreden met alleen het veiligheidsduin. Over het algemeen leidt de aanleg van de natuurbouw tot minder erosie door langtransport.

Het maximale verlies door gradiënten in het langtransport zoals berekend met XBeach is zonder natuurbouw ongeveer  $1.000 \text{ m}^3/\text{raai}$  en met natuurbouw ongeveer  $200 \text{ m}^3/\text{raai}$ . De kustlangse afstand tussen de raaien is 100 m, dus dit komt neer op respectievelijk maximaal 10 en  $2 \text{ m}^3/\text{m}$  verlies door langtransport. Gemiddeld is dit verlies ongeveer  $4\text{-}5 \text{ m}^3/\text{m}$  zonder natuurbouw en verwaarloosbaar in de situatie met de natuurbouw. De extra verliezen zijn maximaal 25 % van de afslag die is berekend met DUROS+.

Deze extra verliezen door langtransport zijn impliciet verwerkt in de XBeach berekening, maar kunnen als extra toeslag worden meegenomen in de DUROS+ berekening. Het wordt aanbevolen om hiervoor uit te gaan van een gemiddelde waarde van  $5 \text{ m}^3/\text{m}$ .

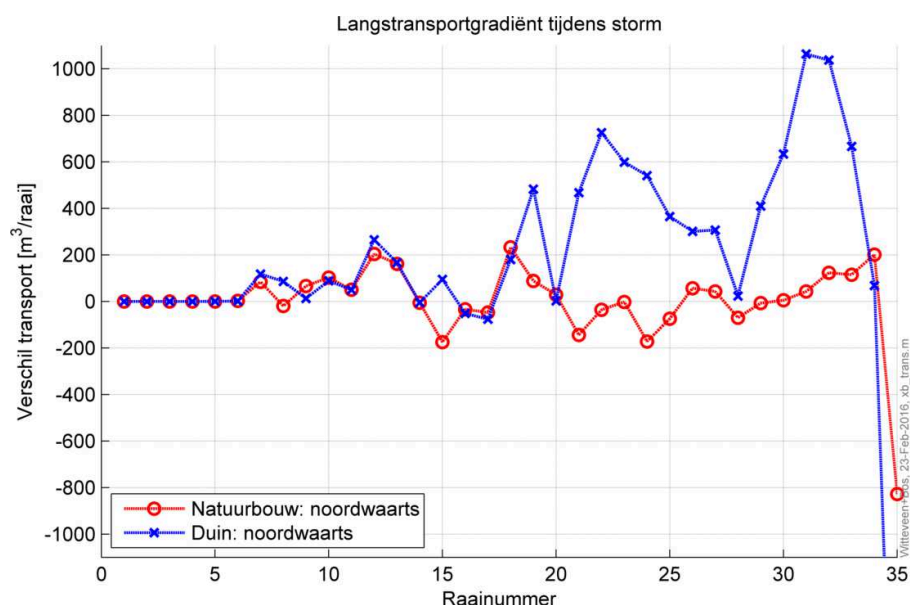
Een gemiddelde waarde heeft de voorkeur, omdat de verliezen door langtransport sterk variëren langs de duin en omdat uit deze studie naar voren komt dat DUROS+ reeds een conservatieve inschatting van de afslag geeft groter dan 25% ten opzichte van XBeach. Uitgaan van het maximale extra verlies van  $10 \text{ m}^3/\text{m}$  zou daarom een te conservatieve benadering zijn, terwijl het negeren van de extra verliezen door langtransport kan leiden tot een onderschatting van de hoeveelheid afslag.

Afbeelding 4.18 Langtransport tijdens storm voor situatie met en zonder natuurbouw



Afbeelding 4.19 Langtransportgradiënt tijdens storm voor situatie met en zonder natuurbouw (erosie : >0; sedimentatie : <0)





## 4.4 Gevoeligheid randvoorwaarden DUROS+

### 4.4.1 Golfperiode

De vergelijking tussen DUROS+ en XBeach wordt uitgevoerd op basis van de golfperiode zoals bepaald in [Ref. 3]. Bij een windrichting van 270°N is de periode 7,8 s. Door een kleinere periode dan 12 s te hanteren wordt afgeweken van voorgeschreven minimale piekgolfperiode van 12 s in DUROS+ (Technisch Rapport Duinafslag 2007 [Ref. 4]).

De gevoeligheid van het hanteren van een lagere periode dan 12 s in DUROS+ is onderzocht door afslagberekeningen uit te voeren met de lagere, werkelijke periode (7,8 s) en met een periode van 12 s (Tabel 4.3). De achteruitgang van de kruin van het veiligheidsduin is maximaal 2,3 m minder met een periode van 7,8 s dan met 12 s. Dat komt neer op een verschil van ongeveer 20 %.

Tabel 4.3 Gevoeligheid DUROS+ berekeningen voor golfperiode

Raainummer	11	17	27	33
achteruitgang op kruinniveau [m] golfperiode 7,8 s	8,4	9,1	9,8	9,4
achteruitgang op kruinniveau [m] minimale golfperiode 12 s	10,4	11,2	12,1	11,6
verschil [m]	2	2,1	2,3	2,2

### 4.4.2 Maatgevende windrichting

Om te verifiëren dat 270°N ook in DUROS+ de maatgevende windrichting is voor de mate van duinafslag, zijn referentieberekeningen uitgevoerd met de randvoorwaarden behorend bij een windrichting van 240°N en 300°N.

De achteruitgang van het duin op kruinniveau bij 240°N is bijna nul, doordat het rekenpeil bij deze windrichting zodanig laag is, dat er weinig afslag optreedt hoog in het dwarsprofiel. Met de randvoorwaarden behorend bij 300°N treedt wel achteruitgang op, omdat het rekenpeil hier hoger ligt, maar de achteruitgang is maximaal 56 % van de achteruitgang bij 270°N.

De randvoorwaarden behorend bij een windrichting van 270°N op de XBeach uitvoerlocaties zijn maatgevend voor het ontwerp van het veiligheidsduin.

Tabel 4.4 Gevoeligheid DUROS+ berekeningen voor windrichting

Raainummer	11	17	27	33
achteruitgang op kruinniveau [m] windrichting 270°N	8,4	9,1	9,8	9,4
achteruitgang op kruinniveau [m] windrichting 300°N	4,6	5,0	5,5	5,2

#### 4.4.3 Locatie randvoorwaarden

De XBeach randvoorwaarden zijn bepaald op uitvoerlocaties in het diepe gedeelte van de Texelstroom, zie Afbeelding 4.20, grote rondjes. Voor de vergelijking van DUROS+ en XBeach zijn de randvoorwaarden op deze punten gebruikt. Echter, voor het definitieve ontwerp van het veiligheidsduin wordt DUROS+ gebruikt waarbij de randvoorwaarden op de NAP -20 m dieptecontour worden gehanteerd. Deze liggen vlak voor het ondiepe plateau.

Op de 20 m dieptecontour zijn de golven meer richting de PHZD gedraaid dan ter plaatse van de XBeach uitvoerpunten die dieper liggen. Dit betekent dat de energie in het kustwaartse deel van het spectrum groter is dan op de diepere uitvoerpunten. Dit resulteert in randvoorwaarden waarin met name de golfhoogte groter is dan op de XBeach uitvoerlocaties.

De golfhoogte in de XBeach randvoorwaarden ligt daardoor lager dan de golfhoogte die zal worden gehanteerd in de DUROS+ berekeningen voor het duinontwerp. Dit is een gevolg van het feit dat het XBeach model een lokaal model is, waarbij de golven alleen op de offshore rand kunnen worden opgelegd, met een richting die het rekendomein binnengaat. Een deel van de golfenergie die op de rand van het XBeach model niet richting de PHZD is gericht, wordt daardoor in XBeach buiten beschouwing gelaten, terwijl een deel hiervan alsnog richting de PHZD kan indraaien door refractie en diffractie.

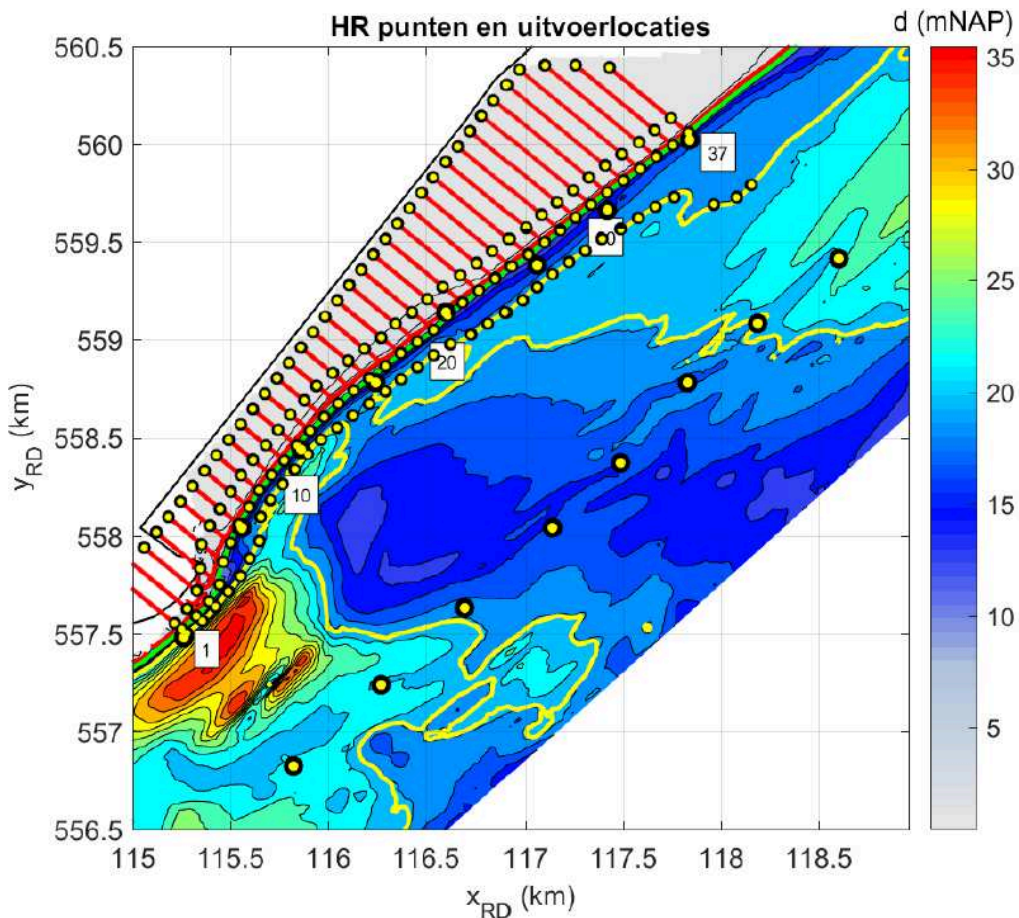
Op basis van XBeach berekeningen is er onvoldoende informatie beschikbaar om te bepalen in welke mate de afslag in XBeach hierdoor wordt onderschat. Een eerste inschatting kan slechts worden gemaakt door de DUROS+ resultaten te vergelijken voor de randvoorwaarden op beide locaties. In DUROS+ is er meer achteruitgang op kruinniveau in de noordelijke raaien 27 en 33 wanneer de randvoorwaarden op de NAP -20 m dieptecontour worden gehanteerd, dan wanneer de XBeach randvoorwaarden worden gehanteerd (Tabel 4.5). De afslag neemt dan met ongeveer 20 % toe.

In de zuidelijke raaien 11 en 17 treedt juist minder achteruitgang op, doordat de golven niet hier nog niet voldoende zijn bijgedraaid. De maatgevende raai voor het ontwerp van het veiligheidsduin is daarom ook in DUROS+ raai 27.

Tabel 4.5 Gevoeligheid DUROS+ berekeningen voor locatie randvoorwaarden

Raainummer	11	17	27	33
achteruitgang op kruinniveau [m] randvoorwaarden op XBeach uitvoerpunten	8,4	9,1	9,8	9,4
achteruitgang op kruinniveau [m] randvoorwaarden op NAP -20 m dieptecontour	5,7	8,0	12,1	11,8

Afbeelding 4.20 SWAN uitvoerraaien en uitvoerlocaties op de NAP -10 m en NAP -20 m dieptelijn, de 100 m landinwaarts verschoven NAP -5 m lijn en de XBeach locaties (grote rondjes) [Ref. 3]



## 5 CONCLUSIES, KANSEN EN RISICO'S

### 5.1 Conclusies

Met XBeach-2D zijn de 1/4.000 jaar hydraulische condities doorgerekend behorende bij de windrichtingen 210°N, 240°N, 270°N en 300°N. Het doel was om de berekeningen te vergelijken met DUROS+ berekeningen en om mogelijke effecten van de natuurbouw op de veiligheid van het duin te onderzoeken.

Het afslagvolume boven Ontwerppeil dat volgt uit de XBeach-2D berekeningen ligt tussen de 4,3 en 25,5 m<sup>3</sup>/m voor de uitgelichte raaien. Dit is fors lager dan het afslagvolume dat is bepaald met DUROS+. De mate

van afslag varieert sterk en is overwegend oplopend van zuid naar noord. De maximale afslag treedt op in raai 33 (25,5 m<sup>3</sup>/m).

De conclusie wat betreft de toetsing van het duin is dat alle raaien ruimschoots voldoen qua veiligheid op basis van de XBeach-2D berekeningen.

Tabel 5.1 Vergelijking afslagvolume boven Ontwerppeil met DUROS+ en XBeach (alle waarden exclusief 25 % toeslag)

Raainummer	11	17	27	33
DUROS+: afslagvolume boven Ont- werppeil [m <sup>3</sup> /m]	38,6	40,9	43	41,9
XBeach 2D: afslagvolume boven Ont- werppeil [m <sup>3</sup> /m]	4,3	5,6	16,7	25,5

De berekeningen met hydraulische condities bij verschillende windrichtingen laten zien dat het verschil in achteruitgang tot en met raai 21 niet significant is voor 240°N en 270°N. Dit betekent dat de maatgevende conditie wordt bepaald door een combinatie van waterstand en golfhoogte.

De maximale achteruitgang treedt echter op bij 270°N en dit is daarom in dit geval de maatgevende windrichting. Het totale afslagvolume is in een aantal raaien hoger voor 240°N, maar dit is niet maatgevend voor de veiligheid van het duin.

Voor een groot deel van het duin en gedurende het grootste deel van de storm heeft de natuurbouw een sterk golfreducerend effect. Er wordt daarbij vastgesteld dat de natuurbouw een reducerend heeft op de afslag van het veiligheidsduin in het gebied achter de strandhaak (raai 20-35).

Het maximale verlies door gradiënten in het langtransport zoals berekend met XBeach-2D is zonder natuurbouw ongeveer 10 m<sup>3</sup>/m en met natuurbouw ongeveer 2 m<sup>3</sup>/m. Deze extra verliezen door langtransport zijn impliciet verwerkt in de XBeach berekening, maar kunnen als extra toeslag worden meegenomen in de DUROS+ berekening. Het wordt aanbevolen om hiervoor uit te gaan van een gemiddelde waarde van 5 m<sup>3</sup>/m.

## 5.2 Kansen

De afslag zoals berekend met het XBeach-2D model is minimaal een factor 1,5 lager dan volgens DUROS+. Daarnaast is de ruimtelijke variatie in de afslag groot aangezien deze oploopt van 0 in het zuiden tot 25,5 m<sup>3</sup>/m in het noorden (raai 33). Hierdoor ontstaat vanuit technisch perspectief extra marge in het ontwerp van het veiligheidsduin en daarmee het ontwerp van de natuurbouw.

De extra marge is onder andere het gevolg van de verfijndere berekeningsmethodiek met XBeach-2D, waarbij geldt dat een dergelijke berekeningsmethodiek op dit moment niet als toetsmethodiek wordt erkend. De marge vanuit technisch perspectief kan daarom niet worden benut, omdat de bestaande toetsmethodiek voor duinen hier niet op is ingericht.

## 6 REFERENTIES

1. Witteveen+Bos, PHZD Morfologische studie ontwerp strandhaak, concept 27 november 2015, referentie: EDM70-19-140/15-019.770.

2. Witteveen+Bos, Planstudie dijkversterking Waddenzeedijk Texel, zandige oplossing Prins Hendrikpolder, 22 september 2011, referentie: EDM70-5/torm/018.
3. Van Vledder Consulting, Deltares (2016), Hydraulische Golfrandvoorwaarden Prins Hendrikzanddijk, ref: VVC54, d.d. 25 januari 2016.
4. Rijkswaterstaat, Technisch Rapport Duinafslag (2007).
5. Rijkswaterstaat, Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen (2007).
6. Deltares, XBeach 1D - Probabilistic model, ADIS, Settings, Model uncertainty and Graphical User Interface (2015).
7. Rijkswaterstaat, Leidraad Zee- en Meerdijken (1999).
8. Thijs Lanckriet, Koen Trouw, Nicolas Zimmerman, Bart De Maerschallck, Tomohiro Suzuki, The effect of wave directional spreading in morphological models: Hindcast of the impact of the impact of the Saint Nicholas storm on the Belgian coast, poster NCK-dagen 2015.
9. Deltares, Advies toets Prins Hendrik Zanddijk, 16 november 2015, kenmerk 1221269-000-HYE-0003.
10. W+B (2013), EDM70-14-340\_006-notd-zettingsberekeningen PWN-leidingen.
11. Witteveen+Bos (2015), PHZD verstuivingsmemo, referentie EDM70-19-102/15.-016.654, versie 12 Oktober 2015,definitief.
12. Rijkswaterstaat RIZA, WL | Delft Hydraulics en KNMI (2000). Scenario's externe krachten voor WB21