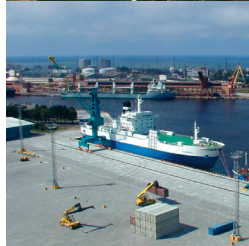


**Planstudie dijkversterking  
Waddenzeedijk Texel**

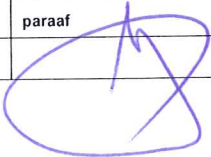
**zandige oplossing  
Prins Hendrikpolder**





**Planstudie dijkversterking  
Waddenzeedijk Texel****zandige oplossing  
Prins Hendrikpolder**

referentie	projectcode	status
EDM70-5/torm/018	EDM70-5	definitief 03
projectleider	projectdirecteur	datum
ing. A.J.P. Helder	drs. D.J.F. Bel	22 september 2011

autorisatie	naam	paraaf
goedgekeurd	ing. A.J.P. Helder	



<b>INHOUDSOPGAVE</b>	<b>blz.</b>
<b>1. INLEIDING</b>	<b>5</b>
1.1. Aanleiding	5
1.2. Zeewering van Prins Hendrikpolder (dijksectie 9)	5
1.3. Doel van rapportage	5
1.4. Leeswijzer	6
<b>2. UITGANGSPUNTEN EN AANNAMEN</b>	<b>7</b>
2.1. Ontwerpleidraden	7
2.2. Levensduur	7
2.3. Dijksectie	7
2.4. Geometrie en omvang duinmassa	7
2.4.1. Ligging en globale dimensies zandlichaam	7
2.4.2. Versterkingsvariant	7
2.4.3. Grensprofiel	8
2.4.4. Benodigd volume zand	9
2.4.5. Zettingen en klink	10
2.5. Bodemligging	10
2.6. Hydraulische uitgangspunten	11
2.6.1. Veiligheidsniveau	11
2.6.2. Waterstanden	11
2.6.3. Golfcondities extreme condities	13
2.7. Omgeving	15
2.8. Uitgangspunten kunstwerken en aansluiting	15
<b>3. TOEPASSING ZANDFRACTIES</b>	<b>17</b>
3.1. Gebiedseigen materiaal en ecologische geschiktheid	17
3.2. Effectiviteit - gevoeligheid korreldiameter op zandvraag	19
3.3. Beschikbaarheid	20
3.4. Samenvatting en conclusies	22
<b>4. DUIN - BASISVOLUME</b>	<b>25</b>
4.1. Basisvolume	25
4.2. Inpassingsvariant	26
4.2.1. Primaire waterkering zeewaarts van de huidige dijk (variant 4)	27
4.2.2. Dijk als onderdeel van grensprofiel (variant 3)	27
4.2.3. Conclusie inpassingsvariant	30
4.3. Afslagprofiel	31
4.3.1. Vorm van het ontwerpprofiel	31
4.3.2. Korreldiameter D50	32
4.3.3. Onnauwkeurigheid	32
4.3.4. Hydraulische parameters	32
4.3.5. Effect gradiënt in langtransport	33
4.4. Resultaten Unibest DE	33
4.5. Resultaten Duros+	33
4.5.1. Vorm van het profiel - invloed helling 1:12,5 in Duros+	33
4.5.2. Resultaten Duros+	34
4.5.3. Gevoeligheid resultaten voor aanlegprofiel	36
4.6. Langtransport	38
4.7. Zettingen	40
4.8. Conclusie basisvolume	41
4.9. Winderosie	42

<b>5. DUIN - VOLUME SLIJTLAAG</b>	<b>43</b>
5.1. Historische ontwikkeling zuid Texel	43
5.2. Kwalitatieve analyse sedimenttransport	46
5.3. Slijtlaag - kwantitatieve analyse	47
5.3.1. Aanpak	47
5.3.2. UNIBEST CL+	47
5.3.3. Resultaten SWAN golfmodel	47
5.3.4. Sediment balans	48
5.3.5. Onzekerheid	51
5.3.6. Vergelijking resultaten met historische ontwikkeling	53
5.4. Onderhoudsbehoefte	53
5.4.1. Verwachte maximale onderhoudsbehoefte	53
5.4.2. Bandbreedte onderhoudsbehoefte	55
<b>6. GEMAAL PRINS HENDRIKPOLDER</b>	<b>59</b>
6.1. Uitgangspunten	59
6.2. Beschrijving huidige gemaal	59
6.3. Omschrijving situatie zandige oplossing	61
6.4. Inpassing gemaal, leiding en uitstroombouw	62
6.4.1. Prins Hendrik gemaal	63
6.4.2. Tracé leiding	63
6.4.3. Vervangende waterkering	65
6.4.4. Afsluiting	65
6.4.5. Uitstroombouw	66
6.5. Hoeveelheden	67
6.6. Waterleiding	68
<b>7. AANSLUITING NOORD EN ZUIDZIJDE</b>	<b>71</b>
7.1. Aansluiting zuidzijde - NIOZ haven	71
7.1.1. Huidige situatie	71
7.1.2. Aansluiting NIOZ haven in zandige oplossing	72
7.2. Aansluiting Noordzijde	75
<b>8. KOSTEN</b>	<b>77</b>
8.1. Benodigde volume zand in duin en zandprijs	77
8.1.1. Basisvolume	77
8.1.2. Slijtlaag	77
8.1.3. Zandprijs	77
8.2. Natuurbouw	78
8.3. Inpassingskosten	79
8.4. Raming	79
<b>9. ONTWERPOVERZICHT EN ONZEKERHEDEN</b>	<b>81</b>
9.1. Ontwerpoverzicht	81
9.2. Risico's en onzekerheden	82
<b>10. LITERATUUR</b>	<b>87</b>
laatste bladzijde	<b>87</b>
<b>BIJLAGEN</b>	<b>aantal bladzijden</b>
I Schetsontwerp Buitendijkse versterking [ref. 2.]	1
II SWAN berekeningen Texel [ref. 7.]	24

III Historische kustontwikkeling zuidkust Texel	16
IV Slijtlaag duin	50
V Kostenraming	3
VI Tekening ontwerp ZOP	1





## **1. INLEIDING**

### **1.1. Aanleiding**

In 2009 heeft het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) de Startnotitie m.e.r. voor de versterking van de waddenzeedijk Texel ter inzage gelegd. De gemeente Texel heeft hierop namens een aantal belangenpartijen via een zienswijze op de Startnotitie voorgesteld om voor het deel van de Waddenzeedijk langs de Prins Hendrikpolder (sectie 9) een alternatieve versterkingsoplossing te onderzoeken. Deze extra variant bestaat uit het versterken van de dijk door de aanleg van een buitendijks kunstmatig duin- en natuurgebied, de zogenaamde 'zandige oplossing'. Volgens de initiatiefnemers is het voordeel van een zandige oplossing dat deze eenvoudig te onderhouden en uit te breiden is.

In een bestuurlijk overleg tussen HHNK, de gemeente Texel en de Provincie Noord-Holland, op 19 oktober 2010, is besloten om haalbaarheid van de zandige oplossing nader te onderzoeken en als variant in het MER op te nemen. De kosten voor dit onderzoek worden voor circa 90% gedragen door het van het ministerie van EL&I, dat financiering beschikbaar heeft gesteld vanuit het programma 'Naar een rijke Waddenzee'. De gemeente Texel draagt de overige 10% bij.

In het bestuurlijk overleg zijn voor de uitwerking van de extra variant de volgende uitgangspunten meegegeven:

- De locatie voor de zandige oplossing is de zone tussen de huidige dijk en de diepe geul voor de kust;
- de zandige oplossing moet als volwaardige primaire waterkering kunnen functioneren en vervangt daarmee de huidige dijk.

### **1.2. Zeewering van Prins Hendrikpolder (dijksectie 9)**

De zeedijk van Prins Hendrikpolder heeft een lengte van circa 3.200 m (DP 3.0 - DP 6.2). De geul van de Texelstroom ligt meer dan 400 m uit de dijk. Omdat de Texelstroom de neiging heeft om dicht langs de kant te gaan lopen is door Rijkswaterstaat langs de geul een erosiebescherming aangebracht die voortdurend wordt uitgebreid en onderhouden (dijkbeheerder). Direct buitendijks bevindt zich de Waddenzee, die langs de dijk ondiep is (tot circa NAP - 1 m aan de buitenzijde van de steenbestorting). De ondiepte tussen de Prins Hendrikdijk en de getijdegeul Texelstroom beslaat een oppervlakte van ongeveer 200 hectare.

Aan de zuidzijde sluit de dijk van dijksectie 9 aan op de inlaagdijk 't Horntje en aan de noordzijde op de Westdijk. In dijksectie 9 bevinden zich één kunstwerk en één leiding: ge- maal Prins Hendrikpolder (115k1) en een waterleiding (115k).

In de tweede toetsronde scoorde (gedeelten van) dijksectie 9 onvoldoende voor de volgende faalmechanismen: erosie buitentalud, afschuiven binnentalud, micro-instabiliteit, afschuiven binnentalud (binnenberm) en piping. Derhalve is dit dijkvak opgenomen in het landelijk Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Zoals in afbeelding 2.1 te zien, scoort niet het gehele traject onvoldoende op allen faalmechanismen. In de verbetering wordt wel het gehele traject verbeterd voor alle faalmechanismen: een integrale versterking.

### **1.3. Doel van rapportage**

Het doel van deze rapportage is om een ontwerp te presenteren van de zandige oplossing voor de Prins Hendrikpolder. Het ontwerp geeft inzicht in de technische haalbaarheid, inpassing en de kosten, zodat deze als MER-variant kan worden beoordeeld.

De volgende subdoelen zijn onderscheiden:

1. het opstellen van een nota van uitgangspunten en hydraulische randvoorwaarden;
2. het opstellen van een ontwerp van de zandige oplossing voor een tweetal representatieve dwarsdoorsneden dat voldoet aan het volgende:
  - de ligging is afgestemd met de gemeente Texel;
  - optimalisatie naar, beschikbaarheid van materiaal, effectiviteit/onderhoudsinspanning en het streven naar gebiedseigen materiaal;
  - globale inpassing van het gemaal Prins Hendrikpolder en zoetwater aanvoerleidingen;
3. het beschouwen van de aansluiting op de bestaande waterkering ter hoogte van de NIOZ-havenzijde en aan de noordzijde van het te creëren duin.

#### **1.4. Leeswijzer**

In hoofdstuk 2 zijn de uitgangspunten die gehanteerd worden in de rapportage weergegeven. In hoofdstuk 3 wordt een beschouwing gegeven en een keuze gemaakt voor de te hanteren zandfractie. In hoofdstuk 4 wordt het benodigde basisvolume van het duin bepaald. In hoofdstuk 5 wordt de slijtlaag bepaald. Het eerste deel van het hoofdstuk betreft een kwalitatieve beschouwing van het morfologisch gedrag. In het tweede deel volgt een kwantitatieve uitwerking.

In hoofdstuk 6 en 7 worden respectievelijk de inpassing van het Prins Hendrikgemaal en de aansluiting op de dijk beschouwd.

In hoofdstuk 8 wordt raming van de kosten van de zandige oplossing gegeven.

De rapportage sluit af met een ontwerpoverzicht, welke bestaat uit een samenvoeging van onderdelen uit de voorgaande hoofdstukken (paragraaf 9.1) en een paragraaf over de risico's en onzekerheden (paragraaf 9.2).

## **2. UITGANGSPUNTEN EN AANNAMEN**

### **2.1. Ontwerpleidraden**

De primaire waterkering wordt ontworpen conform de vigerende ENW- en TAW-publicaties.

### **2.2. Levensduur**

De maatregel wordt ontworpen voor een planperiode tot het jaar 2065, overeenkomende met een levensduur van 50 jaar.

### **2.3. Dijksectie**

De Waddenzeedijk is opgedeeld in tien dijksecties. De zandige oplossing wordt voor dijksectie 9, de zeedijk van Prins Hendrikpolder (DP 3.0 - DP 6.2), uitgewerkt.

### **2.4. Geometrie en omvang duinmassa**

#### **2.4.1. Ligging en globale dimensies zandlichaam**

De ligging van de zandige kering ten opzicht van de Texelgeul en de zeedijk is vastgelegd in de workshop 'ecologische meerwaarde' [ref. 2.]. In bijlage I is het schetsontwerp uit [ref. 2.] opgenomen. Dit schetsontwerp dient als uitgangspunt voor de uitwerking van de zandige oplossing.

Het zandlichaam zal over de volledige lengte van dijksectie 9 aansluiten op de zeedijk. Daarnaast zijn de volgende globale dimensies voor het zandlichaam gegeven [ref. 2.]:

- 150 - 200 m breed;
- circa 10 m hoog (iets hoger dan de huidige dijk).

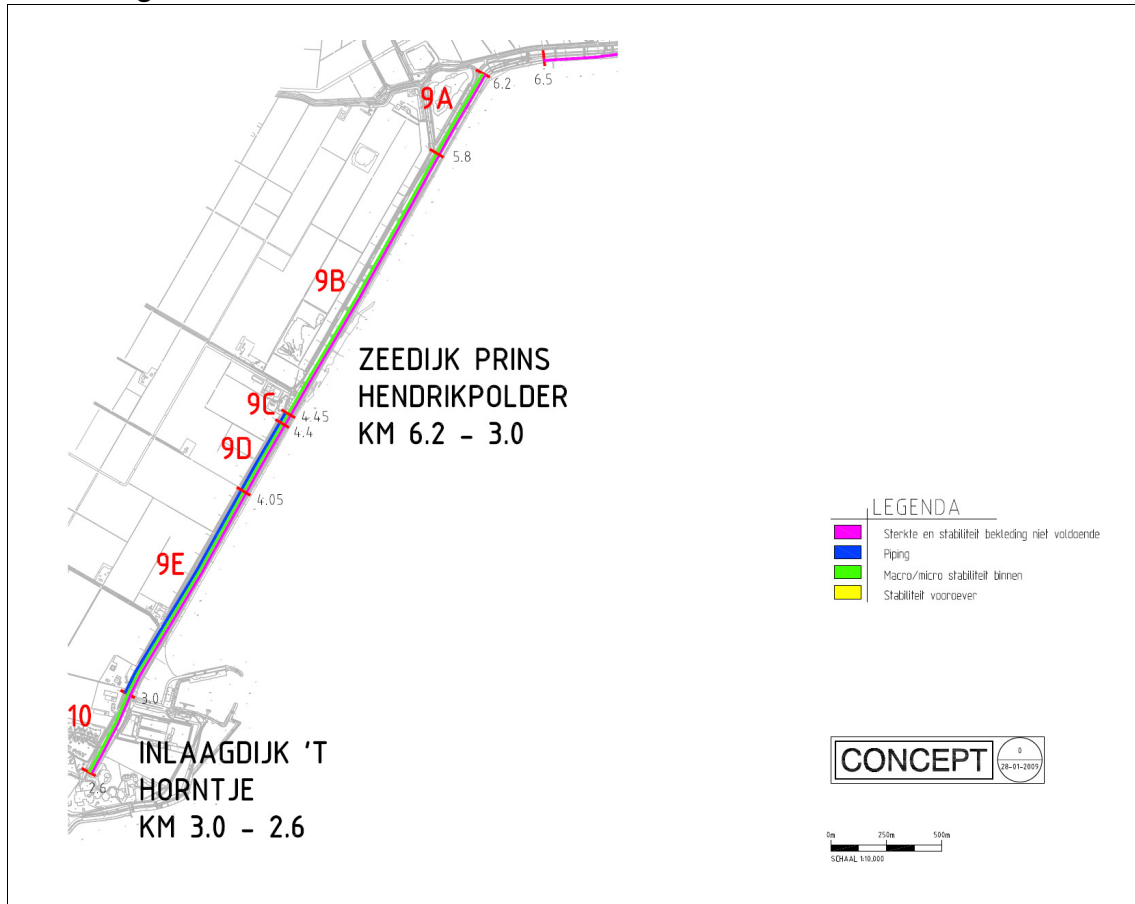
De exacte dimensies van het zandlichaam zullen volgen uit de uitwerking van de zandige oplossing.

Naast een zandlichaam voor de zeedijk (zoals hierboven beschreven) zijn in de workshop 'ecologische meerwaarde' een landtong (een vloedhaak) en een eiland tussen de Texelgeul en het zandlichaam voorgesteld. Deze onderdelen hebben effect op de natuurwaarden van de zandige oplossing maar worden verondersteld geen onderdeel uit te maken van de waterkering. In het ontwerp van de zandige kering wordt uitgegaan van een duin die aan de ene zijde aansluit op de huidige zeedijk en aan de geulzijde geleidelijk aansluit op de huidige zeebodem.

#### **2.4.2. Versterkingsvariant**

In de tweede toetsronde scoorde (gedeelten van) dijksectie 9 onvoldoende voor de volgende faalmechanismen: erosie buitentalud, afschuiven binnentalud, micro-instabiliteit, afschuiven binnentalud (binnenberm) en piping. Zoals in afbeelding 2.1 te zien, scoort niet het gehele traject onvoldoende op alle faalmechanismen. In de verbetering wordt wel het gehele traject verbeterd voor alle faalmechanismen: een integrale versterking.

**Afbeelding 2.1. Resultaten tweede toetsronde**

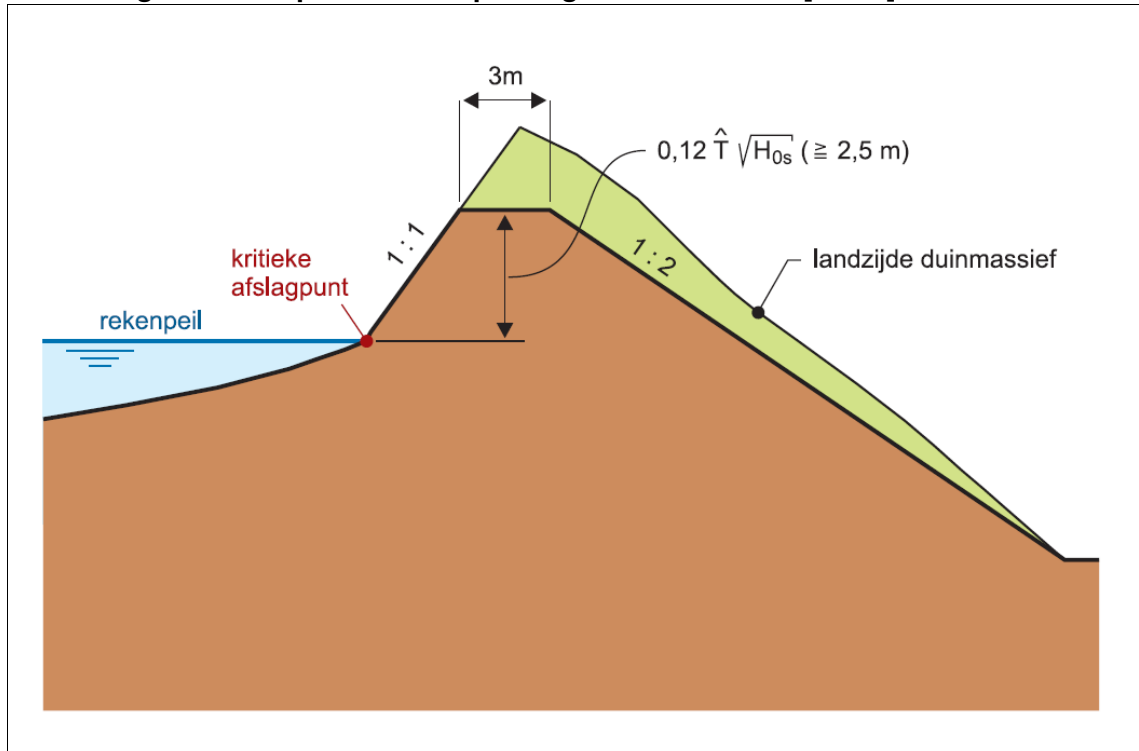


Het uitgangspunt is dat de zandige oplossing een volwaardige primaire waterkering is die een integrale oplossing biedt voor de verwachte problemen met betrekking tot waterveiligheid gedurende de ontwerperperiode van 50 jaar. De zandige oplossing is daarmee een vervanger voor de huidige primaire waterkering. Een uitwerking van de gehanteerde inpasingsvariant is gegeven in paragraaf 4.2.

### 2.4.3. Grensprofiel

Landwaarts van het kritieke afslagpunt (afbeelding 2.2) dient er nog een minimaal, maar stabiel profiel aanwezig te zijn: het grensprofiel. In afbeelding 2.2 zijn de minimaal benodigde afmetingen van het grensprofiel conform het technische rapport Duinafslag [ref. 9.] aangegeven. Dezelfde afmetingen worden aangehouden bij het uitwerken van de zandige oplossing. Het binnentalud van de huidige zeedijk wordt gezien als de 'landzijde van het duinmassief'. Een alternatief voor een zeer laag duin is compensatie van de hoogte door een bredere kruin. Het volume boven het rekenpeil dient dan gelijk te zijn aan het volume boven het rekenpeil zoals gegeven in afbeelding 2.2. In deze studie wordt uitgegaan van het grensprofiel zoals gegeven in afbeelding 2.2.

**Afbeelding 2.2. Grensprofiel met inpassing achterkant duin [ref. 9.]**



#### 2.4.4. Benodigd volume zand

Het benodigde volume zand bestaat uit een basisvolume en een slijtlaag. Beide onderdelen worden hieronder toegelicht.

##### Duinafslag - basisvolume

Met een zandafslagmodel wordt het benodigde volume zand in het duin bepaald die aanwezig dient te zijn op het moment van de maatgevende extreme omstandigheden (het basisvolume). Hierbij zullen de modellen Duros+ en Unibest DE gehanteerd worden. Formeel dient het Duros+ model te worden gehanteerd [ref. 9.]. Om de duinafslag en het langstransport inzichtelijk te maken zal ter ondersteuning Unibest DE worden toegepast.

Beide duinafslagmodellen hebben als input diepwater golfcondities en zijn afgeregeld voor een gemiddeld kustprofiel van de Hollandse kust. Voor de voorliggende situatie zijn de modellen niet gevalideerd aan metingen.

Voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden (diepwater golven) die als input dienen voor het afslagmodel, wordt uitgegaan van de aanpak die is gehanteerd voor de toetsing van de kop van Ameland [ref. 6.]. De hydraulische randvoorwaarden worden gegeven in paragraaf 2.6.

##### Duinafslag - slijtlaag

Voor de aanleg van de suppletie dient rekening te worden gehouden met de verwachte zandverliezen gedurende de periode tussen aanleg en het optreden van de extreme condities. De aanvullende hoeveelheid zand die nodig is om de verliezen op te vangen wordt hier slijtlaag genoemd. Als vertrekpunt voor het bepalen van de volumes wordt de analyse uit de notitie 'versterkingsalternatieven voor de dijk Texel' [ref. 3.] gehanteerd

De slijtlaag wordt ontworpen met een bepaalde levensduur. Onderwerp van de studie is deze slijtlaag te optimaliseren, uit te drukken in termen van levensduur van (elk aangebrachte) slijtlaag. Dit komt dan overeen met de herhalingstijd van de reguliere onderhoudsuppletie voor het opnieuw aanbrengen van de slijtlaag. Voor een goede (kosten)vergelijk met het alternatief van versterken van de dijk (in het onderhavig vraagstuk te beschouwen als een nulplus alternatief), worden de suppleties beschouwd voor een totaal periode van 50 jaar. Deze periode wordt in het rapport ook wel als de totale levensduur van de maatregel aangeduid. De maatregel is dus aanleg plus onderhoud over 50 jaar.

#### **2.4.5. Zettingen en klink**

Voor het totaal benodigde volume zand in de zandige oplossing is de bijdrage van zettingen en klink mogelijk relevant. De hoeveelheden die volgen uit de ontworpen dimensies van het duin moeten dan gecompenseerd worden met de verwachte:

- algemene bodemdaling;
- zettingen en klink huidige bodem;
- zettingen en klink als gevolg van nieuw aangebracht duin.

In [ref. 1.] zijn uitgangspunten opgesteld voor zettingen en klink voor sectie 9.

##### **Algemene bodemdaling**

Voor algemene bodemdaling wordt in het middenscenario 5 cm bij een planperiode van 50 jaar [ref. 1.] en [ref. 15.] aangehouden. Deze daling wordt verwaarloosbaar geacht in de uitwerking van de zandige oplossing.

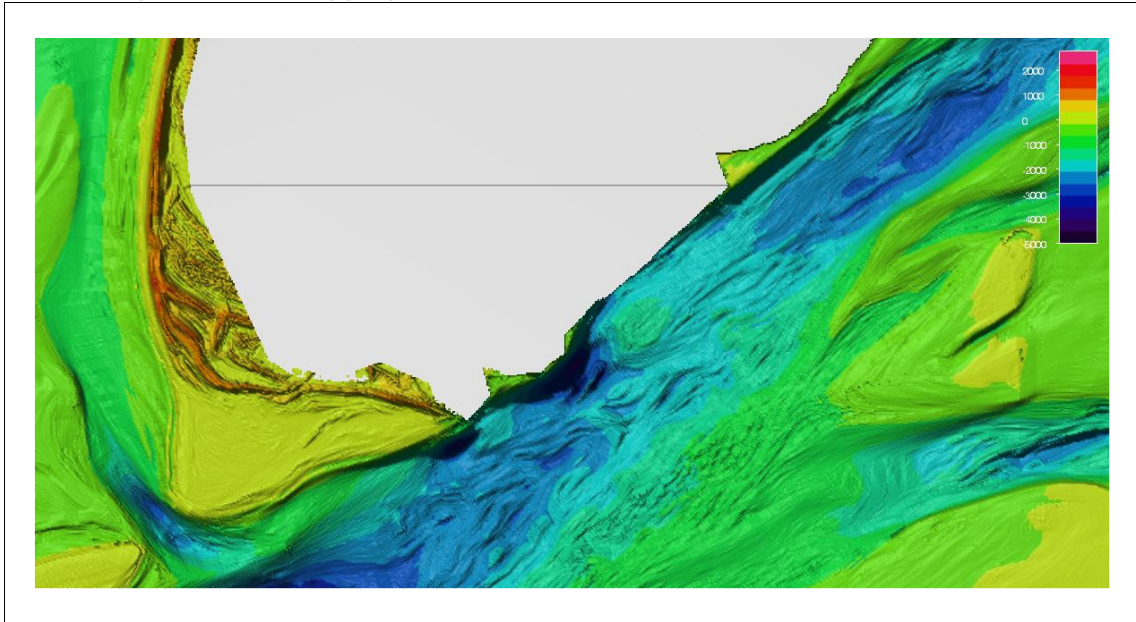
##### **Zettingen en klink**

In de uitwerking wordt een orde grote inschatting van de zettingen van de ondergrond en aanvulling als gevolg van de aanvulling gegeven op basis van sonderingen en geologische langsprofielen op de zeedijk.

#### **2.5. Bodemligging**

De bodemligging van de Waddenzee rondom zuid Texel is gegeven in afbeelding 2.3 [ref. 4.]. Dit geeft enkel bodeminformatie van de Waddenzee tot een bepaalde afstand tot de dijk. Daarnaast is er circa iedere 100 m een dwarsprofiel beschikbaar van de huidige dijkprofielen boven NAP. De bodemdata is aangevuld met lodingen uit 2009/2010 [ref. 16.].

**Afbeelding 2.3. Bodemligging Waddenzee zuid Texel [ref. 4.]**



## **2.6. Hydraulische uitgangspunten**

### **2.6.1. Veiligheidsniveau**

De primaire waterkering moet een belastingniveau met een overschrijdingsfrequentie van eens in de 4.000 jaar veilig kunnen keren. In de probabilistische benadering dient de bezwijkkans een factor 10 lager te liggen. In deze paragraaf worden de maatgevende condities gegeven.

### **2.6.2. Waterstanden**

Er wordt uitgegaan van richtingsafhankelijke waterstanden die zijn gebaseerd op [ref. 8.] en worden vermeldt in [ref. 7.]. In [ref. 7.] zijn de waterstanden gegeven inclusief een toeslag voor bodemdaling, zeespiegelstijging en golfopzet.

Voor de extreme waterstanden die worden gehanteerd in het zandafslagmodel (het zogenaamde rekenpeil) dienen aan de richtingsafhankelijke waterstanden (zonder toeslagen) de navolgende toeslagen te worden toegevoegd op basis van 50 jaar levensduur (conform [ref. 1.] en [ref. 9.]).

#### **Toeslag zeespiegelrijzing**

In de Leidraad Zandige Kust (LZK) zijn klimaatscenario's gedefinieerd. Voorgesteld wordt om het LKZ middenscenario te hanteren. De toeslag voor zeespiegelrijzing bedraagt 0,3 m.

#### **Toeslag stormopzet**

De stormopzet voor LKZ middenscenario bedraagt 0 m.

#### **Toeslag buistoten en -oscillaties**

Voor Texel hoeft geen rekening te worden gehouden met buistoten en -oscillaties. De toeslag hiervoor is 0 cm.

### Toeslag groter getijslag

Door klimaatveranderingen ontstaat een grotere getij-amplitude. De LZK schrijft voor het middenscenario een toeslag van 5 cm in 100 jaar voor. Voor 50 jaar geldt derhalve een toeslag van 2,5 cm.

### Toeslag robuustheid

Conform de Leidraad voor Zee- en Meerdijken en het Ontwerpkader Zwakke Schakels wordt een robuustheidstoeslag gehanteerd van 0 cm.

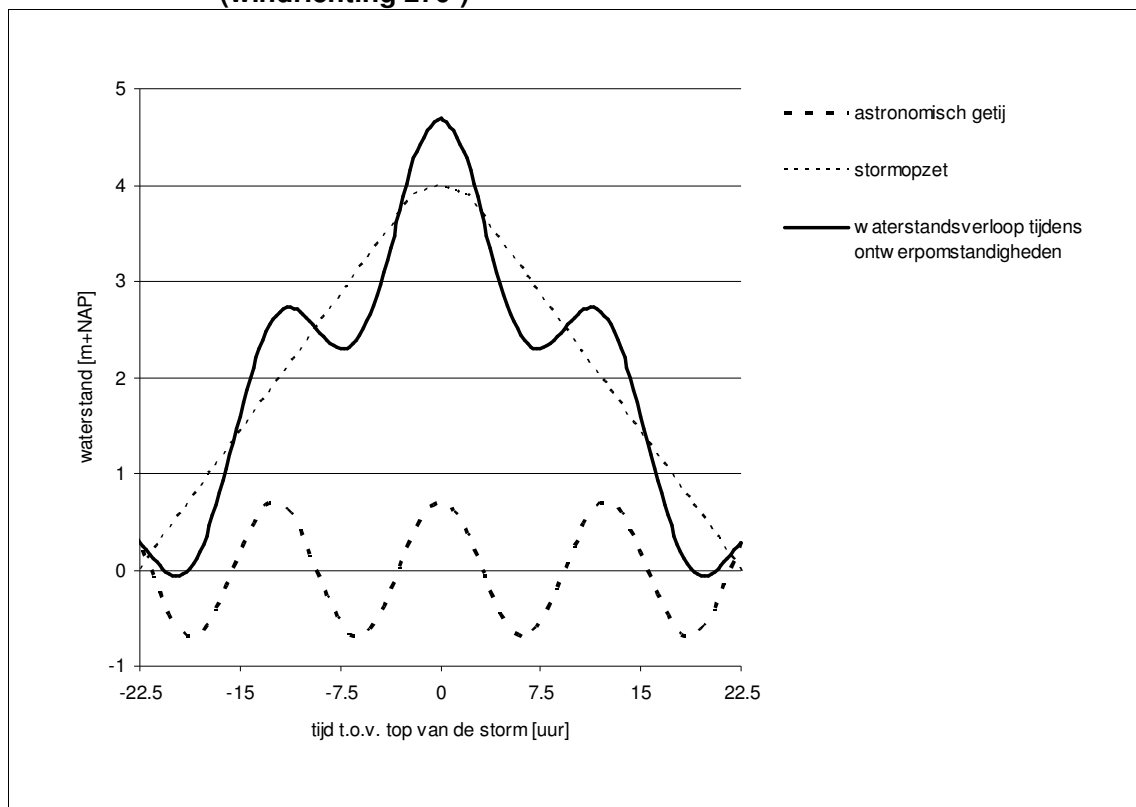
### Decimeringshoogte

Het rekenpeil voor het afslagmodel wordt bepaald door het ontwerppeil te vermeerderen met 2/3 decimeringshoogte (conform [ref. 9.]). Uit [ref. 8.] volgt een decimeringshoogte van 0,5 m voor meetstation Den Oever. Het ontwerppeil wordt vermeerderd met 0.33 m.

### Waterstandverloop

Het waterstandverloop tijdens de ontwerpomstandigheden is een samenstelling van de stormopzet en het astronomische getij (afbeelding 2.4). De gemiddelde getij-amplitude (GGA) van 0,7 m en golfperiode 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 Basisrapport aangehouden. De top van de stormopzet is de ontwerpwaterstand minus de GGA. De stormduur  $t_s$  is gelijk aan 45 uur. Afhankelijk van het zandafslagmodel zal een constant waterniveau (Duros+) of een waterstandverloop (Unibest DE) worden gehanteerd.

**Afbeelding 2.4. Waterstandverloop tijdens ontwerpomstandigheden (windrichting 270°)**





### 2.6.3. Golfcondities extreme condities

Voor het duinafslagmodel die wordt gebruikt voor het ontwerp van de zandige oplossing zijn randvoorwaarden op diep water nodig die aansluiten op de HR2011. De golfrandvoorwaarden zijn door Arcadis met een SWAN-model bepaald op een wijze die consistent is met de methode die ook voor de HR2011 wordt toegepast ([ref 7.], tevens opgenomen in bijlage II). In [ref. 7.] zijn waterstanden gehanteerd met een toeslag voor bodemdaling, zeespiegelrijzing en golfopzet. De berekeningen zijn door Arcadis uitgevoerd voor het ontwerppeil en niet voor het rekenpeil. Wel heeft Arcadis gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd. Uit de gevoeligheidsberekeningen blijkt dat kleine verhogingen van de waterstand een marginaal kleine verhoging van de golfhoogte geven en alleen bij oostelijke windrichtingen op te treden. De oostelijke windrichtingen blijken niet maatgevend voor duinafslag. Derhalve worden de door Arcadis gegenereerde golfrandvoorwaarden als bruikbaar geacht.

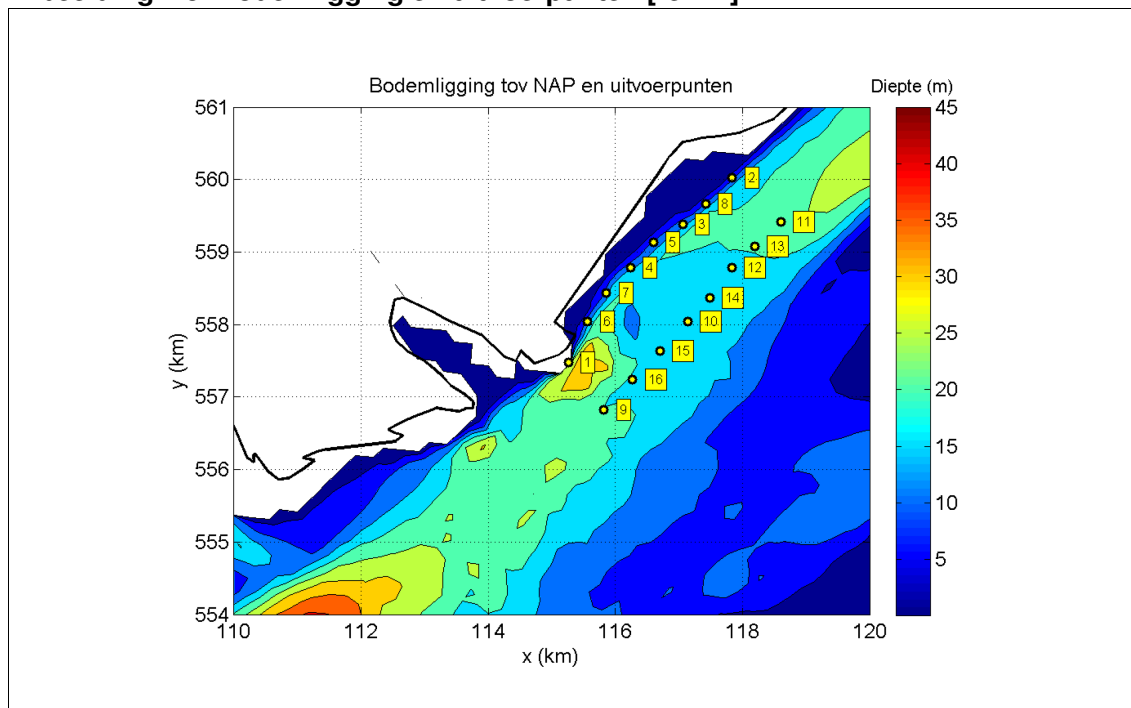
In tegenstelling tot de HR2011 is een richtingsafhankelijke waterstand genomen. Dit om een te conservatieve (of ongunstige) combinatie van golfhoogte en waterstand voor het duinafslagmodel te voorkomen. Het gebruik van deze methode wordt momenteel voorgesteld aan het ENW (Expertise Netwerk Waterveiligheid).

In afbeelding 2.5 is de bodemligging met de uitvoerpunten gegeven. Per gekozen dijkraai zijn er twee uitvoerpunten beschikbaar. Eén uitvoerpunt in het centrum van de geul ('zo diep mogelijk') en één uitvoerpunt op de 15-meter dieptelijn op de rand van de geul. Voor het huidige DUROS model moet diep water golfrandvoorwaarden gebruikt worden en in het Unibest DE kunnen beide rijen gebruikt worden [ref. 7.].

Uit de SWAN-berekeningen volgt dat de twee golfcondities in een raai redelijk van elkaar verschillen. Dit is onder andere te verklaren doordat de uitvoerpunten niet op dezelfde golfstraal liggen. De golfcondities op de 15-meter dieptelijn sluiten beter aan op de gekozen dijkraai. Daartegenover staat dat het uitvoerpunt niet beïnvloed moet worden door morfologische ontwikkelingen in het afslagmodel. Derhalve is gekozen om de uitvoerpunten in het centrum van de geul te hanteren.

In [ref. 7.] is het golfveld als een richtingsgespreid golfveld beschouwd waarbij alleen die componenten bijdragen aan de uiteindelijke golfbelasting die werkelijk naar de kust zijn gericht. In [ref. 7.] wordt opgemerkt dat deze methode nog niet algemeen wordt geaccepteerd en daarom met enige terughoudendheid moet worden toegepast. Vooral nog wordt in het uitwerken van de zandige oplossing wel van deze methode uitgegaan.

**Afbeelding 2.5. Bodemligging en uitvoerpunten [ref. 7.]**



In de eerste uitwerking van de zandige oplossing worden vier dwarsdoorsneden beschouwd. De te hanteren uitvoerpunten zijn rood omcirkeld. De waterstanden (rekenpeilen) en (diep water) golfcondities die gelden voor deze locaties zijn gegeven in tabel 4.1 voor verschillende richtingen. De overige resultaten van de SWAN-berekeningen [ref. 7.] zijn bijgevoegd in bijlage II.

**Tabel 2.1. Hydraulische randvoorwaarden [ref. 7.] voor vier uitvoerpunten**

uitvoerpunt		16		10		12		11	
	h	Hs	Tm-1,0	Hs	Tm-1,0	Hs	Tm-1,0	Hs	Tm-1,0
wind-richting	m + NAP	m	s	m	s	m	s	m	s
30	2,42	1,57	4,7	1,59	4,7	1,67	4,7	1,69	4,8
60	2,42	2,06	4,8	2,07	4,8	2,14	4,8	2,14	4,8
90	2,42	2,28	4,7	2,29	4,7	2,37	4,7	2,38	4,8
120	2,42	2,07	4,3	2,06	4,3	2,1	4,3	2,11	4,4
150	2,42	2,08	4,2	2,1	4,2	2,12	4,2	2,14	4,3
180	2,42	2,22	4,4	2,33	4,5	2,4	4,5	2,42	4,6
210	2,64	2,35	4,8	2,53	5	2,67	5	2,67	5,1
240	3,89	2,26	5,3	2,44	5,5	2,61	5,5	2,59	5,5
270	4,7	1,8	5,7	2,02	5,9	2,16	5,9	2,15	5,8
300	4,87	0,79	6,1	1,01	6,1	1,13	6,1	1,13	5,9
330	4,97	0,5	5,9	0,57	6	0,71	6	0,75	6
360	3,99	1,26	5	1,3	5,1	1,46	5,1	1,49	5,4

## 2.7. Omgeving

Met betrekking tot de omgeving worden de uitgangspunten gehanteerd die in het verslag van de workshop 'ecologische meerwaarde' [ref. 2.] worden genoemd.

## 2.8. Uitgangspunten kunstwerken en aansluiting

### Kunstwerken

In dijksectie 9 bevinden zich één kunstwerk en één leiding: gemaal Prins Hendrikpolder (115k1) en een waterleiding (115k).

In de uitwerking van de zandige oplossing worden het gemaal en de waterleiding ingepast. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten van toepassing:

- indicatie van nieuwe uitstroomlocatie van het gemaal op locatie zoals aangegeven in [ref. 2.] (zie bijlage I);
- het huidige gemaal zal na aanleg van de zandige oplossing (mogelijk) op een aantal toetspunten niet voldoen. Tevens zal de pompcapaciteit door de leidingverlenging naar verwachting onvoldoende zijn. In de uitwerking van de zandige oplossing wordt uitgegaan van een gemaal met voldoende capaciteit op dezelfde locatie als het huidige gemaal.

De waterleiding zal waar mogelijk het bestaande tracé behouden;

### Aansluiting

Aan de zuidzijde sluit de dijk van dijksectie 9 aan op de inlaagdijk 't Horntje en aan de noordzijde op de Westdijk.

In de uitwerking van de zandige oplossing wordt een globale uitwerking gegeven van de aansluiting van de duinige kering op de dijksecties 8 en 10. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten van toepassing:

- indicatie van locatie van de aansluitingen zoals aangegeven in [ref. 2.];
- in [ref. 2.] wordt aangegeven dat het schorretje tussen de NIOZ haven en dijk zal verdwijnen onder het zand, maar verwacht wordt dat op den duur een dergelijk schorretje zich weer kan ontwikkelen. Uitgangspunt is dat ontwikkeling van een schor hier geen doel is en dat dit gedeelte deel kan uitmaken van de primaire waterkering. Hetgeen betekent dat het schorretje mogelijk duinig wordt.



### 3. TOEPASSING ZANDFRACTIES

In deze paragraaf worden de mogelijk toe te passen zandfracties beschouwd. Daartoe worden de volgende onderdelen behandeld:

- gebiedseigenheid en ecologische geschiktheid van verschillende zandfracties;
- effectiviteit of erosiegevoeligheid van de verschillende fracties;
- beschikbaarheid van de verschillende fracties, hiervoor wordt de vaarafstand naar de winlocatie per fractie beschouwd. De vaarafstand is een belangrijke maat voor de kuubprijs van het suppletiemateriaal.

Op basis van bovenstaande onderdelen zal een voorstel worden gegeven voor het, in de zandige oplossing, te hanteren suppletiemateriaal.

#### 3.1. Gebiedseigen materiaal en ecologische geschiktheid

Voor ecologie (natuur) is vooral de bovenste laag van de (duin)suppletie van belang. Enkele parameters die van belang zijn ten aanzien van de ecologie zijn de korreldiameter, het slibgehalte en de kalkrijkdom. De belangrijkste parameter is over het algemeen de korreldiameter van het suppletiemateriaal. In deze paragraaf wordt bekeken wat het gebiedseigen materiaal is en wat voor materiaal ecologisch gewenst is in het nieuwe duin.

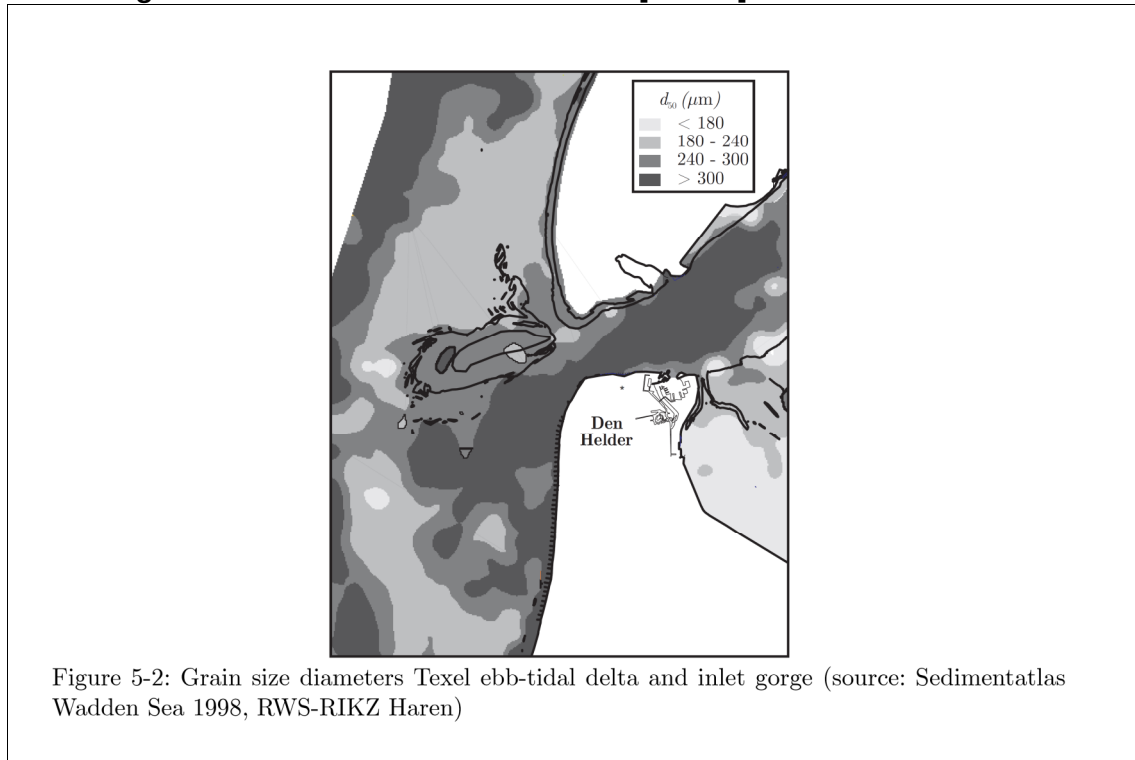
##### **Gebiedseigen materiaal**

Uit afbeelding 3.1 ([ref 10.]) blijkt dat de grootste korreldiameters in de geulen van de Waddenzee voorkomen. Zo is de gemiddelde korreldiameter in het Marsdiep groter dan 450  $\mu\text{m}$ . In het algemeen [ref. 10.] worden in de geulen van de Waddenzee korreldiameters groter dan 200  $\mu\text{m}$  gevonden en op de platen kleiner dan 200  $\mu\text{m}$ .

Op de beoogde locatie van de zandige oplossing neemt de korreldiameter in de richting van de huidige waddenzeedijk van de Prins Hendrikpolder af. Daarnaast neemt de korreldiameter langs de dijk in noordelijke richting af. Op de locatie van het nieuwe duin bedraagt de korreldiameter aan de zuidzijde (nabij de NIOZ-haven) circa 250  $\mu\text{m}$  en deze neemt af tot circa 150  $\mu\text{m}$  aan de noordoostzijde.

In [ref. 9.] zijn voor de duinen aan de Noordzee-zijde van Texel rekenwaardes voor korreldiameters beschikbaar. Deze variëren tussen de 184  $\mu\text{m}$  en 204  $\mu\text{m}$  (Dit kan als 'gebiedseigen' worden gezien voor de duinen van Texel). In dit duin is het met name van belang dat de toplaag goed moet kunnen verstuiven.

### Afbeelding 3.1. Sedimentkorreldiameters Texel [ref. 10.]



#### Invloed korreldiameter ecologie in zandige oplossing

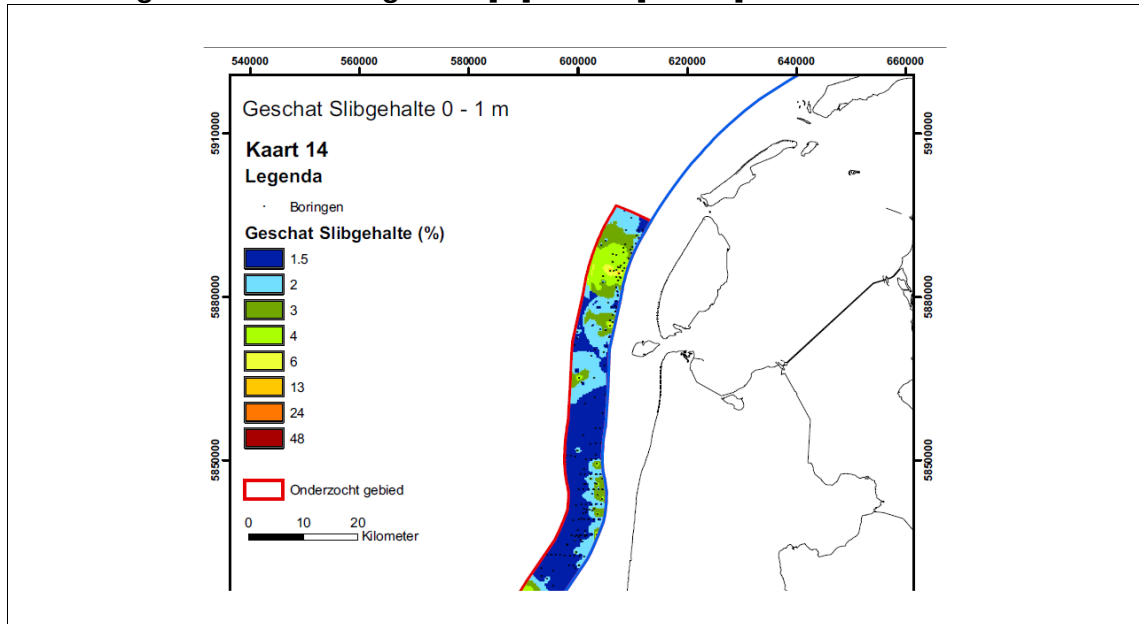
In een conventioneel duin is het met name van belang dat de toplaag goed moet kunnen verstuiven. Daarvoor moet de korrelgrootte niet te groot zijn. In de zandige oplossing is er echter geen sprake van een conventioneel duin. Het gaat om een relatief smalle strook duin waarbij verstuiving aan beide zijden van het duin ongewenst is. Aan de waddenzeezijde verdwijnt verstoven zand richting het wad en in de geul. De oriëntatie van het nieuwe duin ten opzichte van de overheersende windrichting is anders dan geldt voor het grootste gedeelte van de duinen in Nederland: De overheersende windrichting is hier zeewaarts en transport van het wad richting het duin zal daarom beperkt zijn. Juist bij een overheersende landwaartse windrichting kan zand vanaf het strand en de zeereep richting duin worden getransporteerd. Door de overheersende zeewaartse windrichting leidt verstuiving tot verlies van zand en verstuiving is daarom zeer ongewenst. Aan de Texelzijde waait het zand direct de polder in: er is beperkt sprake van een bufferzone.

Gezien bovenstaande kan gesteld worden dat verstuiving zeer ongewenst is en daarom weinig potentie heeft in het nieuwe duin. De korreldiameter heeft naast het bovengenoemde effect op de verstuiving weinig invloed op de ecologische waarde in een duin.

#### Slibgehalte

Een andere parameter (naast de korreldiameter) die belangrijk is voor de ecologische geschiktheid is het slibgehalte. Het slibgehalte is afhankelijk van de winlocatie en de winmethode. Een slibgehalte van 1 % of kleiner is wenselijk. Bij het winnen van grover materiaal kan een sleephopperzuiger harder pompen. Hierdoor is het slibgehalte relatief lager omdat er een gedeelte van het slib niet in het beun bezinkt. In tabel 3.2 is voor de verschillende winlocaties het slibgehalte weergegeven. De slibgehaltenes voor de verschillende winlocaties zijn bepaald op basis van afbeelding 3.2. Het slibpercentage is voor de grootste korreldiameterklasse circa 1 - 3 %. Vermoedelijk kan door de juiste winmethode te hanteren het gewenste slibpercentage behaald worden.

**Afbeelding 3.2. Geschat slibgehalte [%] 0 - 1 m [ref. 14.]**



### 3.2. Effectiviteit - gevoeligheid korreldiameter op zandvraag

In deze paragraaf wordt globaal bepaald wat het effect van de korreldiameter op het benodigde zandvolume is. Het benodigde volume zand in de zandige oplossing bestaat uit een basisvolume en een slijtlaag. De korreldiameter heeft invloed op beide onderdelen. In deze paragraaf wordt in eerste instantie alleen het effect op het basisvolume bepaald.

Het basisvolume is bepaald met het duinafslagmodel Unibest DE. Een nadere toelichting en uitwerking van de verschillende parameters en gehanteerde uitgangspunten is gegeven in hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk is voor één profiel voor verschillende korreldiameters het afslagprofiel en geërodeerd volume boven het rekenpeil bepaald. Het initiële profiel is gelijk gesteld voor de verschillende korreldiameters. Het ontwerp van het initiële profiel is afhankelijk van de korreldiameter. De resultaten geven daarom een indicatie van de erosiegevoeligheid. Optimalisatie van het profiel voor een betreffende korreldiameter kan leiden tot andere erosie.

In tabel 3.1 is het geërodeerde volume zand uit het dwarsprofiel boven het rekenpeil per strekkende meter gegeven. Deze parameter geeft een indicatie van de relatieve erosiegevoeligheid (en daarmee de effectiviteit) van een korreldiameterklasse.

**Tabel 3.1. Erosievolume boven rekenpeil voor verschillende korreldiameters**

korreldiameter [ $\mu\text{m}$ ]	geërodeerd volume boven rekenpeil [ $\text{m}^3$ ]
150 - 200	52
200 - 250	39
250 - 300	31
300 - 350	26
350 - 400	22

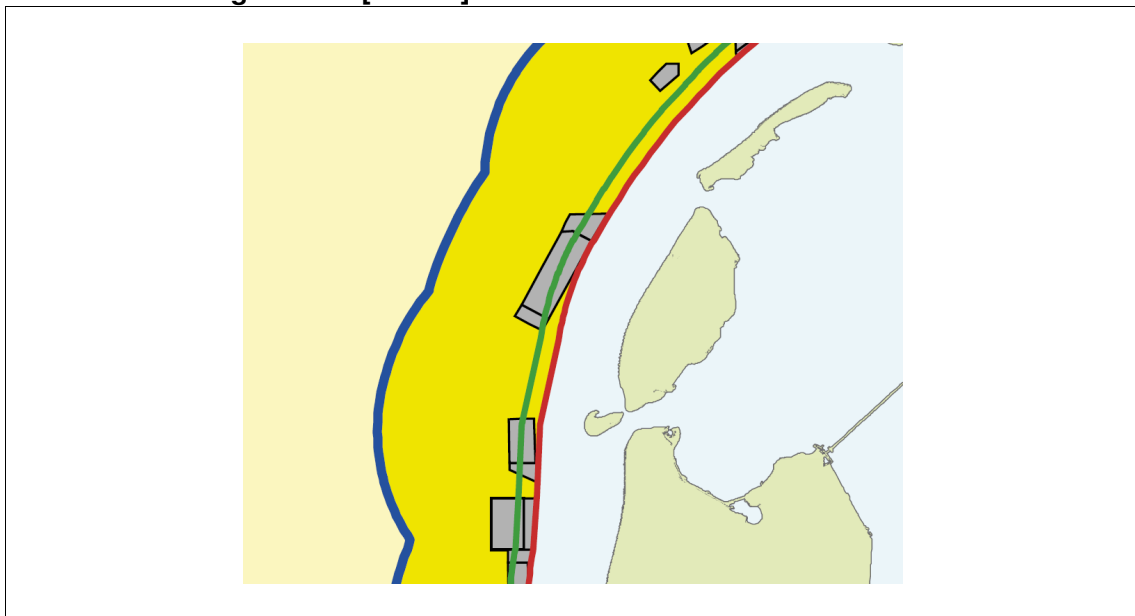
In het algemeen geldt dat bij een grotere korreldiameter een steiler aanlegprofiel kan worden aangelegd of dat bij een gelijk aanlegprofiel de grotere korreldiameter minder erosie tot gevolg heeft. In beide gevallen is bij een grotere korreldiameter een kleiner volume zand benodigd. Een grotere korreldiameter wordt daarom als effectiever beoordeeld. Uit de berekeningen blijkt dat de kleinere klassen tot significant meer erosie leiden. De voorkeur vanuit effectiviteit gaat daarom naar materiaal met een korreldiameter groter dan 250  $\mu\text{m}$ . Er is dan sprake van een substantiële winst ten opzichte van de kleinere klassen.

### 3.3. Beschikbaarheid

De uiteindelijke suppletiekosten hangen in grote mate af van het volume zand in combinatie met de vaarafstand tot de winlocatie. Daartoe wordt beschouwd waar de verschillende fracties beschikbaar zijn.

De zandwinning op de Noordzee vindt plaats tussen de doorgaande NAP - 20 m lijn en de 12-mijlsgrens [ref. 12.]. In afbeelding 3.3 is het mogelijke gebied voor zandwinning aangegeven [ref. 12.]. De vergunbaarheid van de verschillende zandwingebieden wordt niet beschouwd in deze notitie.

**Afbeelding 3.3. Mogelijk gebied voor zandwinning, in grijs reeds vergunde gebieden [ref. 12.]**



De zandwinning in de Waddenzee is beperkt tot regulier onderhoud van vaargeulen en enkele incidentele uitzonderingen [ref. 13.]. Uitgangspunt is daarom dat zandwinning uit de geulen van de Waddenzee niet van toepassing is.

In afbeelding 3.4 [ref. 14.] wordt de korreldiameter van het bodemmateriaal in de Noordzee weergegeven. Met rode cirkels zijn voor verschillende korreldiameters potentiële wingebieden gegeven. Het wingebied voor de korrelgroottes 150 - 200  $\mu\text{m}$  ligt op relatief grote afstand en valt buiten de afbeelding. In tabel 3.2 is de vaarafstand tot de verschillende wingebieden gegeven.



Uit de tabel blijkt dat de vaarafstanden tot wingebieden met een kleine korreldiameter significant groter zijn. Voor materiaal met een korreldiameter tussen 250 en 400  $\mu\text{m}$  is de vaarafstand vergelijkbaar.

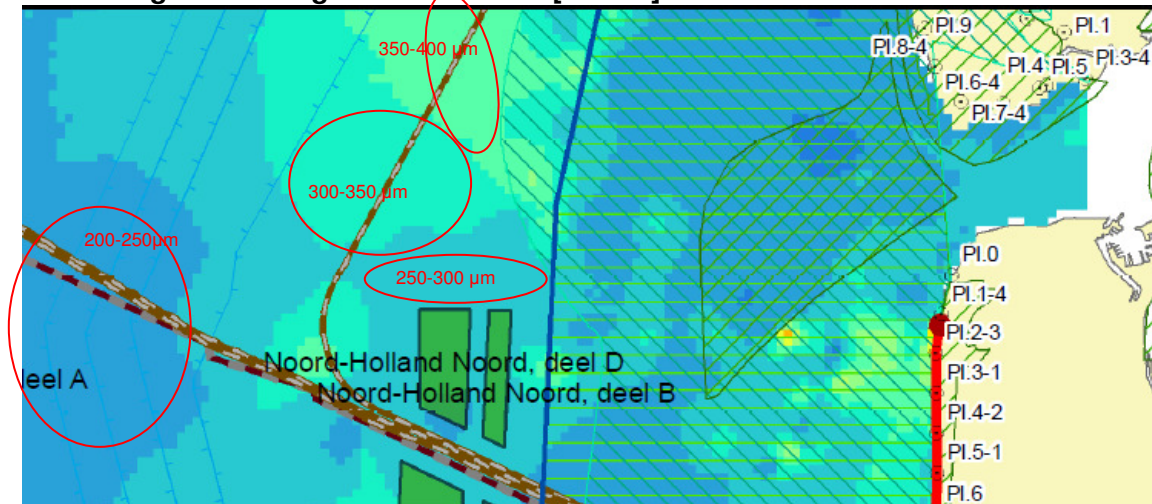
**Tabel 3.2. Vaarafstand tot potentiële wingebieden**

korreldiameter [ $\mu\text{m}$ ]	afstand wingebied tot suppletielocatie [km]	slibgehalte in geselecteerd wingebied
150 - 200	64	4 - 6 %
200 - 250	32	1 - 2 %
250 - 300	22	1 - 2 %
300 - 350	22	1 - 2 %
350 - 400	23	2 - 3 %

Naast de afstand tot het wingebied is tevens de perstijd van belang. Voor strandsuppleties ligt de bovengrens op 350 - 400  $\mu\text{m}$  in verband met de grote toename van de perstijd bij het lossen.

Ten aanzien van de kosten zou de voorkeur gegeven worden aan suppletiezand met een korrelgrootte tussen de 250 - 350  $\mu\text{m}$ .

**Afbeelding 3.4. Korrelgrootte Noordzee [ref. 13.]**



### 3.4. Samenvatting en conclusies

In dit hoofdstuk zijn de effectiviteit, beschikbaarheid en de gebiedseigenheid van verschillende zandfracties beschouwt. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 3.3 door de verschillende aspecten te beoordelen met +/-.

**Tabel 3.3. Samenvatting zandfracties**

korrel diameter [µm]	effectiviteit [%]	ecologische geschiktheid	beschikbaarheid
150 - 200	--	+/-	--
200 - 250	-	+	-
250 - 300	+	+	+
300 - 350	++	+	+
350 - 400	++	+/-	+/-

Voor de effectiviteit geldt dat een grotere korrel diameter tot minder erosie leidt of dat er minder zand benodigd is in het initiële profiel. Het benodigde zandvolume is daarom kleiner en daarom wordt een grovere diameter als effectiever beoordeeld. Ten aanzien van de ef-

fectiviteit (paragraaf 3.2) valt een lichte trendbreuk te zien bij 250  $\mu\text{m}$ . Materiaal kleiner dan 250  $\mu\text{m}$  krijgt daarom een negatieve score en groter dan 250  $\mu\text{m}$  een positieve score. Hierbij geldt dat hoe groter de korreldiameter, hoe effectiever.

Voor de ecologische geschiktheid is als uitgangspunt gehanteerd dat verstuiving geen potentie heeft binnen de zandige oplossing. Derhalve scoren de verschillende korreldiameters in eerste instantie gelijkwaardig ten aanzien van de ecologie. Er zijn echter nog twee parameters die een rol spelen:

- gebiedseigenheid materiaal: op de beoogde locatie van het toekomstig duin komt in de huidige situatie materiaal voor met een korreldiameter tussen de 150 en de 250  $\mu\text{m}$ . Door te kijken naar gebiedseigenheid van het materiaal krijgen deze klassen een positieve beoordeling. Gezien de beperkte meerwaarde ten aanzien van de ecologie in het duin weegt dit niet zwaar mee;
- slibgehalte: een slibgehalte rond de 1 % is gewenst. Tabel 3.2 laat zien dat het slibpercentage in de bovenste meter voor de middelste drie korreldiameterklassen rond de 1 - 2 % ligt en voor de buitenste twee klassen hoger ligt. Opgemerkt wordt dat 1. ook voor de buitenste twee klassen een lager slibpercentage haalbaar is, maar dit leidt tot een grotere vaarafstand (hoeveel, nog niet bepaald) en 2. de methode van winnen kan leiden tot een voldoende laag slibgehalte.

Voor de beschikbaarheid is de vaarafstand tot de winlocatie bepaald. Hierbij is alleen gekeken naar de korreldiameter binnen het wingebied. Het slibgehalte wat (toevallig) in dit gebied voorkomt is meegenomen in de beoordeling van de ecologische geschiktheid.

De vaarafstand tot wingebieden met kleinere korreldiameters (150 - 250) blijkt relatief groot te zijn. Deze krijgen daarom een lage score. Voor de overige korreldiameters is de vaarafstand vergelijkbaar. Deze krijgen daarom een positieve score. De gradering 350 - 400  $\mu\text{m}$  heeft een relatief grotere perstijd en krijgt daarom een gemiddelde score.

Op basis van bovenstaande wordt voorgesteld om suppletiemateriaal met een korreldiameter van 250 - 350  $\mu\text{m}$  toe te passen met een lichte voorkeur voor 300 -350  $\mu\text{m}$ . In de berekeningen wordt een korreldiameter van 300  $\mu\text{m}$  gehanteerd.



## 4. DUIN - BASISVOLUME

Er is een analyse uitgevoerd van het te verwachten gedrag van het aangebrachte zandvolume en de doorvertaling daarvan naar onderhoudsinspanning in het ontwerp. Er wordt onderscheid gemaakt tussen basisvolume (hoofdstuk 4) en de slijtlaag (hoofdstuk 5). Op basis van het benodigde volume voor de basis en de slijtlaag wordt een ontwerp opgesteld voor twee doorsneden van de zandige kering (hoofdstuk 6).

In paragraaf 4.1 wordt een toelichting gegeven op het basisvolume. In paragraaf 4.2 wordt de inpassing van de dijk in het basisprofiel beschouwd. Vervolgens wordt in paragraaf 4.3 - 4.6 het benodigde basisvolume vastgesteld. In paragraaf 4.7 worden de zettingen van het duin beschouwd en in paragraaf 4.8 wordt ten slotte een overzicht gegeven.

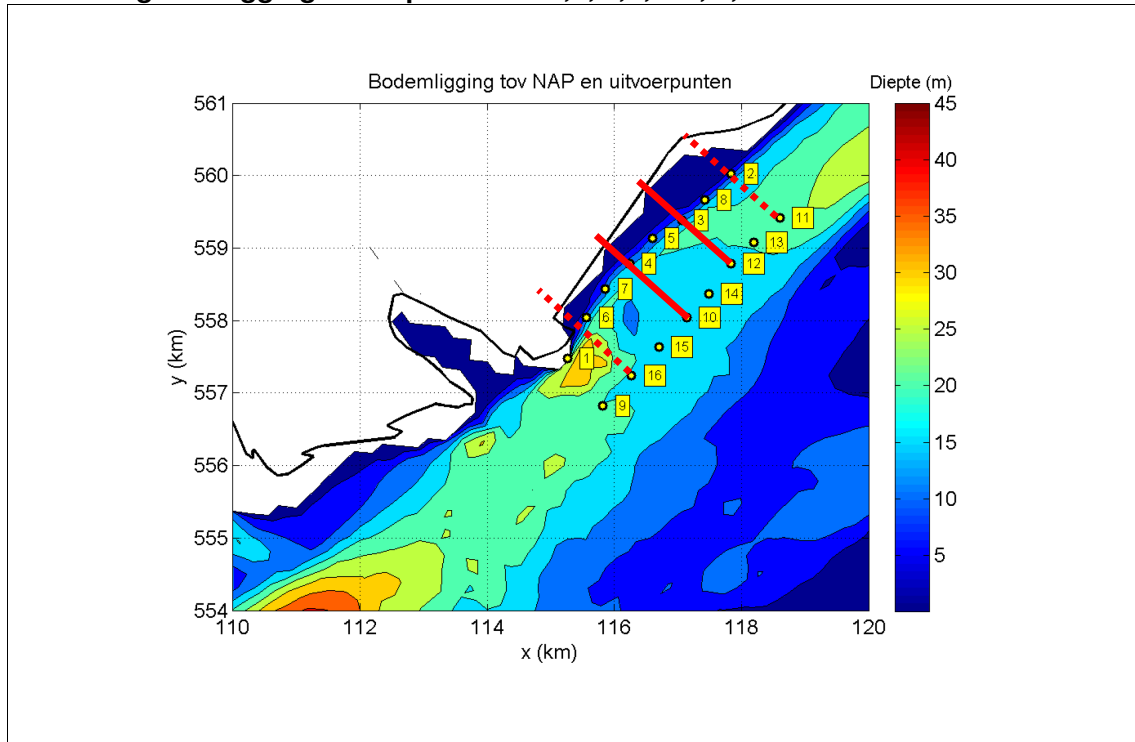
### 4.1. Basisvolume

Het basisvolume is het volume zand wat aanwezig dient te zijn bij aanvang van de ontwerpstorm. Het basisvolume wordt bepaald door de volgende componenten bij elkaar op te tellen:

- het volume zand wat benodigd is, zodat bij maatgevende afslag in dwarsrichting (loodrechte golfival) het grensprofiel nog aanwezig is;
- het volume zand wat benodigd is door een gradiënt in langstransport tijdens maatgevende stormcondities.

In eerste instantie wordt een inschatting van het gedrag van het duin geanalyseerd met behulp van het afslagmodel Unibest DE. Voor de maatgevende situatie zullen de resultaten uit het Unibest DE model worden vergeleken met het evenwichtsprofiel volgend uit het Duros+. Het basisvolume voor duinafslag dient formeel bepaald te worden met behulp van Duros+ [ref. 7.]. Het benodigde basisvolume in het duin wordt ingeschat voor twee profielen, te weten voor kilometerraai 4,5 en 5,5 (zie afbeelding 4.1).

**Afbeelding 4.1. Ligging dwarsprofiel km 3,5; 4,5; 5,5; 6,5**



## 4.2. Inpassingsvariant

Het uitgangspunt is dat de zandige oplossing een volwaardige primaire waterkering is die een integrale oplossing biedt voor de verwachte problemen met betrekking tot waterveiligheid gedurende de ontwerperperiode van 50 jaar. De zandige oplossing is daarmee een vervanger voor de huidige primaire waterkering.

Voor de inpassing van de huidige dijk in de zandige oplossing zijn verschillende varianten mogelijk, bijvoorbeeld:

1. dijk als (toevallig versterkt) grensprofiel (hier speelt de huidige dijk, en onder andere de sterkte van de bekleding, dus nog steeds een rol);
2. duin als beschermingsberm, het duin zorgt hier voor een reductie van de golfbelasting, zodanig dat de belasting op het binnentalud van de huidige dijk, in de vorm van golfoverslag, wordt gereduceerd zodat geen verhoging of versterking van de huidige zeedijk meer nodig is;
3. dijk maakt onderdeel uit van het grensprofiel, maar er wordt geen rekening gehouden met het reeds aanwezig waterkerend vermogen in de aanwezige bekleding en kleilagen van de dijk;
4. primaire waterkering zeewaarts van de huidige dijk met een dijk 'achter de hand': het duin en het grensprofiel bevinden zich dan zeewaarts van de huidige dijk.

De gekozen variant dient een oplossing te zijn voor de problemen die de dijk ondervindt. In deze paragraaf is beargumenteerd welke varianten een haalbare en veilige oplossing vormen.

In beginsel wordt als uitgangspunt gehanteerd dat geen rekening wordt gehouden met het reeds aanwezig waterkerend vermogen in de aanwezige bekleding en kleilagen van de

dijk. De eerste variant, dijk als versterkt profiel, wordt daarom in deze rapportage niet nader onderzocht.

De tweede variant valt af omdat dit geen oplossing is voor de faalmechanismen piping en micro-/macrostabiliteit. Het geeft immers alleen een reductie van de golfhoogte.

De derde en de vierde variant worden nader beschouwd.

#### **4.2.1. Primaire waterkering zeewaarts van de huidige dijk (variant 4)**

Het duin en het grensprofiel bevinden zich in deze variant zeewaarts van de huidige dijk. De dijk maakt in deze variant geen onderdeel uit van de primaire waterkering noch van het grensprofiel. Mocht de dijk dan om wat voor reden nog steeds instabiel zijn, dan geeft dit geen probleem omdat deze geen onderdeel uitmaakt van primaire waterkering. Het nieuwe duin is een zelfstandige waterkering waar de genoemde faalmechanismen voor de dijk geen rol meer spelen.

Het duin is doorlatend waardoor er water door het duin zal stromen hetgeen leidt tot waterbezwaar. Hoeveel water door het duin stroomt, hangt af van breedte en doorlatendheid van het duin.

Wanneer de huidige dijk in stand blijft, komt er tussen de dijk en het duin hierdoor water te staan. De berging van het waterbezwaar is dan tussen duin en dijk. De hoogte van het waterniveau hangt onder meer af van de breedte van de zone. De huidige dijk behoudt hier dan nog steeds een functie als regionale waterkering. Wanneer de waterstand weer daalt, zal het water weer uittreden richting het wad. Omdat het steile afslagprofiel zich boven het rekenpeil bevindt, zal uittreding plaatsvinden in een zeer flauw buitentalud en derhalve geen schade opleveren.

Een andere mogelijkheid is om stroming door de huidige dijk mogelijk te maken. Het waterbezwaar gaat dan onderdeel uitmaken van het waterbezwaar van de Prins Hendrikpolder.

#### **4.2.2. Dijk als onderdeel van grensprofiel (variant 3)**

In deze variant maakt de dijk onderdeel uit van het grensprofiel, maar er wordt geen rekening gehouden met het reeds aanwezig waterkerend vermogen in de aanwezige bekleding en kleilagen van de dijk.

Door gebruik te maken van het reeds aanwezige dijkprofiel wordt de hoeveelheid benodigd zand verminderd. Een regulier duin bestaat over het algemeen alleen uit zand. Voor een zandige oplossing leidt deze oplossing daarom tot een bijzondere situatie doordat er zich in het zandige profiel een ondoorlatend en hard gedeelte bevindt.

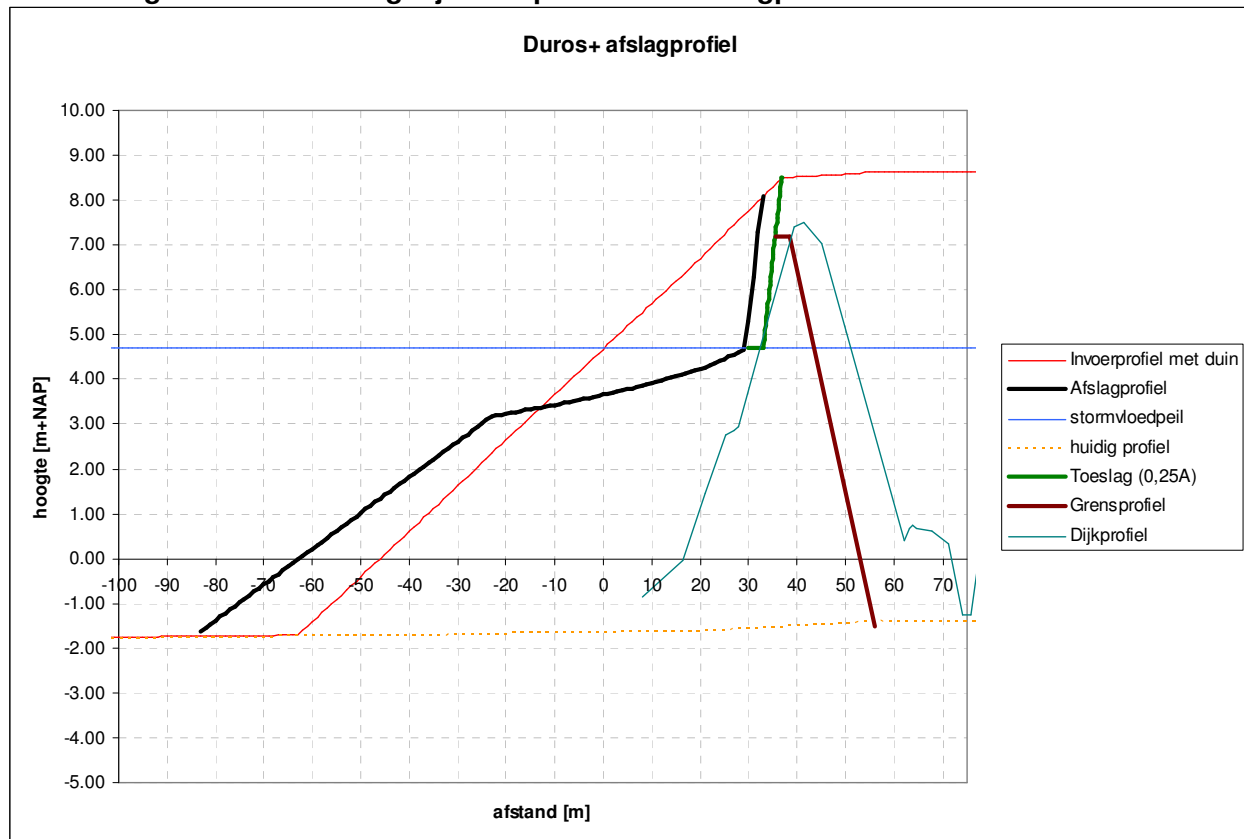
Een uitgangspunt is dat de huidige dijk dusdanig in het grensprofiel gepositioneerd wordt, dat het afslagprofiel niet tot de bekleding komt. Dit wordt gedaan om te voorkomen dat het harde dijkprofiel het afslagprofiel verstoort. Hiermee wordt het 'onthouden' van zandvolume voorkomen en kan zich daadwerkelijk een afslagprofiel ontwikkelen. De positionering van de dijk ten opzichte van het afslagprofiel is te zien in afbeelding 4.2.

Ondanks de aanwezigheid van het zandlichaam kan de huidige dijk bezwijken door de in paragraaf 2.4 genoemde bezwijkmechanismen. Omdat er voor gekozen is om het duin als zelfstandige primaire waterkering te ontwerpen is dit geen probleem. Het bezwijken ge-

deelte kan echter geen deel uitmaken van de primaire waterkering en mag zich daarom niet binnen het grensprofiel van de zandige oplossing bevinden.

Onderstaand worden de faalmechanismen van de bestaande dijk (in het kader van de zandige oplossing) beschouwd. Op deze manier wordt ingeschat welk gedeelte van de dijk in het grensprofiel van de zandige oplossing kan worden opgenomen.

**Afbeelding 4.2. Positionering dijk ten opzichte van afslagprofiel**



### Piping

In [ref. 20.] is de benodigde pipinglengte voor de huidige dijk bepaald op 123 m (deze waarde staat nog niet vast, mogelijk worden er andere waarden voor piping gehanteerd waardoor deze waarde nog kan veranderen). Uit de afslagberekeningen volgt een benodigd profiel. Met name bij maatgevende omstandigheden, in dit geval een zeer hoog buitenwater ligt het intredepunt dicht bij de huidige dijk (zie afbeelding 4.2). De breedte van het duin is dan niet groot genoeg om een pipinglengte groter dan 123 m te realiseren. De pipinglengte is daarom onvoldoende.

Bij piping wordt zand getransporteerd van onder de dijk vandaan naar het uittreepunt van het grondwater. Een kanaal vormt zich op het grensvlak van het zand en de cohesieve top-laag. Een doorgaande pijp zal echter waarschijnlijk niet optreden. Een pijp zal waarschijnlijk direct weer instorten/dichtslibben door het grote zandaanbod ter plaatse van het intrede punt. Het uitspoelen van zanddeeltjes nabij de teen wordt in deze gezien als een probleem dat onder het spoor microstabiliteit wordt beoordeeld.

Hoe het pipingproces zich onder de dijk in deze situatie ontwikkelt, is onbekend en derhalve wordt het conservatieve uitgangspunt gehanteerd dat onder de dijk wel een beginnende pipe kan ontstaan. Mogelijk ontwikkelt zich op het grensvlak onder de dijk een pijp en kan



de dijk bezwijken door piping. Een conservatief uitgangspunt is om er van uit te gaan dat de dijk daadwerkelijk bezwijkt en geen onderdeel uit kan maken van het duin.

Zodra een doorgaande pipe is opgetreden wordt normaal gesproken voor een dijk geen reststerkte aangenomen. Een kruinverlaging treedt op nadat dusdanig grote holle ruimten onder de dijk zijn ontstaan waardoor de dijk instort. De dijk zal niet bij kleine holle ruimten instorten. Een kruinverlaging kan daarom aanzienlijk zijn. Het volume wat na de verzakking eventueel overblijft, zou onderdeel kunnen vormen van het grensprofiel in de zandige oplossing

### **Micro-/macrostabiliteit**

Micro-/macrostabiliteit van het binnentalud van de huidige dijk is het faalmechanisme wat voor een groot gedeelte van de dijk van toepassing is. Het plaatsen van een zandvolume voor de dijk leidt tot een verlaging van de freatische lijn ter hoogte van de huidige dijk en zal de aandrijvende kracht voor macro/microstabiliteit afnemen. Omdat het suppletiemateriaal relatief grof is, is het duin zeer doorlatend (en daardoor het effect op de freatische lijn klein), hierdoor zal vermoedelijk het benodigde zandvolume zeer groot zijn. Een conservatief uitgangspunt is om uit te gaan van falen van het binnentalud ten aanzien van micro-/macrostabiliteit en het restprofiel wat overblijft na falen te gebruiken in het grensprofiel.

### **Sterkte en stabiliteit bekledingen**

Het uitgangspunt is dat de huidige dijk dusdanig in het grensprofiel gepositioneerd wordt, dat het afslagprofiel niet tot de bekleding komt. De faalmechanismen voor bekledingen zijn daarom niet aan de orde in deze variant.

### **Deel dijk in grensprofiel**

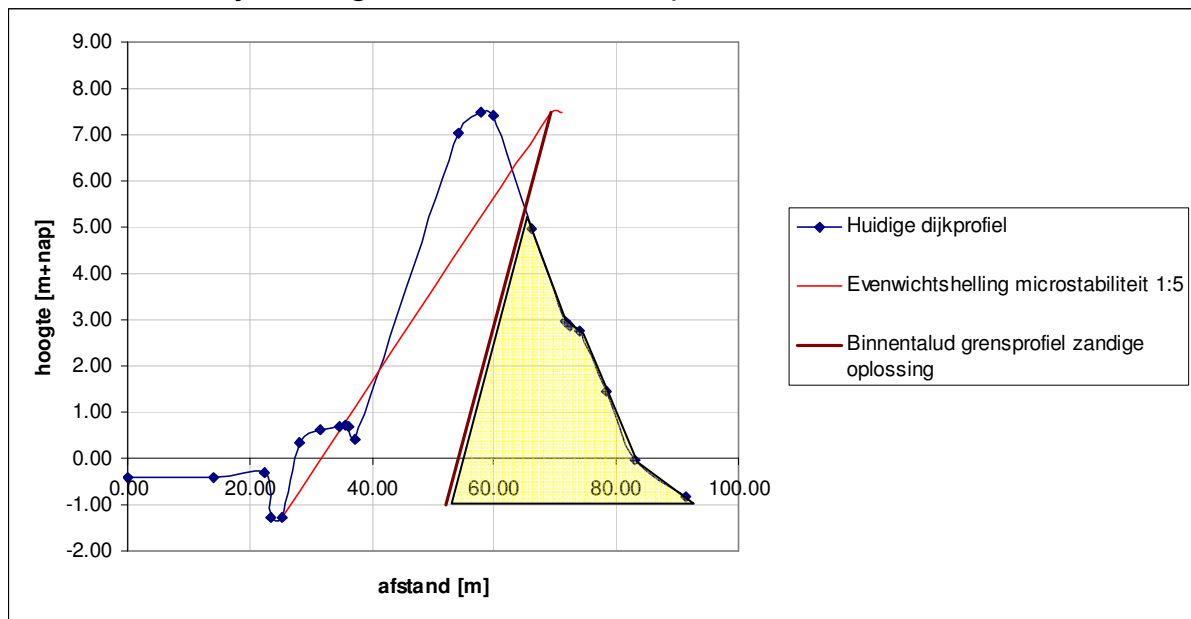
Het gedeelte van de dijk wat na optreding van de faalmechanismen (piping, micro-/macrostabiliteit) nog aanwezig is, kan deel uitmaken van het grensprofiel van de zandige kering. In deze subparagraaf wordt vastgesteld welk gedeelte na falen nog meegerekend kan worden in het grensprofiel van de zandige oplossing.

Het restprofiel ten gevolge van micro-/macro stabiliteit binnentalud kan als volgt worden vastgesteld:

- microstabiliteit: het weggevoerde materiaal wordt afgezet onder een evenwichtshelling van circa 1:5 [ref. zee- en meerdijken] (het boventalud kan een steiler profiel aannemen, hier wordt een helling van 1:5 voor het gehele binnentalud aangenomen, conservatief uitgangspunt);
- macrostabiliteit: de evenwichtshelling van het talud na secundaire afschuiving is in [ref. TR actuele sterkte van dijken] gegeven. Deze helling is voor zand 1:4, dit is steiler dan de evenwichtshelling voor microstabiliteit. Het verschil in taludhelling is klein, dit rechtvaardigt het conservatieve uitgangspunt bij microstabiliteit om voor de gehele helling 1:5 aan te houden.

In afbeelding 4.3 is de evenwichtshelling gegeven die zich kan vormen na optreden van micro-/macrostabiliteit. Uit de afbeelding wordt geconcludeerd dat een groot gedeelte van de huidige dijk kan afschuiven. Tevens is het binnentalud ingetekend van het grensprofiel van de zandige oplossing. Te zien valt dat slechts een beperkt gedeelte van de dijk op deze manier onderdeel uit kan maken van het grensprofiel. Het volume wat op deze manier binnen het grensprofiel valt, is circa 120 m<sup>3</sup>.

**Afbeelding 4.3. Restprofiel na falen (in geel gearceerd, het gedeelte van de dijk dat bij kan dragen aan het duinvolume)**



### Piping

Zoals eerder genoemd, kan het volume wat na de verzakking (ten gevolge van piping) eventueel overblijft, onderdeel vormen van het grensprofiel in de zandige oplossing. Bij een zandige kern kunnen zich grote holle ruimten ontwikkelen. Omdat voor een groot gedeelte van de dijk sprake is van een zandige kern, kan daadwerkelijk 'uitholling' van de dijk optreden. De 'inzakking' van de dijk ten gevolge van piping kan daarom zeer groot zijn. Dat de gehele dijk inzakt, is zeer onwaarschijnlijk. Het conservatieve uitgangspunt is (vooral nog) dat dit wel zal gebeuren. De huidige dijk zal dan niet of zeer beperkt bijdragen aan het volume van de zandige oplossing.

Een alternatief uitgangspunt is dat piping niet of gedeeltelijk op zal treden. In dat geval kan een groot gedeelte van het volume wat na optreden van het faalmechanisme micro/macrostabiliteit overblijft gehanteerd worden als volume in het grensprofiel.

### 4.2.3. Conclusie inpassingsvariant

Logischerwijs wordt er gebruik gemaakt van de huidige dijk in het grensprofiel omdat dit tot een kleiner benodigd zandvolume leidt. Uitgangspunten voor het ontwerp van het duin is dat de huidige dijk kan falen op piping en de micro/macrostabiliteit van het binnentalud en dat alleen het gedeelte van de dijk meetelt voor het duin wat stabiel is. Uit bovenstaande beschouwing blijkt dat het volume wat kan worden opgenomen in het grensprofiel van de zandige oplossing relatief klein is. In de uitwerking van de zandige oplossing wordt er derhalve vanuit gegaan dat het volume van de dijk niet bijdraagt aan het volume van het duin.

Opmerking: de nieuwe waterkering voldoet in deze voor waterveiligheid. De weg aan de binnenzijde van de dijk kan echter bezwijken en daarom zal eventueel een alternatieve evacuatie route gepland moeten worden.

### 4.3. Afslagprofiel

In deze paragraaf wordt het afslagprofiel bepaald voor de (hydraulische) uitgangspunten zoals gesteld in hoofdstuk 2 met zowel het Duros+ als het Unibest DE model voor twee raaien. Hiervoor worden eerst de belangrijkste parameters voor het model gegeven en vervolgens de resultaten uit de berekeningen gegeven en besproken.

#### 4.3.1. Vorm van het ontwerpprofiel

Een onderdeel van de input voor de berekeningen is de vorm van het ontwerpprofiel. De vorm van het ontwerpprofiel bestaat uit de hoogte van het aan te leggen duin en de taludhelling. De breedte van het ontwerpprofiel volgt vervolgens uit het benodigde volume zand ten aanzien van het afslagprofiel.

##### Hoogte aanlegprofiel

Zoals in hoofdstuk 3 aangegeven is er landwaarts van het kritieke afslagpunt nog een minimaal stabiel profiel vereist, het zogenaamde grensprofiel. Dit grensprofiel dient te voldoen aan bepaalde afmetingen. Het is hierbij mogelijk om een 'standaard' grensprofiel te hantieren of een 'alternatief' grensprofiel. De vanuit het grensprofiel vereiste dimensies geven een minimale waarde voor de hoogte van het duin.

Als uitgangspunt is gegeven dat het duin niet significant boven de huidige dijk uit mag steken. Dit geeft daarmee een maximale hoogte voor het duin. In tabel 4.1 zijn de minimale waarden voor de hoogte van het duin en de hoogte van de dijk gegeven voor kilometer-raai 4,5 en kilometerraai 5,5.

**Tabel 4.1. Hoogte grensprofiel en dijk**

kilometerraai	hoogte dijk [m + NAP]	minimale hoogte 'standaard' grensprofiel [m + NAP]	minimale hoogte 'alternatief' grensprofiel [m + NAP]
4,5	7,5	7,2	6,6
5,5	7,4	7,2	6,6

Als uitgangspunt wordt een hoogte van het duin op NAP + 8,0 m gehanteerd. Een hoger profiel zal uitsteken boven de dijk. Een lager, maar breder, profiel is mogelijk wenselijk ten aanzien van waterbezwaarlijkheid en winderosie, en zal derhalve tevens worden onderzocht.

##### Helling aanlegprofiel

Het uitgangspunt is om een profiel aan te leggen die stabiel is voor verschillende omstandigheden. Op deze wijze zal niet al tijdens dagelijkse omstandigheden afvlakking van het profiel plaatsvinden. In de literatuur worden verschillende waarden voor de taludhelling aangegeven afhankelijk van korreldiameter, getijdenamplitude, en positie in het profiel. Het betreft hier de taludhelling van een dynamisch evenwicht en de helling zal daarom variëren in de tijd. In [ref. 17.] worden de volgende waarde gegeven:

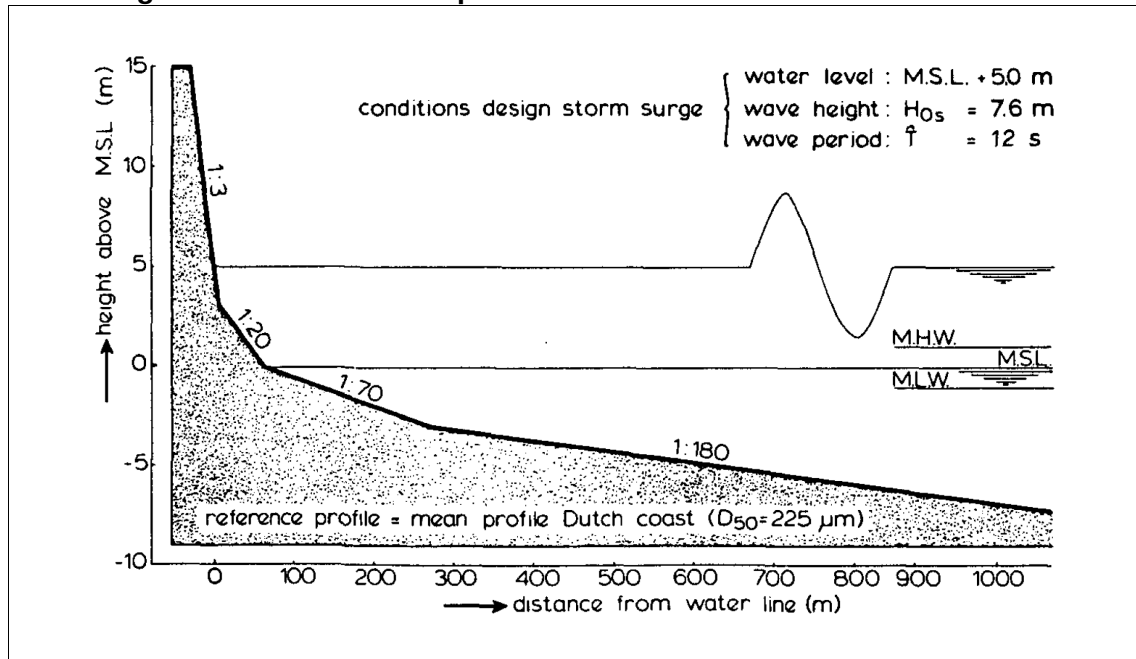
- helling strand tussen 0 en + 3 m boven het gemiddelde waterniveau: 1:20;
- helling strand tussen 0 en - 3 m boven het gemiddelde waterniveau: 1:50.

Boven de NAP + 3 m is er sprake van een steiler talud. Afbeelding 4.4 [ref. 17.] laat een geschematiseerd profiel van de Nederlandse kust zien. Hoewel de golfcondities voor de zandige oplossing milder zijn, en de korreldiameter van het zand grover zal zich vermoede-

lijk een vergelijkbaar dynamisch evenwichtsprofiel vormen. Het initiële profiel voor de zandige oplossing is gegeven in afbeelding 7.5 en als volgt vormgegeven:

- helling van 1:3 boven NAP + 3 m. Tijdens een storm zal zich hier een steiler profiel vormen, na een storm zal zich hier weer een stabiel talud vormen, bijvoorbeeld een helling van 1:3. De afslag tijdens een storm vindt plaats boven de extreme waterstand. NAP + 3 m is een meer voorkomende waterstand en hierboven zal zich het steilere profiel vormen;
- helling van 1:20 tussen NAP + 0 m en NAP + 3 m;
- helling van 1:50 onder NAP + 0 m tot het aanlegprofiel aansluit op de huidige bodem.

**Afbeelding 4.4. Geschematiseerd profiel Nederlandse kust**



#### 4.3.2. Korreldiameter D50

De te hanteren korreldiameter voor het suppletie materiaal is bepaald in hoofdstuk 6 en besproken in een expertsessie [ref. 18]. In de berekeningen wordt een korreldiameter van 300  $\mu$ m gehanteerd.

#### 4.3.3. Onnauwkeurigheid

In de Duros+ berekeningen worden toeslagen conform [ref. 7.] gehanteerd: de toeslag is  $0,25 \cdot A$ ; hier is A het volume wat afgeslagen is boven het rekenpeil. In de Unibest DE berekeningen wordt geen toeslag gehanteerd (bijvoorbeeld voor de modelon nauwkeurigheid) omdat de resultaten met name bedoeld zijn om inzicht te verkrijgen.

De toeslag  $0,25 \cdot A$  wordt in de ontwerp volumens opgenomen omdat toetsing conform de geldende leidraden (met Duros+) mogelijk moet zijn.

#### 4.3.4. Hydraulische parameters

De hydraulische parameters ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $h$ ) zijn voor verschillende windrichtingen gegeven in hoofdstuk 2. Voor deze verschillende windrichtingen is met behulp van Unibest DE het zandafslagvolume bepaald. In het model wordt uitgegaan van loodrechte golfval (conser-

vatieve aanname). Uit de berekeningen volgt dat een windrichting van 270 graden maatgevend is voor de afslag. Het resulterende profiel is gegeven in afbeelding 7.2. Opgemerkt wordt dat de gemiddelde richting van deze golven 77 graden is ten opzichte van de 'duin-normaal'. Deze golven vallen dus onder een zeer flauwe hoek op het duin. In feite vallen deze golven te duiden als strijkgolven. Opgemerkt wordt dat de daadwerkelijke golfhoogte van de golven (met richting 270 graden) reeds gereduceerd zijn, alleen de kustgerichte componenten zijn meegenomen (zie paragraaf 2.6.3).

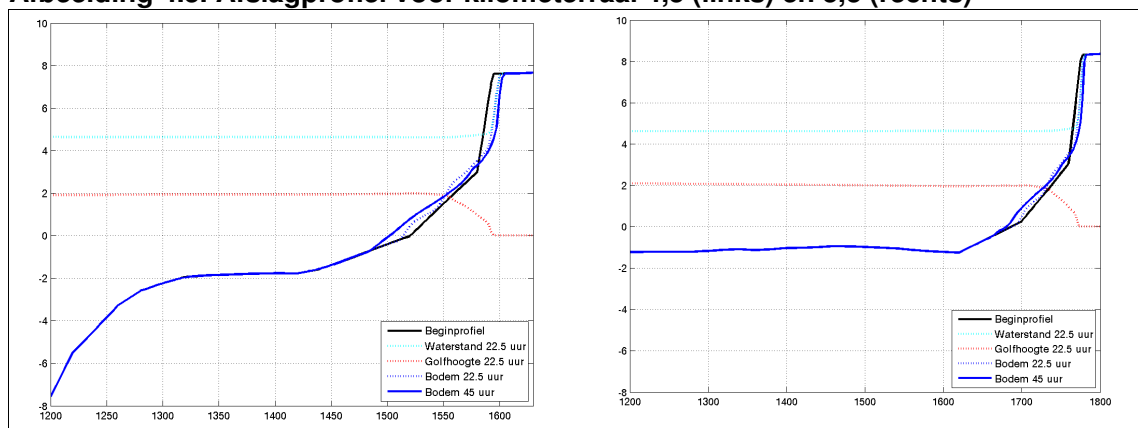
#### 4.3.5. Effect gradiënt in langstransport

Het effect van een gradiënt in langstransport tijdens ontwerpomstandigheden wordt behandeld in paragraaf 7.4.

#### 4.4. Resultaten Unibest DE

In afbeelding 4.5 is het berekende afslagprofiel weergegeven voor kilometerraai 4,5 en 5,5. Het afslagvolume A boven het rekenpeil bedragen respectievelijk  $29 \text{ m}^3$  en  $27 \text{ m}^3$ . Het afslagprofiel bevindt zich volledig aan de landzijde van de geul. Gedurende de ontwerpstorm zal daarom naar verwachting geen sediment uit het duin in de geul verdwijnen.

**Afbeelding 4.5. Afslagprofiel voor kilometerraai 4,5 (links) en 5,5 (rechts)**



#### 4.5. Resultaten Duros+

##### 4.5.1. Vorm van het profiel - invloed helling 1:12,5 in Duros+

De duinvoet is het punt waar het steile front van het afgeslagen duin overgaat in het veel flauwere profiel. De helling van het afgeslagen duintalud is 1:1. De vorm van het afslagprofiel van DUROS-plus wordt bepaald middels een evenwichtsformule die geldt tussen de duinvoet en een punt 'x-max'. Zeewaarts van x-max gaat het parabolische gevormde evenwichtsprofiel over in een talud onder een helling van 1:12,5 tot het oorspronkelijke dwarsprofiel wordt gesneden.

De helling van 1:12,5 bepaalt voor een belangrijk deel de grote van het afslagvolume. De reden hierachter is dat voor de zandige oplossing het huidige profiel ter plaatse van x-max relatief steil is (bij een steiler profiel zal de helling 1:12,5 op een grotere afstand het oorspronkelijke profiel kruisen). Door het kiezen van een aanlegvorm met een flauwer talud ter plaatse van x-max wordt de invloed van de helling 1:12,5 kleiner. Dit leidt echter tot een zeer grote groei van het aanlegvolume in de zandige oplossing. Het aanpassen van de

aanlegvorm om de invloed van de helling 1:12,5 te beperken wordt daarom niet als de juiste oplossing gezien.

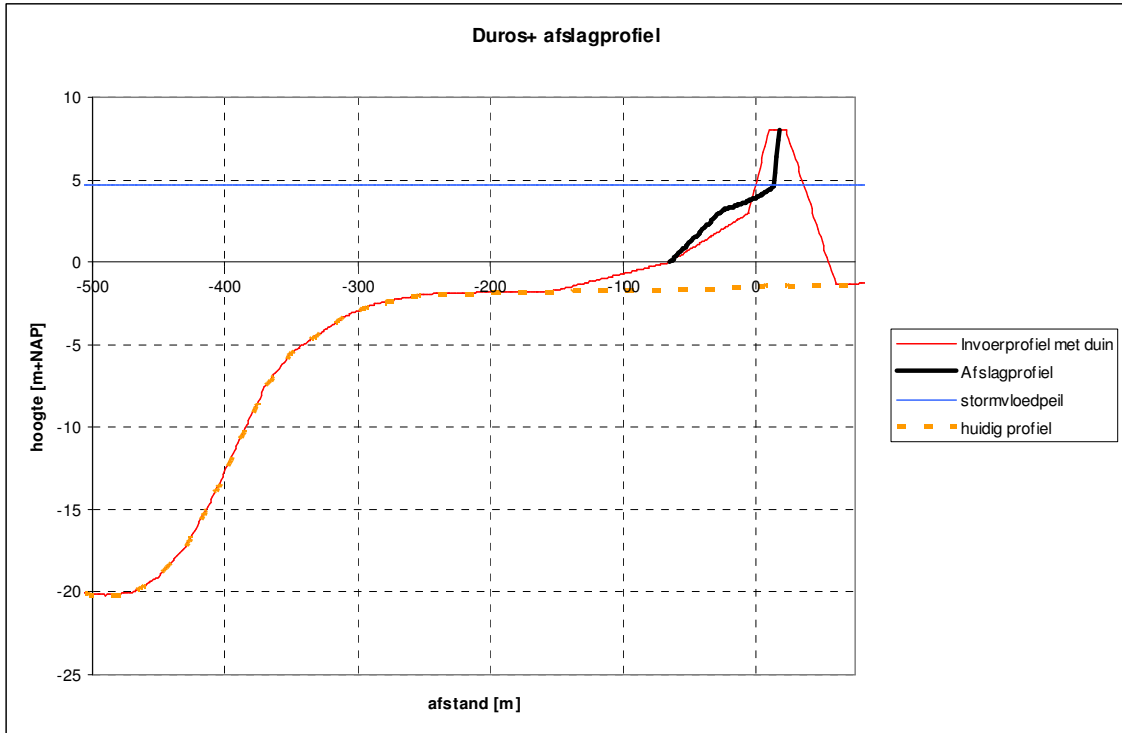
In [ref. 9.] wordt aangegeven dat nabij de helling van 1:12,5 nog enig zand uit het duin wordt afgezet. Daarnaast wordt opgemerkt dat de zeewaarts gerichte sedimenttransporten zeewaarts van x-max gering zijn. Uit de resultaten van het Duros+ model blijkt dat er een relatief groot volume zeewaarts van x-max wordt afgezet. Op deze manier ontstaat een sluitende zand-balans in de richting dwars op de kust. Het zeewaarts gerichte zandtransport in dwarsrichting langs x-max is op deze manier echter zeer groot. Dit transport is in werkelijkheid waarschijnlijk veel kleiner. Derhalve zal in de berekeningen een helling van 1:12,5 worden gehanteerd.

#### **4.5.2. Resultaten Duros+**

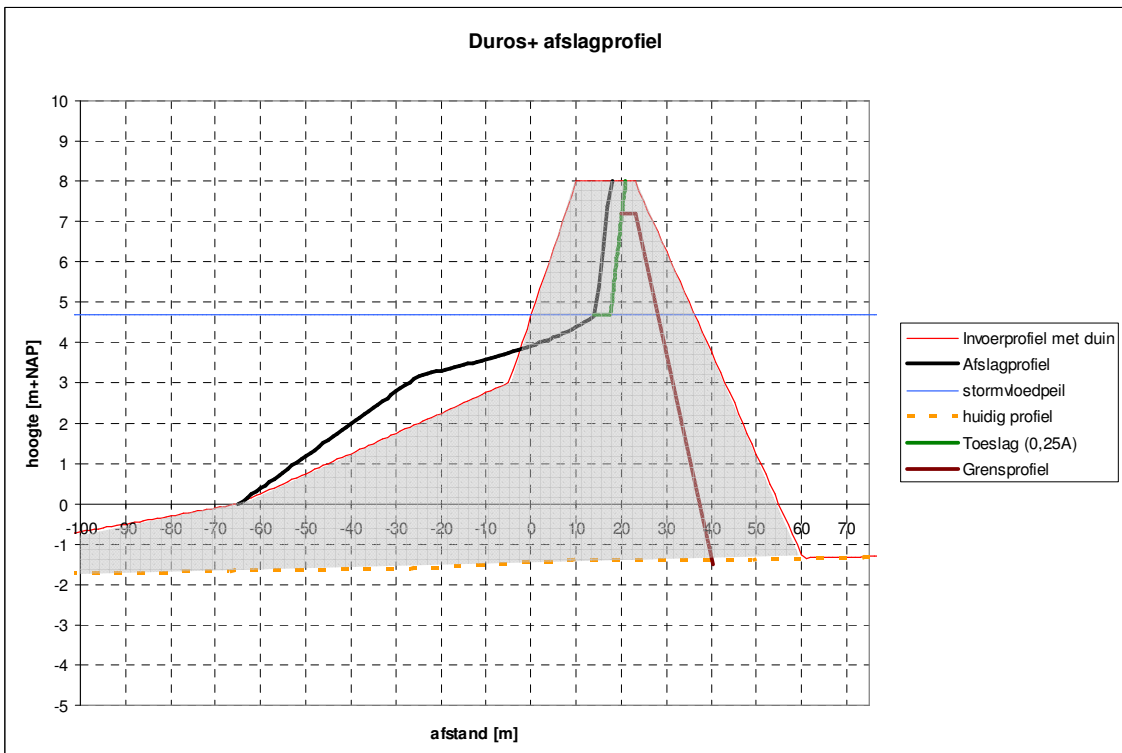
In afbeelding 4.6 is het evenwichtsprofiel die met Duros+ bepaald is voor kilometterraai 4,5, te zien. Hiervoor zijn dezelfde randvoorwaarden gehanteerd als in de Unibest DE berekeningen. De uitzondering hierop is het gebruik van een constant waterniveau in plaats van een waterstandverloop. Het afslagvolume boven het rekenpeil bedraagt  $36 \text{ m}^3$  voor kilometterraai 4,5. De stormvloedduur en de onzekerheid van het model worden in rekening gebracht door een extra afslagvolume van 0,25A te hanteren. Hierdoor dient 2,5m extra duin-terugtrekking in rekening te worden gebracht.

De met Duros+ gegenereerde afslagprofielen zijn goed vergelijkbaar met de resultaten uit het Unibest model. Het benodigde volume zand wat met Duros+ wordt bepaald is echter groter. Het werkelijk benodigde volume zand wat benodigd is om het grensprofiel tijdens een maatgevende storm te behouden is circa  $700 \text{ m}^3/\text{m}$  voor kilometterraai 4,5. Dit is het gearceerde vlak in afbeelding 4.7. Dit is het volume wat aan het huidige profiel dient te worden toegevoegd. Dit volume is veel groter dan het volume wat tijdens een ontwerpstorm daadwerkelijk afslaat. Het benodigde volume zand in het nieuwe duin wordt dan ook met name bepaald door de ligging van de huidige bodem, de evenwichtsligging van het profiel en in beperkte mate door de omvang van de afslag in dwarsrichting.

**Afbeelding 4.6. Afslagprofiel Duros+**



**Afbeelding 4.7. Afslagprofiel Duros+ in grijs het benodigde volume in de dwarsdoorsnede**



### **Resultaten kilometerraai 5,5**

Met Duros+ is tevens het afslagprofiel bepaald voor kilometerraai 5,5. De hydraulische randvoorwaarden verschillen marginaal met kilometerraai 4,5 en daardoor is het verschil in afslag zeer klein. Het afslagvolume boven het rekenpeil bedraagt 39 m<sup>3</sup> voor kilometerraai 5,5. Het werkelijk benodigde volume zand wat benodigd is in het profiel bedraagt circa 600 m<sup>3</sup>/m.

Het ontwerpprofiel is gelijk aan het ontwerpprofiel voor kilometerraai 4,5 (zoals bepaald in paragraaf 4.3). Het verschil in het totaal benodigde volume wordt met name veroorzaakt doordat het huidige profiel van raai 4,5 lager ligt en in mindere mate door het verschil in afslag.

De profielen van het duin langs de dijk (profiel loodrecht op de dijk) verschillen van elkaar door de lengte van het voorland (afstand tot de geul). Het afslagprofiel bevindt zich echter in haar geheel in het nieuw gevormde duin. De breedte van het voorland heeft in het Duros+ model geen invloed op golfcondities en ook niet op de vorm van het afslagprofiel. Het verschil in afslag in lengterichting (langs de dijk) wordt veroorzaakt door het verloop in 'diepwater'golfhoogte (zie afbeelding 4.8). Doordat deze golfrandvoorwaarden langs de dijk gelijkwaardig zijn en het invoerprofiel in lengterichting tevens gelijk is, is het benodigde basisvolume in dwarsrichting vrijwel gelijk.

#### **4.5.3. Gevoeligheid resultaten voor aanlegprofiel**

Het doel van de berekeningen is om te bepalen hoeveel zand er benodigd is in het duin. Belangrijke uitgangspunten die bijdragen aan het benodigde volume zijn de korrel diameter en de hydraulische condities. Deze zijn vastgesteld in hoofdstuk 2 en 3. Een andere belangrijke parameter is de vorm van het aanlegprofiel. De dimensies hiervan zijn voorgesteld in paragraaf 4.3. Een andere aanleghoogte is echter mogelijk (en mogelijk wenselijk). Daarnaast is het mogelijk dat zich in de loop van de tijd een ander dynamisch evenwichtsprofiel wordt gevormd dan is aangenomen. In deze paragraaf worden gevoeligheden besproken en de resultaten gegeven van enkele gevoeligheidsberekeningen ten aanzien van het aanlegprofiel (zie tabel 4.2).

Daarnaast is de gevoeligheid gegeven voor enkele hydraulische parameters. De gevoeligheid voor golfperiode en profiel van het voorland worden niet beschouwd omdat deze in het Duros+ model geen invloed hebben op de resultaten.



**Tabel 4.2. Gevoeligheid profiel (kilometerraai 4,5)**

<b>aanleghoogte</b>		[m + NAP]	6,5	8,0	9,5
<b>afslagvolume boven rekenpeil</b>		[m3]	28	36	36
<b>totaal benodigd volume in profiel</b>		[m3/m]	800	700	700
<b>aanlegheiling tussen NAP + 0 m en NAP + 3,0 m</b>			20	30	40
<b>afslagvolume boven rekenpeil</b>		[m3]	36	26	23
<b>totaal benodigd volume in profiel</b>		[m3/m]	700	750	800
<b>golfhoogte</b>	H <sub>s</sub>	[m]	2	2,5	3
<b>afslagvolume boven rekenpeil</b>		[m3]	36		55
<b>totaal benodigd volume in profiel</b>		[m3/m]	700		750
<b>waterstand</b>	h	[m + NAP]	4,7	5,55	
<b>afslagvolume boven rekenpeil</b>		[m3]	36	45	
<b>totaal benodigd volume in profiel</b>		[m3/m]	700	800	

### Alternatief grensprofiel

Er kan een relatief lager maar breder duin gecreëerd worden door uit te gaan van een alternatief grensprofiel. De aanleghoogte van het duin is dan minimaal NAP + 6,5 m. Het volume boven het rekenpeil dient gelijk te zijn aan het volume boven het rekenpeil voor de situatie met het 'standaard' grensprofiel. Bij een lager duin is de hoogte tussen rekenpeil en de top van het duin zeer klein. Verhoudingsgewijs zal een lager daarom leiden tot een groter benodigd volume. Uit de berekening blijkt dat het afslagvolume voor het alternatieve grensprofiel kleiner is, maar dat het totaal benodigde volume zand groter is. De verschillen zijn relatief klein en daarom zal het oorspronkelijk gekozen profiel worden gehanteerd.

### Aanlegheiling tussen NAP + 0 m en NAP + 3,0 m

In de helling van het aanlegprofiel kan de helling tussen NAP + 0 m en NAP + 3,0 m als grootste onzekerheid beschouwd worden (De taludhelling boven NAP + 3,0 m wordt zelden belast en de helling onder NAP + 0 m is reeds relatief flauw aangenomen). Een flauwer talud resulteert in een kleiner afslagvolume. Maar initieel moet hiervoor wel een groter volume zand worden aangebracht. De verschillen zijn relatief klein en daarom zal het oorspronkelijk gekozen profiel worden gehanteerd.

### Waterstand

In de huidige berekeningen zijn gemaakt op basis van een richtingsafhankelijke waterstand. In de expertsessie [ref. 18.] is aangegeven dat een vergelijking met de resultaten voor de toetswaterstand (inclusief toeslagen) wenselijk is. De toetswaterstand inclusief toeslagen is als volgt opgebouwd:

- toetspeil: NAP + 4,87 m;
- toeslag voor bodemdaling en zeespiegelrijzing: 0,33 m;
- 2/3 decimeringshoogte.

De waterstand inclusief toeslagen bedraagt NAP + 5,55 m.

Een vergelijking van het afslagvolume en het totaal benodigde volume voor de richtingsafhankelijke waterstand en toetspeil (inclusief toeslagen) laat zien dat voor de laatste een (significant) groter volume vereist is.

In deze rapportage wordt uitgegaan van de richtingsafhankelijke waterstand. Het hanteren van de richtingsafhankelijke waterstand maakt geen onderdeel uit van de HR2011. Het gebruik van de richtingsafhankelijke waterstand (en de daarbij passende suppletievolumes) wordt daarom in deze rapportage als onzekerheid aangeduid (zie hoofdstuk 9).

### **Erosie voorland**

Mogelijk zal door structurele erosie het voorland lager komen te liggen. Hierdoor zal mogelijk de golfbelasting op het duin en daarmee de afslag toenemen. Hiervoor wordt verdisconteerd in de slijtlaag.

Uit afbeelding 4.7 blijkt dat het afslagprofiel zich volledig boven nap+0 m bevindt. Het initiële profiel onder nap+0 heeft daarom geen invloed op het afslagprofiel zoals dat bepaald wordt met Duros+. Erosie boven nap+0 zal wel leiden tot extra afslag.

## **4.6. Langtransport**

Doordat er sprake is van een gesloten systeem zal langtransport leiden tot een gradiënt in langtransport en daarom tot sedimentatie en erosie. Bij golven uit zuidelijke richtingen ligt het duin direct ten noorden van haven 't Horntje in de luwte van de noordelijke havendam. Direct ten noorden van de havendam is het golfgedreven langtransport daarom nagenoeg nihil. Vanaf het 't Horntje richting het noorden zullen de golven een stroming genereren hetgeen resulteert in een langtransport. Derhalve wordt direct ten noorden van haven 't Horntje erosie verwacht. In deze paragraaf wordt middels berekeningen bepaald of het langtransport een significante bijdrage levert aan de erosie tijdens een ontwerpstorm.

De transportcapaciteit wordt bepaald voor verschillende doorsneden. In afbeelding 4.1 is de locatie van de beschouwde dwarsprofielen gegeven: km 3,5, km 4,5, km 5,5 en km 6,5. Het verschil in transportcapaciteit van de verschillende dwarsprofielen geeft een indicatie van erosiegevoeligheid van een dwarsprofiel. Voor de analyse in deze paragraaf geldt:

- alleen de maatgevende conditie windrichting 270 graden wordt beschouwd;
- alleen een golfrichting van 45 graden ten opzichte van de duinnormaal. Voor andere richtingen zal de transportcapaciteit lager zijn (conservatief uitgangspunt).

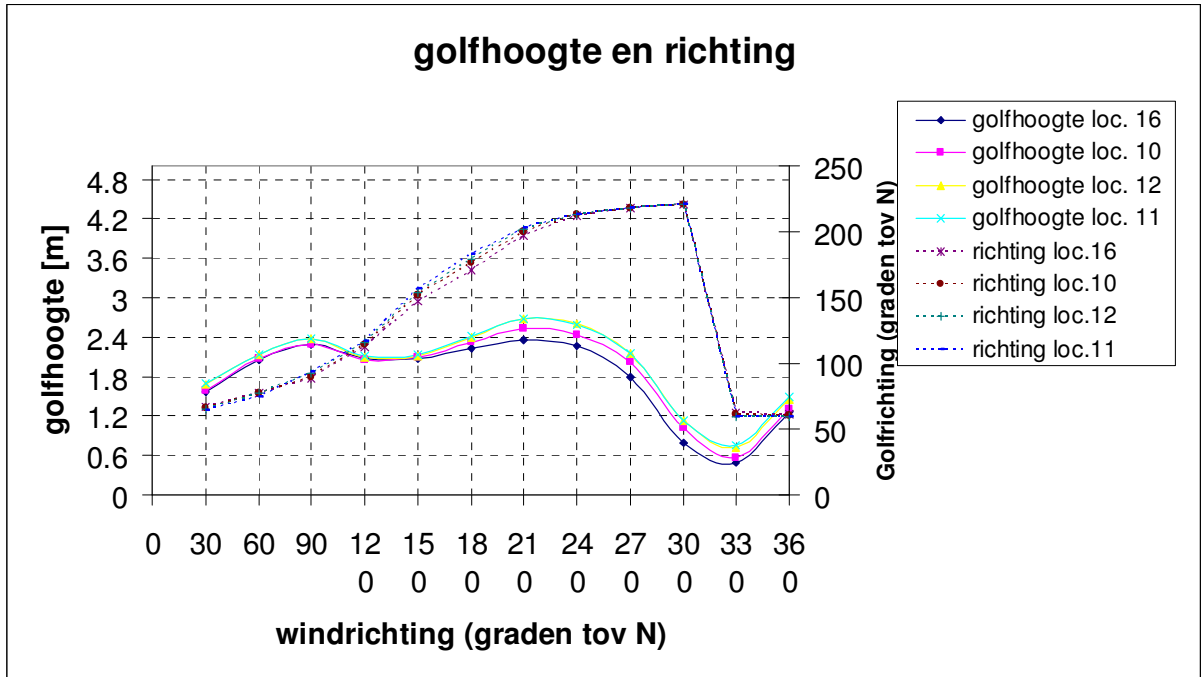
### **Golven**

In afbeelding 4.8 is voor de 4 dwarsraaien de golfhoogte en richting gegeven voor de verschillende windrichtingen. Hieruit valt op te maken:

- de golfrichting is nagenoeg constant in lengterichting van het duin;
- de golfhoogte neemt toe in noordelijke richting.

Deze variatie in golfhoogte in lengterichting veroorzaakt mogelijk een gradiënt in langtransport.

**Afbeelding 4.8. Variatie golfhoogte en golfrichting in langsrichting**



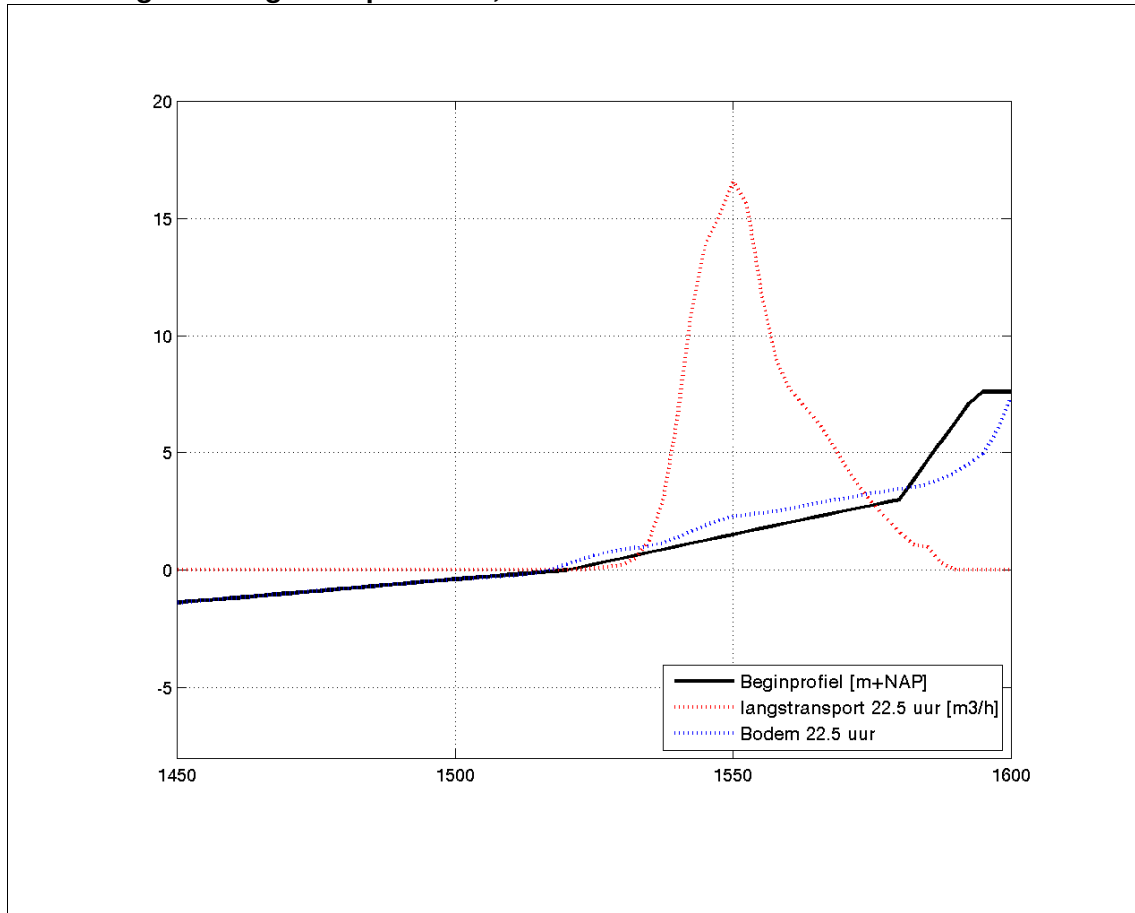
### Resultaten Unibest DE

In afbeelding 4.9 wordt het langtransport, zoals bepaald met Unibest DE, gegeven voor dwarsraai km 4,5 tijdens de piek van de storm. In tabel 4.3 is het langtransport door de verschillende raaien gegeven. In de laatste kolom van de tabel is het transport tijdens de piek van de storm gegeven. In de tweede kolom is het totale langtransport gedurende de storm gegeven.

Het berekende langtransport wordt gezien als de transportcapaciteit. Deze is voor de verschillende dwarsraaien gegeven in tabel 4.3. De tabel laat zien dat transportcapaciteit varieert in lengte richting. De grootste gradiënt in langtransport bevindt zich direct ten noorden van haven 't Horntje. Hier wordt daarom de grootste erosie verwacht. Voor een eerste ordebenadering wordt er van uitgegaan dat het langtransport ter hoogte van km 4,5 gelijk is aan de transportcapaciteit. Tussen km 3,0 en km 4,5 zal het langtransport daarmee toenemen van  $0\text{ m}^3/\text{h}$  tot  $400\text{ m}^3/\text{h}$ . Gedurende de gehele storm zal er tussen km 3,0 en km 4,5,  $5.000\text{ m}^3$  eroderen. Door dit te middelen over het traject km 3,0 - km 4,5 kan de erosie per strekkende meter worden geschat. De eerste ordeschatting geeft een erosie van  $<10\text{ m}^3/\text{m}$  op het traject km 3,0 tot km 4,5. Deze hoeveelheid is verwaarloosbaar ten opzichte van het dwarstransport.

Het model Unibest DE is in eerste instantie bedoeld om dwarstransporten te bepalen. Derhalve is het langtransport tevens bepaald met andere langtransportformules (Kamphuis, CERC en V. Rijn). Een vergelijking met de resultaten van deze formules laat zien dat het met Unibest DE berekende langtransport als conservatief kan worden gezien.

**Afbeelding 4.9. Langtransport km 4,5**



**Tabel 4.3. Langtransport**

dwarsprofiel	totale langtransport gedurende een storm [m <sup>3</sup> ]	langtransport tijdens piek van de storm [m <sup>3</sup> /h]
km 3,5	3.300	265
km 4,5	5.000	400
km 5,5	7.000	420
km 6,5	4.100	390

#### 4.7. Zettingen

Middels een 1D zettingsberekening is een globale inschatting gegeven van de zettingen van het nieuw aangebrachte duin. De volgende uitgangspunten zijn aangehouden voor de zettingsberekening:

- grondonderzoek: Resultaten grond- en laboratoriumonderzoek Waddenzeedijk Texel 2009.pdf;
- 1D zettingsberekening met Dsettle 9.1;
- zandophoging tot NAP + 8.00 m;
- grondopbouw aangehouden zoals hieronder opgenomen in tabel, parameters gebaseerd op tabel 1 van NEN6740.

laag	niveau bovenkant laag [NAP +m]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_n$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$C_\alpha$ [-]	CR [-]	RR [-]	OCR [-]	$c_v$ [m <sup>2</sup> /s]
1 : klei, licht zandig, slap	- 1,50	15,0	15,0	0,0092	0,2300	0,0767	1,3	1,00E-07
2 : zand, schoon, los	- 3,00	17,0	19,0	0,0000	0,0115	0,0038	1,3	1,00E-01
3 : klei, schoon, matig	- 14,50	17,0	17,0	0,0061	0,1533	0,0511	1,3	1,00E-07
4 : zand, schoon, vast	- 15,50	19,0	21,0	0,0000	0,0023	0,0008	1,3	1,00E-01

De berekende zetting ten gevolge van de zandaanvulling bedraagt ongeveer 0,3 m tot 0,5 m. Dit is een relatief kleine zetting. Het extra benodigde volume zand om te verdisconteren voor de zettingen wordt geschat op maximaal 50 m<sup>3</sup>/m.

#### 4.8. Conclusie basisvolume

Uit de voorgaande paragrafen wordt het volgende geconcludeerd:

- de bijdrage van langtransport aan het benodigde volume in het basisprofiel is verwaarloosbaar;
- inpassing: In de uitwerking van de zandige oplossing wordt vanuit gegaan dat het volume van de dijk niet bijdraagt aan het volume van het duin. De achterzijde van het grensprofiel ligt op de teen van de huidige dijk (zie paragraaf 4.2.3);
- de resultaten voor het afslagvolume met de gehanteerde modellen, Unibest DE en Duros+, zijn vergelijkbaar. De resultaten van het Duros+ model worden gebruikt voor de het werkelijk benodigde volume;
- het afslagvolume wordt in het Duros+ model bepaald door de vorm van het nieuwe duin. Doordat de randvoorwaarden in lengterichting vergelijkbaar zijn, is het benodigde 'basisprofiel' in lengterichting vrijwel gelijk. Het benodigde basisvolume (per strekkende meter) in een doorsnede wordt met name bepaald door de huidige ligging van zeebodem en dijk;
- de bijdrage van zettingen aan het totaal benodigde volume is relatief klein, orde 50 m<sup>3</sup>/m;
- het benodigde volume zand wat aan het huidige profiel dient te worden toegevoegd als basisvolume is circa 700 m<sup>3</sup>/m. De onderdelen waaruit dit basisvolume is opgebouwd staat in staan in tabel 4.4.

**Tabel 4.4. Opbouw basisvolume**

Onderdeel	
benodigde volume zodat bij maatgevende afslag het minimaal grensprofiel overblijft (inclusief toeslag van 0,25 A)	650 m <sup>3</sup> /m
langtransport	verwaarloosbaar
zettingen	50 m <sup>3</sup> /m
winderosie	niet opgenomen in basisvolume
inpassing huidige dijk	volume huidige dijk geen onderdeel van basisvolume, het duin ligt voor de dijk
opvulling tussen dijk en duin	geen
<b>totaal</b>	<b>700 m<sup>3</sup>/m</b>

Opgemerkt wordt dat het gegeven volume het minimaal benodigde volume is. Door de relatief milde golfcondities is er sprake van een relatief klein grensprofiel (en daarmee een relatief klein basisvolume) in vergelijking met andere duinen in Nederland. Een groter volume is

mogelijk wenselijk vanuit ecologisch of landschappelijk oogpunt (zie hoofdstuk 9 en 10). Een schets van de doorsnede is gegeven in de tekening die is opgenomen in bijlage VI.

#### **4.9. Winderosie**

Verstuiving en erosie door wind zijn zoals reeds eerder in deze rapportage aangegeven zeer ongewenst. Enerzijds wordt verstuiving (en daarmee erosie) beperkt door het hantieren van een relatief grote korreldiameter. Anderzijds kan erosie door wind ingeperkt worden door begroeiing. Deze begroeiing dient dan 'doorgaand en vitaal' te zijn.

In het kader van toetsing (VTV2006) wordt geëist dat de afstand tussen de achterzijde van het grensprofiel en de landwaartse zijde (ter hoogte van het rekenpeil) groter is dan 50 m of sprake is van doorgaande en vitale begroeiing. De genoemde afstand is in het ontwerp veel kleiner dan 50 m. Om tot deze afstand te komen is extra volume benodigd. Door circa 300 m<sup>3</sup>/m aan het duin toe te voegen kan deze afstand wel degelijk gerealiseerd worden. Dit is zou een significant aandeel zijn in het totaal benodigde volume.

Om zonder dit extra volume in de toetsing te voldoen dient derhalve de doorgaande, vitale begroeiing gewaarborgd te worden.

Ondanks dat het duin niet dynamisch is (weinig verstuiving) blijft het helm decennia lang domineren/goed. In deze tijd treedt er tevens successie op naar duindoornstruwelen en ander struweel die op den duur de functie van het vasthouden van zand over kunnen nemen. Eis voor de ontwikkeling van struweel is kalkhoudend zand.

Opgemerkt wordt dat er geen zandsurplus is opgenomen voor eventuele verliezen door verstuiving. Dit is aangeduid als risico/onzekerheid in hoofdstuk 9.

## 5. DUIN - VOLUME SLIJTLAAG

Voor de aanleg van de suppletie dient rekening te worden gehouden met de verwachte zandverliezen gedurende de periode tussen aanleg en het optreden van de extreme condities. De aanvullende hoeveelheid zand die nodig is om de verliezen op te vangen wordt hier de slijtlaag genoemd. Om de slijtlaag te kunnen bepalen zijn de hydraulische omstandigheden en het morfologisch gedrag beschouwd. Allereerst is gekeken naar de historische ontwikkeling (paragraaf 5.1 en bijlage III) en is een kwalitatieve analyse van het sedimenttransport (paragraaf 5.2 en bijlage III) gedaan. In paragraaf 5.3 en bijlage IV is tenslotte een kwantitatieve analyse uitgevoerd op basis waarvan de benodigde slijtlaag en onderhoudsinspanning is vastgesteld.

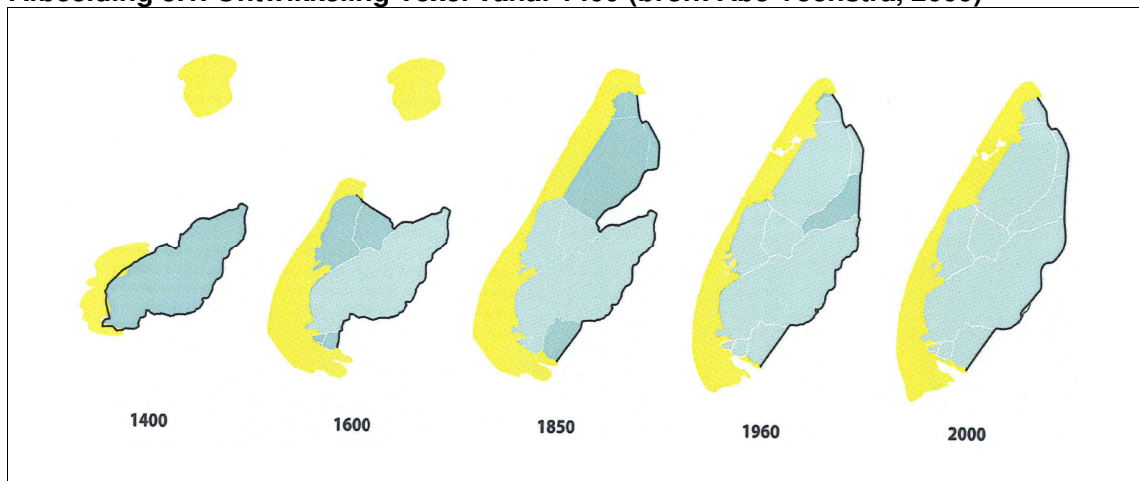
In de paragrafen in hoofdstuk 5 is steeds een samenvatting gegeven van de bijlagen.

### 5.1. Historische ontwikkeling zuid Texel

De basis voor Texel is ontstaan als stuwwal tijdens de voorlaatste ijstijd toen gletsjertongen ondergrond voor zich uitschoven. Vrij dicht aan het oppervlakte bevindt zich kleileem: een dicht, slecht doorlatend mengsel van keien, grind en leem (bron presentatie Abe Veenstra landschapsarchitect).

Tot de Allerheiligenvloed in 1170 maakte Texel deel uit van het vaste land van Noord Holland. Tijdens de vloed brak de duinenrij door waardoor het Marsdiep ontstond en werd Texel een eiland. In de loop der tijd is het eiland mede door menselijk ingrijpen verder ontwikkeld.

**Afbeelding 5.1. Ontwikkeling Texel vanaf 1400 (bron: Abe Veenstra, 2009)**



Tussen 1847 en 1848 wordt de Prins Hendrikpolder ingepolderd op een ondiepe vlakte die aan de oostzijde begrensd wordt door de Texelstroom. De noord/westzijde van de polder wordt gevormd door de oude stuwwal die de basis van het eiland Texel vormt.

In afbeelding 5.2 zijn de topgrafische kaarten vanaf 1850 gepresenteerd van het plateau van de Prins Hendrikpolder.

## Abbeelding 5.2. Ontwikkeling plateau Prins Hendrikpolder

Situatie 1850



situatie 1952



Situatie 1961



Situatie 1971



Situatie 1994



Situatie 2009



In afbeelding 5.2 is te zien dat het gearceerde gedeelte op het plateau sinds 1850 afneemt in de tijd. Mogelijk dat hiermee het droogvallend gedeelte wordt beschreven en dat dit langzaam afneemt.

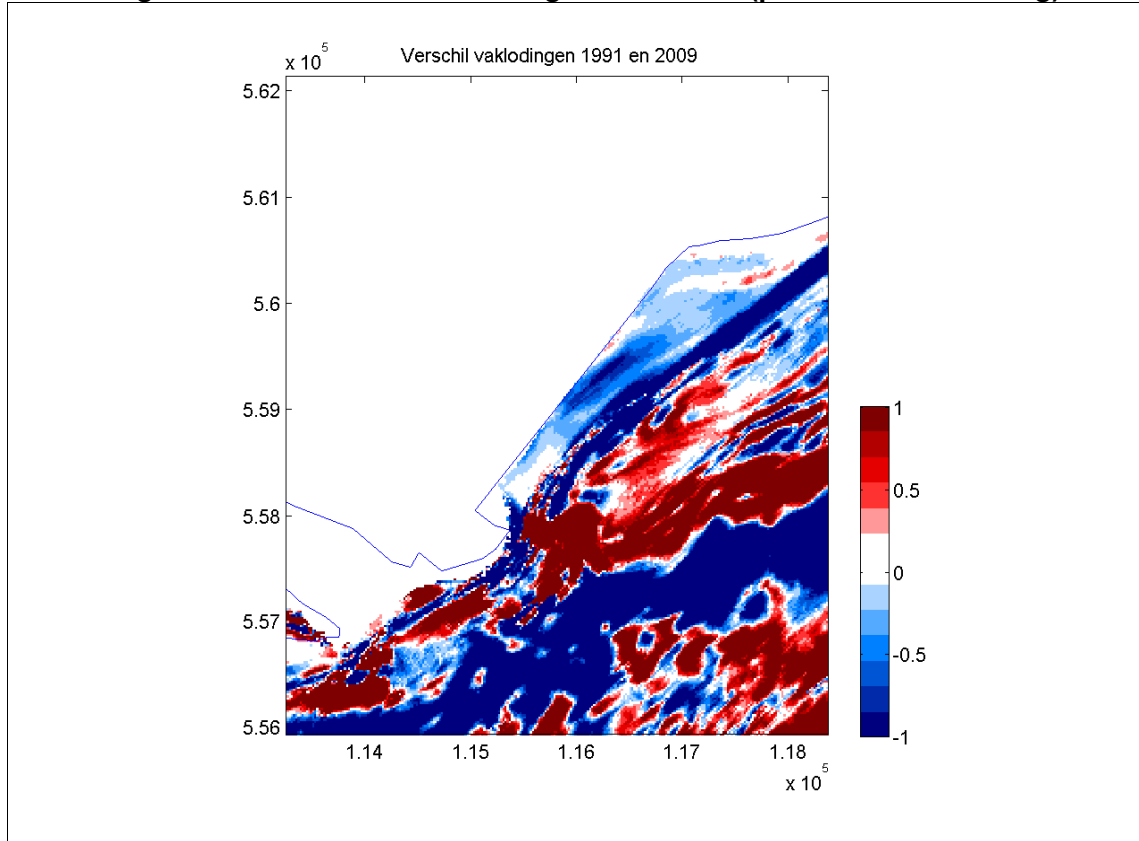
De Texelstroom draait na de aanleg van de afsluitdijk in noordelijke richting bij. De aanleg van de afsluitdijk heeft een effect gehad op de geulen van de binnendelta van het zee gat van Texel. Voorheen was de stroming door het Zeegat van Texel hoofdzakelijk westoost,



na de aanleg van de Afsluitdijk is dat meer zuidwest-noordoost. De Texelstroom snijdt momenteel langzaam in op het plateau voor de Prins Hendrik polder.

In afbeelding 5.3 is het verschil tussen de vaklodingen van 1991 en 2009 gepresenteerd.

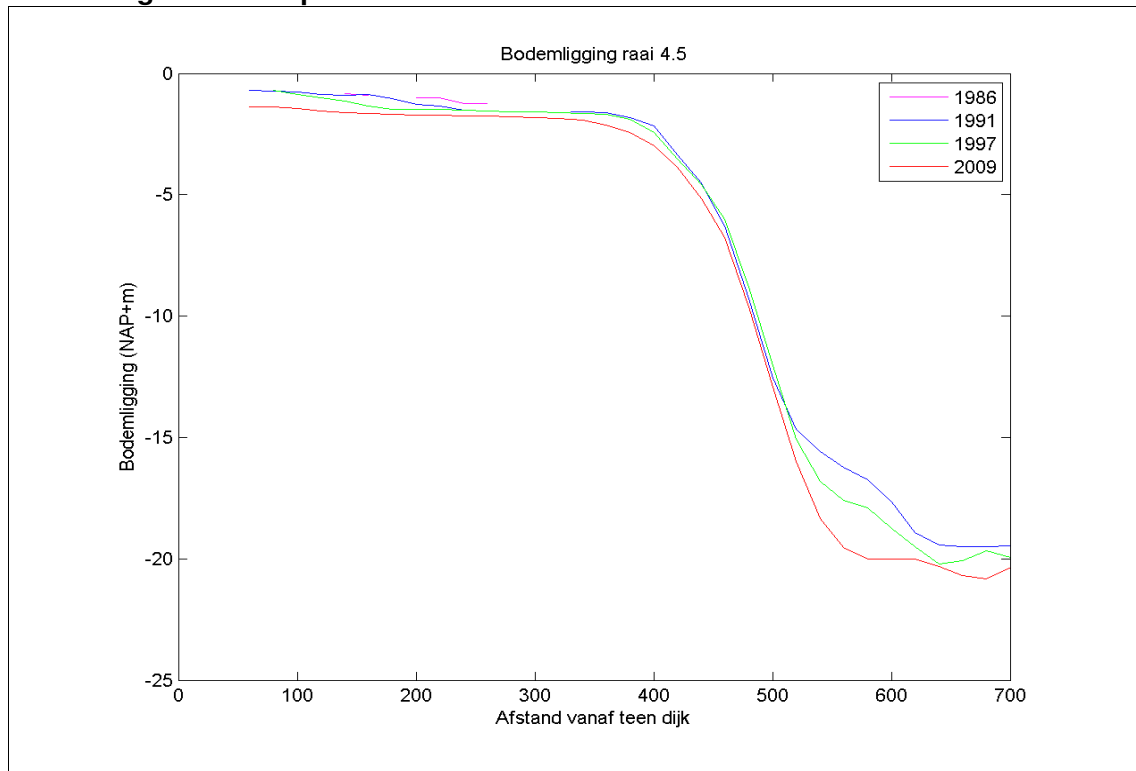
**Afbeelding 5.3. Verschil tussen vakloding 1991 en 2009 (positief is aanzanding)**



In afbeelding 5.3 is te zien dat op het plateau voor een groot gedeelte er sprake is van erosie en aan zuid- en noordkant consolidatie plaatsvindt. De erosie is grotendeels lager dan 0,5 m in 18 jaar, wat gekenmerkt kan worden als zeer lichte mate van erosie.

Afbeelding 5.4 geeft het profiel in raai 4.5 weer. Ook hierin is te zien dat de bodem op het plateau erodeert en de geulwand langzamerhand opschuift.

**Afbeelding 5.4. Dwarsprofiel van raai 4.5**



## 5.2. Kwalitatieve analyse sedimenttransport

Bij het sedimenttransport kan onderscheid gemaakt worden tussen het transport boven de waterspiegel (windtransport), in de brekerzone (voornamelijk golven) en op dieper water (golven en stroming).

De voornaamste stroming vindt plaats in de diepe geul. Op het plateau zijn de stroomsnelheden significant lager en zijn maximaal circa 0,5 - 0,6 m/s. Nabij de kust zijn de stroomsnelheden nog lager. Vanuit het noordoosten tot het zuiden worden golven vanwege de ligging van het plateau lokaal opgewekt in de westelijke Waddenzee. Vanuit het zuiden tot het zuidwesten dringen golven vanaf de Noordzee door het Marsdiep naar binnen. Deze golven kunnen als gevolg van diffractie en refractie de zandige oplossing bereiken onder een vrij grote hoek van inval. Door de ligging van de Prins Hendrikpolder vindt bij de grootste golven vaak afwaaiing plaats, wat de golfgroei weer beperkt.

Vanwege de lage stroomsnelheden mag verwacht worden dat de transporten onder invloed van golven maatgevend zijn.

Eolisch transport (wind) is te verdelen in langtransport en dwarstransport. Dit dwarstransport vindt met name plaats bij laag water (met zuidelijke en oostelijke wind) wanneer een groot gedeelte van het strand en duin onder invloed van eolisch transport is. Het eolische transport zal flink gereduceerd worden door aanplant van helmgras.

Vanwege de lage stroomsnelheden mag verwacht worden dat de transporten onder invloed van golven in de brekerzone maatgevend zijn. De invloed van de stroming en eolisch transport wordt meegenomen in een factor op de transporten door golven.

### 5.3. Slijtlaag - kwantitatieve analyse

#### 5.3.1. Aanpak

Om de dikte van de slijtlaag van het duin ter plaatse van de Prins Hendrikpolder te bepalen zijn de volgende stappen uitgevoerd:

- bepalen golfcondities met behulp van SWAN;
- bepalen sedimenttransporten met UNIBEST CL+;
- genereren tijdreeksen transporten;
- bepalen dikte slijtlaag.

Uitgebreidere rapportage is gegeven in bijlage IV.

#### 5.3.2. UNIBEST CL+

Op basis van de gemeten windsnelheden voor de periode 1981 - 2010 is met een SWAN-model van de westelijke Waddenzee een golfklimaat op raaien van de Prins Hendrikpolder bepaald. Het golfklimaat is geschematiseerd in 81 condities. In tabel 5.1 zijn deze condities weergegeven.

**Tabel 5.1. Invoercondities golfmodellering**

parameter	condities			aantal
waterstanden	NAP + 0,0 m	NAP + 1,5 m	NAP+ 3,0 m	3
windsnelheden	5 m/s	10 m/s	20 m/s	3
windrichtingen	30 - 270 graden in stappen van 30 graden			9

Met UNIBEST CL+ zijn door Deltares op basis van deze 81 condities sedimenttransporten berekend. Hiervoor is voor iedere SWAN raai het toekomstig duinprofiel toegevoegd. Het duinprofiel is zeewaarts van de teen van de bestaande dijk gemodelleerd. De totale sedimenttransporten worden bepaald langs de 7 raaien voor alle golfcondities uit de SWAN modellering.

#### 5.3.3. Resultaten SWAN golfmodel

Uitvoer is gegenereerd langs 7 raaien dwars op de kust, lopend van diep water naar ondiep water. De raaien zijn genomen overeenkomstig met de eerder gekozen raaien [ref. 7.] zoals weergegeven in tabel 5.2.

**Tabel 5.2. Coördinaten uitvoerlocaties per dwarsprofiel**

raai	x (m)	y (m)
0	zuidelijke grens NIOZ	
1	115548	558053
2	115834	558465
3	116213	558802
4	116664	559084
5	117041	559395
6	117400	559675
7	117823	560034
8	noordelijke grens OS	

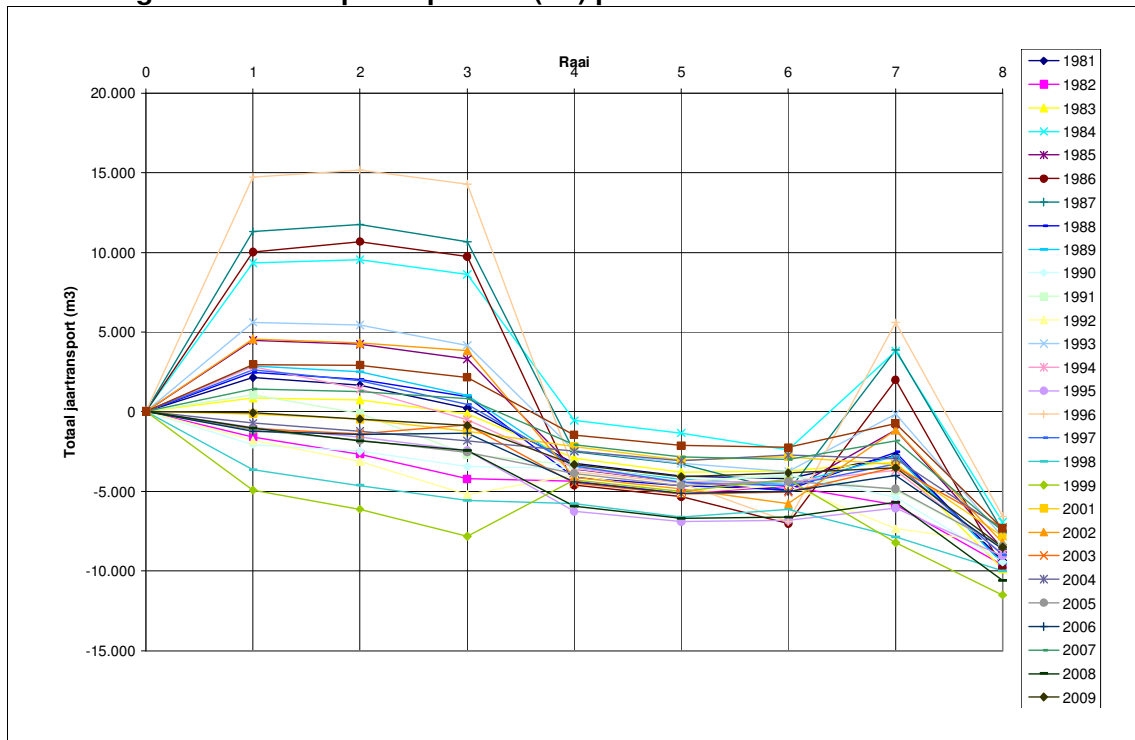
### 5.3.4. Sediment balans

Op basis van de gemeten tijdreeks van waterstanden (Den Helder) en windcondities (Texel Hors) zijn de transportcapaciteiten bepaald langs de 7 raaien voor de periode 1981 - 2010. In afbeelding 5.5 zijn de transporten per jaar gepresenteerd. Een negatieve transport capaciteit duidt op een transport in noordoostelijke richting (richting Oudeschild (OS)) terwijl een positieve transport capaciteit duidt op een transport in zuidwestelijke richting (richting De Hors (NIOZ)).

In de berekeningen is er vanuit gegaan dat er geen sediment door de zuidelijke rand verdwijnt. De golfbreker van de haven van het NIOZ ligt zodanig dat het onwaarschijnlijk is dat het sedimenttransport hier uit het systeem verdwijnt.

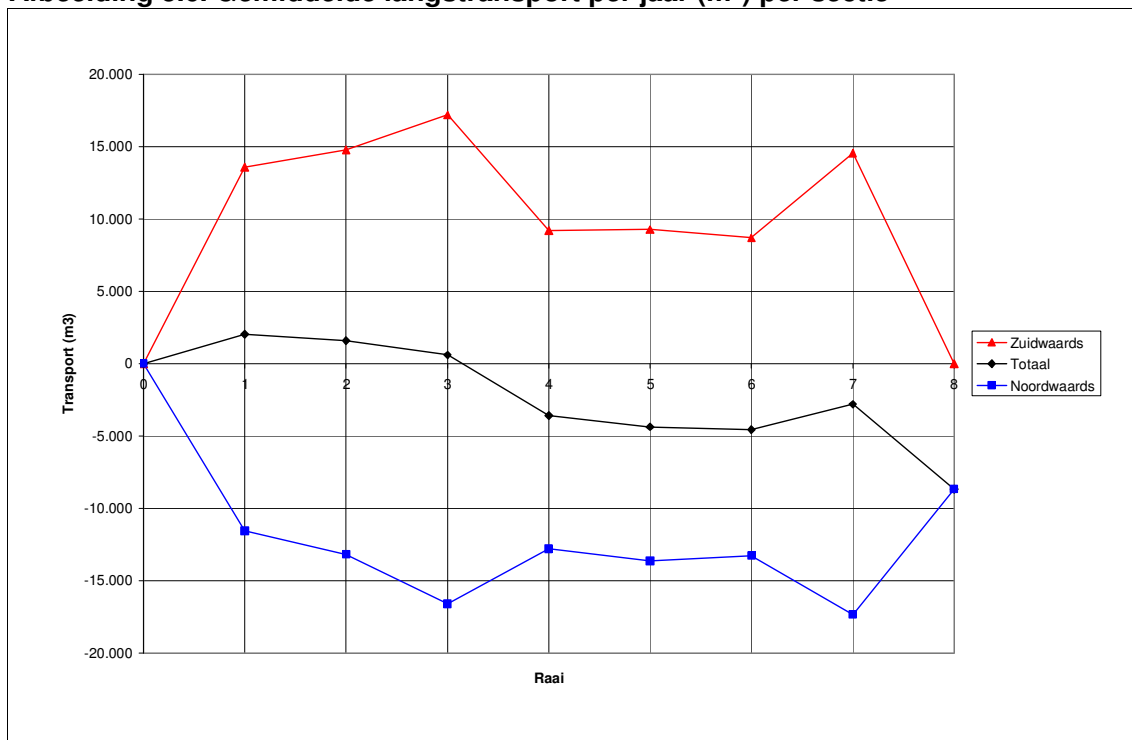
Aan de noordelijke rand houden we rekening met een verlies van 50 % van het noordwaarts gerichte transport. Door de oriëntatie van de haven van Oudeschild is het niet waarschijnlijk dat al het transport zal verdwijnen in de Texelstroom. Op basis van de Unibest berekeningen is gebleken dat de evenwichtsoriëntatie van de kust circa 10 - 20 graden (met de klok mee) verschilt van de huidige oriëntatie. De kust oriëntatie nabij Oudeschild verschilt meer dan 20 graden met de huidige Prins Hendrikdijk. Het is dan ook aannemelijk dat golfgedreven langtransport naar Oudeschild toe minder wordt. Een verlies van circa 50 % lijkt aannemelijk en conservatief.

**Afbeelding 5.5. Jaartransportcapaciteit (m<sup>3</sup>) per raai**



In afbeelding 5.6 zijn het gemiddeld transport in noordelijke en zuidelijke richting, alsook het netto transport gepresenteerd.

**Afbeelding 5.6. Gemiddelde langtransport per jaar (m<sup>3</sup>) per sectie**



De gradiënten tussen de raaien geven een indicatie van de te verwachten kustlijnontwikkeling. De gradiënten zijn bepaald voor de secties tussen twee raaien. Een negatieve gradiënt is een indicatie voor een sediment tekort. Dit leidt in de praktijk tot erosie. Een positieve gradiënt is een indicatie voor kust-aanwas. De resulterende verwachte kustlijnontwikkeling is weergegeven in tabel 5.3 en in afbeelding 5.7. Voor het jaar 2000 zijn geen waarnemingen beschikbaar.

Hier beperken we ons tot een overzicht met alleen de jaargradiënten, voor meer details verwijzen we naar bijlage IV. De gepresenteerde transporten en kustlijnontwikkelingen zijn indicatief en moeten met een aanzienlijke range geïnterpreteerd worden.

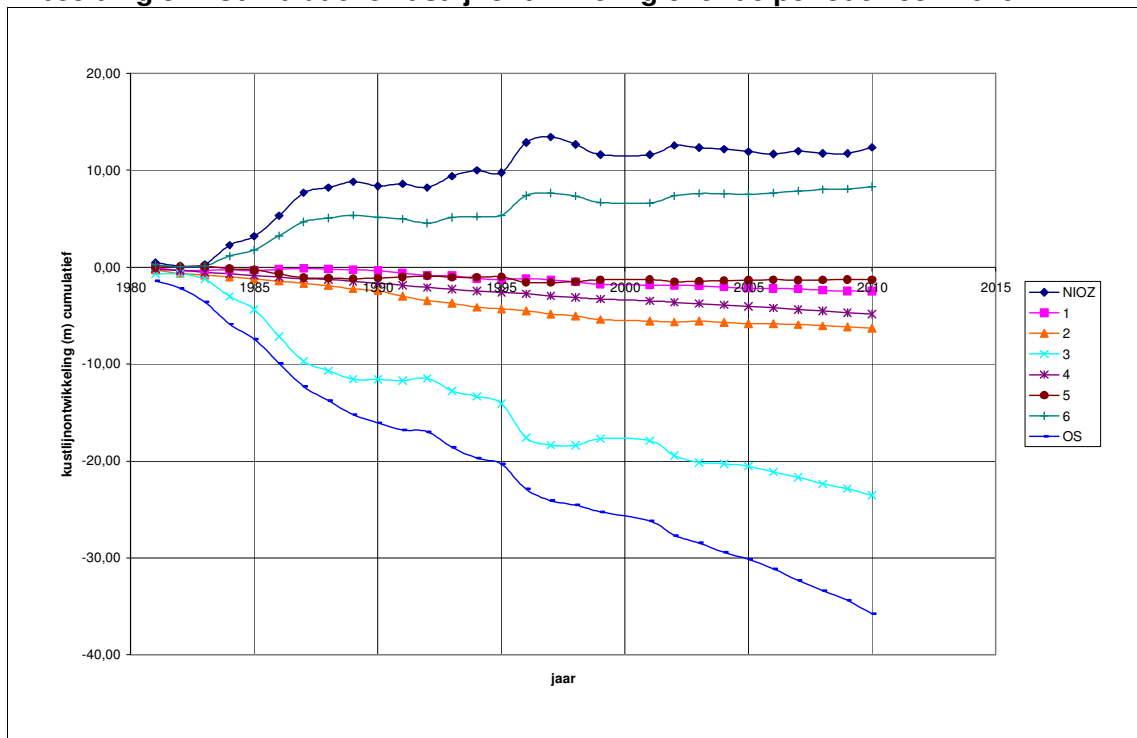
**Tabel 5.3. Verwachte kustlijnontwikkeling per sectie in m per jaar**

jaar	sectie							
	NIOZ <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6	OS <sup>1</sup>
1981	0,45	- 0,09	- 0,31	- 0,67	- 0,17	- 0,04	0,24	- 1,39
1982	- 0,33	- 0,21	- 0,33	- 0,03	- 0,17	0,10	- 0,19	- 0,80
1983	0,18	- 0,02	- 0,19	- 0,54	- 0,19	0,02	0,09	- 1,41
1984	1,97	0,04	- 0,20	- 1,78	- 0,17	- 0,24	1,01	- 2,26
1985	0,94	- 0,05	- 0,20	- 1,34	- 0,16	- 0,13	0,62	- 1,57
1986	2,11	0,13	- 0,20	- 2,79	- 0,15	- 0,39	1,47	- 2,48
1987	2,38	0,09	- 0,24	- 2,56	- 0,16	- 0,39	1,45	- 2,40
1988	0,51	- 0,08	- 0,24	- 0,98	- 0,11	- 0,05	0,38	- 1,47
1989	0,60	- 0,07	- 0,32	- 0,88	- 0,16	- 0,07	0,29	- 1,41
1990	- 0,43	- 0,08	- 0,21	- 0,02	- 0,18	0,10	- 0,23	- 0,85
1991	0,22	- 0,23	- 0,56	- 0,13	- 0,22	0,08	- 0,15	- 0,74

<sup>1</sup> Breedte van de eerste en laatste sectie is als 250 m genomen.

jaar	sectie							
	NIOZ <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6	OS <sup>1</sup>
1992	- 0,38	- 0,26	- 0,45	0,24	- 0,24	0,11	- 0,45	- 0,19
1993	1,18	- 0,04	- 0,27	- 1,29	- 0,17	- 0,12	0,59	- 1,62
1994	0,59	- 0,27	- 0,41	- 0,59	- 0,19	0,00	0,12	- 1,10
1995	- 0,21	- 0,12	- 0,18	- 0,75	- 0,14	0,02	0,12	- 0,63
1996	3,10	0,09	- 0,19	- 3,51	- 0,15	- 0,55	2,04	- 2,56
1997	0,56	- 0,14	- 0,32	- 0,75	- 0,22	- 0,05	0,22	- 1,20
1998	- 0,77	- 0,19	- 0,20	- 0,04	- 0,18	0,11	- 0,28	- 0,45
1999	- 1,04	- 0,24	- 0,37	0,68	- 0,15	0,18	- 0,65	- 0,69
2000	-	-	-	-	-	-	-	-
2001	- 0,03	- 0,07	- 0,16	- 0,19	- 0,18	0,04	- 0,08	- 0,95
2002	0,96	- 0,05	- 0,11	- 1,55	- 0,15	- 0,21	0,75	- 1,49
2003	- 0,23	- 0,06	0,12	- 0,71	- 0,15	0,03	0,25	- 0,79
2004	- 0,15	- 0,10	- 0,13	- 0,13	- 0,12	0,08	- 0,04	- 0,93
2005	- 0,25	- 0,13	- 0,16	- 0,26	- 0,16	0,06	- 0,08	- 0,76
2006	- 0,26	- 0,04	0,02	- 0,60	- 0,15	0,02	0,16	- 0,97
2007	0,30	- 0,03	- 0,10	- 0,56	- 0,16	- 0,04	0,19	- 1,20
2008	- 0,22	- 0,16	- 0,13	- 0,68	- 0,17	0,02	0,15	- 1,03
2009	- 0,02	- 0,08	- 0,09	- 0,47	- 0,16	0,05	0,05	- 1,05
2010	0,62	- 0,01	- 0,16	- 0,71	- 0,14	- 0,03	0,24	- 1,39
<b>totaal (in 30 jaar)</b>	<b>12,4</b>	<b>- 2,5</b>	<b>- 6,3</b>	<b>- 23,5</b>	<b>- 4,8</b>	<b>- 1,3</b>	<b>8,3</b>	<b>- 35,8</b>
<b>gemiddeld per jaar</b>	<b>0,43</b>	<b>- 0,09</b>	<b>- 0,22</b>	<b>- 0,81</b>	<b>- 0,17</b>	<b>- 0,04</b>	<b>0,29</b>	<b>- 1,23</b>

Afbeelding 5.7. Cumulatieve kustlijnontwikkeling over de periode 1981-2010



Voor de bepaling van de slijtlaag moet veiligheid gegarandeerd worden. Hiervoor nemen we kustaanwas (sedimentatie) niet mee in de verdere analyse. Op deze manier wordt de maximaal te verwachten erosie (in breedte van het duin) in de onderhoudsperioden bepaald.

In tabel 5.4 is de maximale verwachte erosie per sectie gepresenteerd. Deze getallen zijn de cumulatieve verwachte erosie (waarbij sedimentatie niet wordt meegenomen).

**Tabel 5.4. Verwachte maximale cumulatieve erosie (in m kustlijnverschuiving) voor verschillende onderhoudsvrije periodes**

periode	sectie							
	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS
1 jaar	- 1,0	- 0,3	- 0,6	- 3,5	- 0,2	- 0,5	- 0,6	- 1,2
5 jaar	- 2,1	- 0,9	- 1,9	- 9,5	- 1,0	- 1,2	- 1,0	- 2,0
10 jaar	- 2,9	- 1,6	- 3,2	- 11,8	- 1,8	- 1,4	- 1,8	- 2,0

De meeste erosie treedt dus op in sectie 3, sectie Oudeschild en sectie NIOZ.

### 5.3.5. Onzekerheid

In de gevolgde methodiek zit een aantal onzekerheden die een gevolg kunnen hebben op het langtransport. In deze paragraaf behandelen we deze onzekerheden en trekken we een conclusie met betrekking tot een veiligheidsrange ten aanzien van de resultaten.

#### Golven

In tabel 5.5 is een overzicht gegeven van de minimale, gemiddelde en maximale totale golfgedreven sedimenttransportcapaciteiten op basis van de jaarreeks van wind- en waterstandcondities. De getoonde resultaten zijn voor de verschillende raaien. Duidelijk te zien is de grote spreiding van de transportcapaciteiten.

**Tabel 5.5. Gevoeligheid sedimenttransportcapaciteiten per raai**

	NIOZ	2	3	4	5	6	7	8	OS
minimaal	0	- 4.933	- 6.123	- 7.829	- 6.277	- 6.916	- 7.042	- 8.230	- 11.502
gemiddeld	0	2.203	1.786	811	- 3.606	- 4.380	- 4.613	- 2.685	- 8.563
maximaal	0	14.714	15.154	14.283	- 564	- 1.340	- 2.253	5.587	- 6.590

Het blijkt dat de huidige kustoriëntatie dicht tegen de evenwichtsoriëntatie aan ligt. De evenwichtsoriëntatie is circa 140 - 150°, de huidige kustoriëntatie is circa 130°. Hierdoor zijn langstransporten erg gevoelig voor kleine veranderingen van gemiddelde golfrichting en golfhoogte. Dit blijkt ook uit de sedimenttransportcapaciteiten zoals is weergegeven in tabel 5.5.

Het blijkt dat gedurende de meetperiode (1981 - 2011) de windcondities systematisch in sterkte zijn afgenomen. Het lijkt erop dat de laatste jaren de windcondities milder zijn dan in de jaren 80. Dit effect is niet meegenomen in de analyse voor de langstransporten. In de analyse wordt uitgegaan van maximale erosie.

#### Waterstand

Zeespiegelstijging (0,30 m in 50 jaar) is niet meegenomen in de analyse. Verwacht mag worden dat een zeespiegelstijging als gevolg van klimaatverandering ook een absolute stijging van de waterspiegel tot gevolg zal hebben op het plateau. Immers is het niet te verwachten dat er sediment toevoer zal zijn vanuit de geul.

Een hogere waterstand zal leiden tot hogere golven in zowel de Waddenzee als op het plateau. Daarnaast is het te verwachten dat de hoek van golfval veranderen. Gezien de relatief kleine transporten en de grote jaarlijkse schommelingen, is te verwachten dat de effec-

ten van een zeespiegelstijging zich over het gebied zullen spreiden. Een snelle vergelijking op basis van de resultaten laten dit ook zien.

### **Stroming**

Stroming over het plateau is niet meegenomen in de beschouwing. Zoals is beschreven in paragraaf 5.2 is deze stroming klein en nabij de kust zelfs gering. De verwachte stroming is netto getij-gemiddeld en dus niet continue aanwezig.

Verwacht mag worden dat deze stroming alleen een mogelijk effect zal hebben nabij de randen van het gebied. Hier zou de stroming tot gevolg kunnen hebben dat sediment over de randen uit het systeem wordt getransporteerd.

Dit is nu meegenomen als een netto verlies van 50% van het noordwaartse transport. Gezien de vorm van de transportcapaciteitkromme (afbeelding 5.5 en 5.6) lijkt dit een overschatting. Dit lijkt ook te worden onderschreven door de lange termijn ontwikkeling op basis van de vaklodingen (afbeelding 5.3) die een stabiele kust bij Oudeschild laten zien.

### **Kustontwikkeling**

Bij het bepalen van de kustontwikkeling wordt mogelijke kustaanwas (sedimentatie) niet meegenomen in de analyse. Er is wordt dus uitgegaan van uitsluitend netto kusterosie. Dit is een conservatieve aanpak, zeker gezien de grote jaarlijkse fluctuaties in transportcapaciteiten zoals in tabel 5.5 te zien is.

### **Korrelgrootte**

Het huidige materiaal is fijn siltige klei. Voorgesteld is om het duin te creëren met materiaal met een  $D_{50}$  van 300  $\mu\text{m}$ . Bij kleinere korrelgroottes is het aannemelijk dat sedimenttransporten toenemen.

De kwantitatieve analyse laat een conservatievere kustontwikkeling zien dan op basis van de historische analyse kan worden verwacht. Het is dan ook aannemelijk dat de sedimenttransporten zoals berekend zijn in de kwantitatieve analyse op basis van een  $D_{50}$  van 300  $\mu\text{m}$  conservatief zijn.

### **Kustvorm**

Voorgesteld is om op de plateaurand aan de zuidzijde (bij NIOZ) een ondiepe berm aan te leggen. In de kwantitatieve analyse is hiermee geen rekening gehouden. Het gevolg van de ondiepe berm is waarschijnlijk dat golven lager zullen worden nabij de duin. Het golfgedreven transport wordt dan ook kleiner.

### **Eolisch transport**

Eolisch transport is in de analyse niet meegenomen. Onbeschermde zand boven de waterlijn in het duin kan door eolisch transport uit het systeem verdwijnen. Korrels worden door zuiden- en oostenwind landwaarts getransporteerd en verdwijnen dan in de Prins Hendrikpolder. Door noorden- en westenwind wordt sediment zeewaarts getransporteerd, er is dan weinig golfgedreven transport te verwachten waardoor het aannemelijk is dat sediment in de geul verdwijnt.

Verwacht mag worden dat het eolisch transport gering is door de aanplant van helmgras op het duin.

### **Poldergemaal**

De invloed van het gemaal is niet meegenomen in de kwantitatieve analyse. Verwacht kan worden dat tijdens spuien een stroming wordt gecreëerd die sediment weg zou kunnen



spoelen richting de Texelstroom. Een duidelijke erosietrend in de vorm van een geul ter hoogte van het gemaal mag dan in de huidige situatie worden verwacht. Deze is echter niet zichtbaar. Het lijkt dan ook aannemelijk dat de erosieve werking van het gemaal gering is.

### **Dwarstransport**

Golfcondities zijn gering en het is te verwachten dat golven breken op korte afstand van het aan te leggen duin. Dwarstransport vindt plaats in de brekerzone. De brekerzone bevindt zich volledig op het plateau. Dwarstransport van sediment richting de rand van het plateau is dan ook niet te verwachten.

### **Conclusie**

Gezien het voorgaande mag worden verwacht dat de langstransporten zoals berekend zijn in paragraaf 5.3 realistisch zijn.

## **5.3.6. Vergelijking resultaten met historische ontwikkeling**

De historische analyse heeft aangetoond dat het middendeel een langzame kustachteruitgang laat zien. Dit blijkt ook uit de kwantitatieve sedimenttransportanalyse. Rond sectie 3 lijkt het erop dat gemiddeld de kustlijn achteruit gaat. Er is een grote jaarlijkse spreiding van de erosiesnelheid.

De overige secties laten ook een gemiddelde achteruitgang zien. De verschillen per jaar zijn hier echter kleiner en de gemiddelde achteruitgang is met enkele decimeters (horizontaal) per jaar klein. De historische analyse laat een vergelijkbare erosiesnelheid zien (0,5 m vertikaal in 18 jaar komt overeen met circa 0,5 m horizontaal per jaar).

Rond de uiteinden laat de historische analyse een stabiele kust zien. De transportberekeningen wijzen echter op kustachteruitgang aan de noordrand. Bij Oudeschild zou dit verklaard kunnen worden doordat we in de transportberekeningen uitgaan van verlies van sediment.

Aan de zuidkant bij het NIOZ verwachten we op basis van de transportberekeningen een kleine kustaanwas. Hier worden geen verliezen meegenomen in de berekening. We concluderen daarom dat er aan de zuidkant een verlies zou kunnen optreden.

Gemiddeld lijken de berekende resultaten redelijk goed overeen te komen met de historische analyse. Er is echter geen kalibratie gedaan van de modellen. Tevens wordt er in de nieuwe situatie een ander materiaal ( $D_{50}$  van 300  $\mu\text{m}$ ) aangebracht dan dat er op dit moment aanwezig is (siltige klei). Een veiligheidsfactor is daarom aan te bevelen.

We adviseren een veiligheidsfactor 2 te gebruiken op de verwachte kustontwikkeling en een minimale laagdikte aan te houden van 1,0 m (vertikaal). Op deze manier wordt een egaal duinprofiel gecreëerd met voldoende veiligheid.

## **5.4. Onderhoudsbehoefte**

### **5.4.1. Verwachte maximale onderhoudsbehoefte**

Op basis van de verwachte maximale erosie (tabel 5.4) is de onderhoudsbehoefte bepaald. Wij adviseren om de onderhoudsbehoefte zoals volgt uit tabel 5.5 met een factor 2 te vergroten. In tabel 5.6 zijn de te verwachte onderhoudsbehoeften gepresenteerd voor een onderhoudsperiode van 10 jaar. De slijtlaag wordt initieel over het gehele profiel aangebracht.

Aanvankelijk werd voorgesteld een onderhoudsperiode van 5 jaar te nemen. Echter blijkt dat de verwachte erosie per 5 jaar weinig verschilt van de verwachte erosie per 10 jaar (zie tabel 5.4). Vanwege efficiency is er dan ook voor gekozen om de onderhoudstermijn op te rekken naar 10 jaar.

**Tabel 5.6 Verwachte onderhoudsbehoefte voor een onderhoudsperiode van 10 jaar**

sectie	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS	totaal
verwachte max. erosie (m)	- 2,9	- ,6	- ,2	- 1,8	- ,8	- ,4	- ,8	- 6,0	
slijtlaagdikte (m)	6,0	3,0	6,5	23,5	3,5	3,0	3,5	32,0	
breedte sectie (m)	250	532	488	542	493	465	646	250	
hoogte duinprofiel (m)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	
hoeveelheid (m <sup>3</sup> )	14.250	15.162	30.134	121.002	16.392	13.253	21.480	76.000	307.672

De totale onderhoudsbehoefte voor een periode van 10 jaar is maximaal circa 310.000 m<sup>3</sup>.

Initieel zullen de volumes uit tabel 5.6 bij aanleg moeten worden aangebracht om te zorgen voor een minimale veiligheid gedurende een onderhoudsvrije periode van 10 jaar na aanleg. Om te zorgen dat het duin initieel voldoende 'body' heeft, wordt uitgegaan van een minimale dikte bij aanleg. Deze buffer zou een minimale laag dikte van 1 meter over het hele profiel moeten garanderen. De initieel aan te brengen volumes en extra duinbreedtes zijn gepresenteerd in tabel 5.7.

**Tabel 5.7. Verwachte onderhoudsbehoefte voor een onderhoudsperiode van 10 jaar**

	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS	totaal
10 jaar (m <sup>3</sup> )	14.250	15.162	30.134	121.002	16.392	13.253	21.480	76.000	307.672
minimaal volume (m <sup>3</sup> )	37.500	79.800	73.200	81.300	73.950	69.750	96.900	37.500	
extra aan te brengen (m <sup>3</sup> )	23.250	64.638	43.066	0	57.558	56.498	75.421	0	320.430
extra breedte duin (m)	9,8	12,8	9,3	0,0	12,3	12,8	12,3	0,0	
totaal aan te brengen (m <sup>3</sup> )	37.500	79.800	73.200	121.002	73.950	69.750	96.900	76.000	628.102
totale kruinbreedte initieel	15,8	15,8	15,8	23,5	15,8	15,8	15,8	32,0	

Het totale volume dat initieel aangebracht wordt ten behoeve van de slijtlaag is bij aanleg 630.000 m<sup>3</sup>. Voor onderhoud dient vervolgens elke 10 jaar maximaal circa 310.000 m<sup>3</sup> te worden aangebracht.

Voor de ontwerppperiode van 50 jaar is het totale volume te suppleren zand voor instandhouding van de slijtlaag circa 1,9 miljoen m<sup>3</sup>. Dit volume bestaat uit het initiële volume en viermaal een 10-jaarlijkse onderhoudssuppletie. Het suppletievolume ten aanzien van onderhoud kan om de volgende redenen als conservatief worden beschouwd:

- voor het bepalen van de golfcondities is uit een langere tijdreeks een periode van 10 jaar geselecteerd met de zwaarste erosiecondities voor elke sectie. Naar verwachting zullen er in de ontwerppperiode daarom overwegend lichtere condities voorkomen en zal derhalve minder erosie optreden;
- mogelijk verdwijnt (een gedeelte van) het geërodeerde volume niet uit het systeem en kan het (10-jaarlijkse) onderhoud volstaan met het herprofilen van zand. Met andere woorden: verzetten van zand van locaties waar aanzanding heeft plaatsgevonden naar locaties waar erosie heeft opgetreden;

- kustaanwas is niet meegenomen in de analyse. In werkelijkheid zullen er gebieden zijn waar kusterosie optreedt en gebieden met kustaanwas. In de (10-jaarlijkse) onderhoudsbehoefte alleen op locaties gesuppleerd te worden waar erosie is opgetreden.

#### 5.4.2. Bandbreedte onderhoudsbehoefte

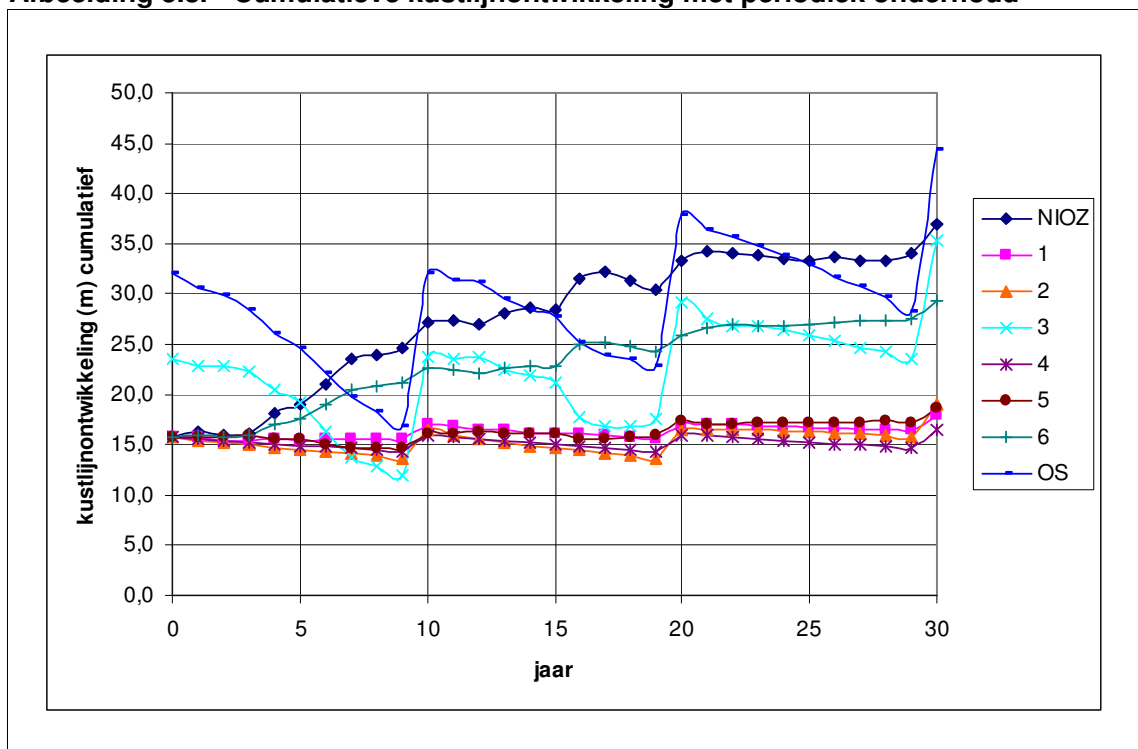
In deze paragraaf wordt de bandbreedte van de onderhoudsbehoefte in kaart gebracht. In het kort zullen we ingaan op de volgende aspecten:

- suppletiebehoefte bij het voorgestelde onderhoud;
- minimale onderhoudsbehoefte;
- maximale onderhoudsbehoefte;
- effect van transport over de randen;
- effect van onderhoudsperiode.

#### Kustontwikkeling bij het voorgestelde onderhoud

In afbeelding 5.8 is de verwachte kustlijnontwikkeling weergegeven voor een periode van 30 jaar (op basis van de tijdreeks). Duidelijk te zien zijn de suppleties om de 10 jaar. Goed te zien is ook de netto vooruitgang van de kust doordat er eigenlijk te veel wordt gesuppleerd. De 10-jaarlijkse onderhoudsbehoefte is 320.000 m<sup>3</sup>.

**Afbeelding 5.8. Cumulatieve kustlijnontwikkeling met periodiek onderhoud**



#### Minimale onderhoudsbehoefte

In de analyse wordt ervan uitgegaan dat er aan de noordrand 50 % verlies van sediment optreedt. De historische analyse laat zien dat de kustlijn hier stabiel is. Bij het vaststellen van de minimale onderhoudsbehoefte is er van uitgegaan dat er geen verlies over de randen plaatsvindt en dat de jaarlijkse teruggang op basis van gemiddelde erosie plaatsvindt (in plaats van maximale erosie over 10 jaar).

In tabellen 5.8 en 5.9 is uitgegaan dat er van geen verlies over de randen optreedt.

In afbeelding 5.9 is goed te zien dat aan de randen (de secties bij Oudeschild en NIOZ) de kustlijn zich verder zeewaarts ontwikkelt. Voor sectie 3 lijkt deze aanpak echter niet voldoende, hier is duidelijk te zien dat de slijtlaag hier vrijwel volledig wordt gebruikt.

De onderhoudsbehoefte zou minimaal circa 130.000 m<sup>3</sup> per 10 jaar zijn.

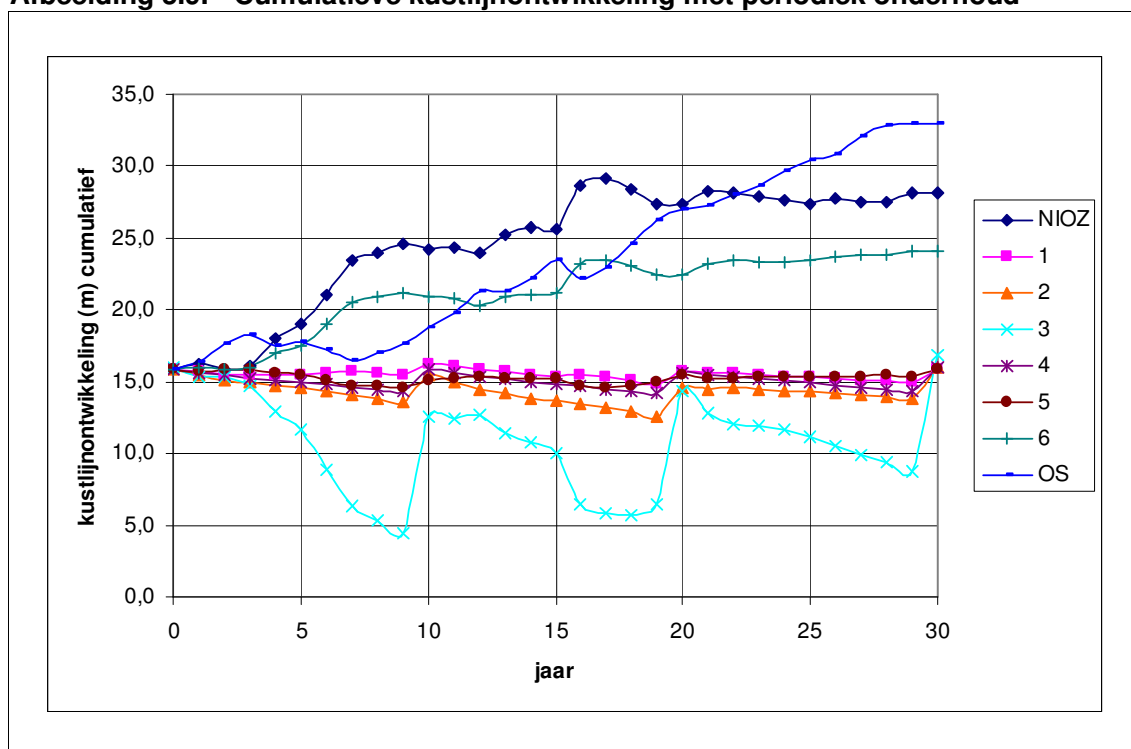
**Tabel 5.8. Verwachte minimale onderhoudsbehoefte voor een onderhoudsperiode van 10 jaar**

sectie	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS	totaal
verwachte gem. erosie (m)	0,0	- 0,9	- 2,2	- 8,1	- 1,7	- 0,4	0,0	0,0	
slijtlaag (m)	0,0	1,5	4,5	16,0	3,5	1,0	0,0	0,0	
breedte sectie (m)	250	532	488	542	493	465	646	250	
hoogte duinprofiel (m)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	
hoeveelheid (m3)	0	7.581	20.862	82.384	16.392	4.418	0	0	131.637

**Tabel 5.9. Verwachte minimale initiële zandbehoefte voor een onderhoudsperiode van 10 jaar**

sectie	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS	totaal
hoeveelheid (m3)	0	7.581	20.862	82.384	16.392	4.418	0	0	131.637
minimaal volume	37.500	79.800	73.200	81.300	73.950	69.750	96.900	37.500	
extra aan te brengen	37.500	72.219	52.338	0	57.558	65.333	96.900	37.500	419.347
extra breedte duin	15,8	14,3	11,3	0,0	12,3	14,8	15,8	15,8	
totaal aan te brengen	37.500	79.800	73.200	82.384	73.950	69.750	96.900	37.500	550.984
totaal initiële kruinbreedte (m)	15,8	15,8	15,8	16,0	15,8	15,8	15,8	15,8	

**Afbeelding 5.9. Cumulatieve kustlijnontwikkeling met periodiek onderhoud**



In afbeelding 5.9 is te zien dat sectie 2 en 3 onder de minimale breedte van 15 m komen.

### Maximale onderhoudsbehoefte

Vervolgens laten we nog zien wat de kustlijnontwikkeling zou zijn als we uitgaan van 100% verlies aan de randen, zowel aan de noordrand (Oudeschild) als aan de zuidrand (NIOZ). We gaan hier tevens uit van een veiligheidsfactor 3 ten aanzien van de berekende verwachte maximale erosie. Goed te zien is ook nu de relatief grote suppleties bij Oudeschild en het NIOZ.

De maximale onderhoudsbehoefte zou circa 760.000 m<sup>3</sup> per 10 jaar zijn als al het sediment over de randen verdwijnt en een veiligheidsfactor van 3 wordt gebruikt met betrekking tot de verwachte maximale erosie. Het gaat hier dan ook om een 'worst-case' die niet bevestigd wordt door historische gegevens.

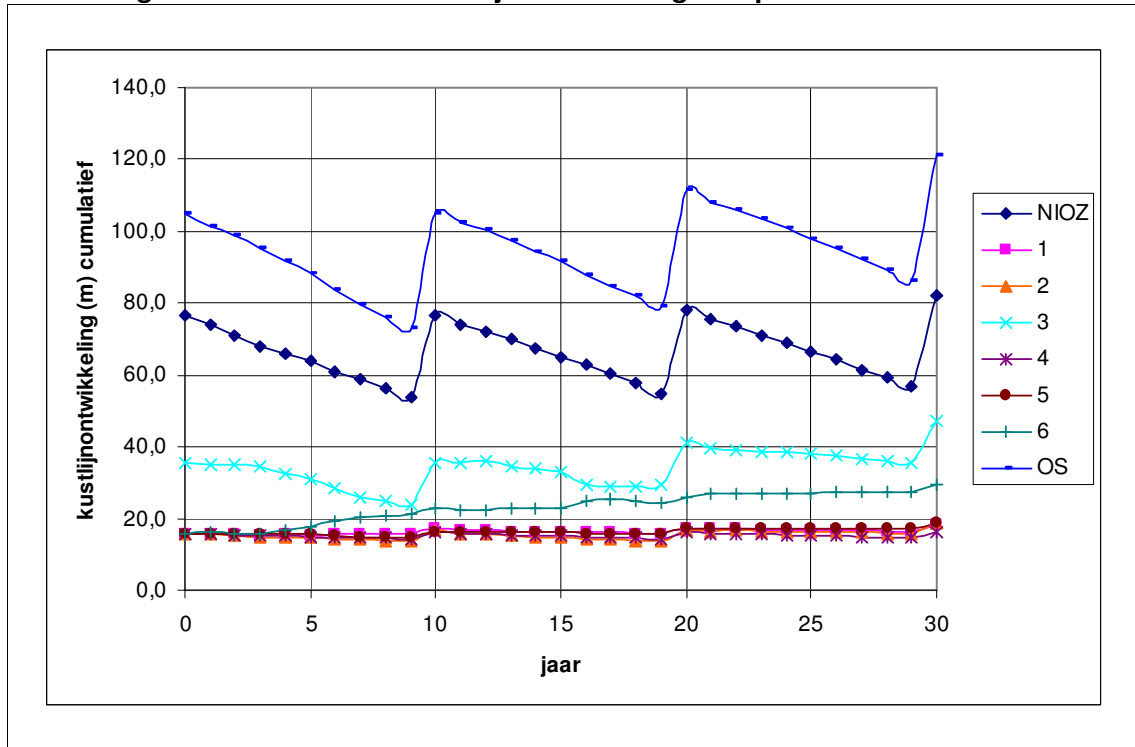
**Tabel 5.10. Verwachte maximale onderhoudsbehoefte voor een onderhoudsperiode van 10 jaar**

sectie	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS	totaal
verwachte max. erosie (m)	- 25,4	- 1,6	- 3,2	- 11,8	- 1,8	- 1,4	- 1,8	- 35,0	
slijtlaag (m)	76,5	4,5	9,5	35,5	5,5	4,0	5,5	105,0	
breedte sectie (m)	250	532	488	542	493	465	646	250	
hoogte duinprofiel (m)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	
hoeveelheid (m3)	181.688	22.743	44.042	182.790	25.759	17.670	33.754	249.375	757.820

**Tabel 5.11. Verwachte maximale initiële zandbehoefte voor een onderhoudsperiode van 10 jaar**

sectie	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS	totaal
hoeveelheid (m3)	181.688	22.743	44.042	182.790	25.759	17.670	33.754	249.375	757.820
minimaal volume	37.500	79.800	73.200	81.300	73.950	69.750	96.900	37.500	
extra aan te brengen	0	57.057	29.158	0	48.191	52.080	63.147	0	249.632
extra breedte duin	0,0	11,3	6,3	0,0	10,3	11,8	10,3	0,0	
totaal aan te brengen	181.688	79.800	73.200	182.790	73.950	69.750	96.900	249.375	1.007.452
totaal initiële kruinbreedte (m)	76,5	15,8	15,8	35,5	15,8	15,8	15,8	105,0	

**Afbeelding 5.10. Cumulatieve kustlijnontwikkeling met periodiek onderhoud**



**Conclusie en samenvattende tabel**

In tabel 5.12 is de bandbreedte ten aanzien van de totale onderhoudsbehoefte aangegeven. Goed te zien is het grote verschil tussen de minimale behoefte en maximale behoefte.

**Tabel 5.12. Bandbreedte totale onderhoudsbehoefte in 50 jaar**

	voorgesteld	minimaal	maximaal
initieel			
onderhoudslaag	307.672	131.637	757.820
extra basis veiligheid	320.430	419.347	249.632
totaal initieel	628.102	550.984	1.007.452
onderhoud			
per 10 jaar	307.672	131.637	757.820
totaal onderhoud (3)	923.016	394.911	2.273.459
totaal volume in 50 jaar	1.551.118	945.895	3.280.911

In afbeeldingen 5.8, 5.9 en 5.10 is goed te zien hoe de kustlijnontwikkeling van de secties ten opzichte van elkaar verwacht mag worden. Duidelijk zichtbaar is het grote verschil bij de randen ten opzichte van de rest van de kustlijn. Opgemerkt moet worden dat de maximale onderhoudsbehoefte een extreme ‘worst-case’ is die niet wordt ondersteund door historische data. Verwacht mag worden dat de voorgestelde hoeveelheden dan ook realistisch zijn.

## **6. GEMAAL PRINS HENDRIKPOLDER**

Het gemaal Prins Hendrikpolder en haar uitstroomconstructie dienen te worden ingepast in de zandige oplossing. Het gemaal dient te allen tijde het water uit de Prins Hendrikpolder in de Waddenzee te kunnen lozen. Het belangrijkste bij de inpassing is de locatie van de uitstroomconstructie en het tracé van de leiding door het zandige duin daar naartoe. De uitstroomconstructie en leiding mogen niet bezwijken door hydraulische belasting of ten gevolge van erosie. Daarnaast mag de uitstroomconstructie niet verzanden; met name tijdens een storm wordt zand uit het duin richting de geul verplaatst hetgeen verzanding van de uitstroomopening tot gevolg kan hebben. Tenslotte dient in de leiding, daar waar het door het duin wordt gevoerd, een afsluiting te komen die als bijzonder waterkerende constructie beschouwd dient te worden, en derhalve onder maatgevende condities voldoende sterk, stabiel en betrouwbaar dient te zijn. Bovengenoemde aspecten hebben invloed op de keuze voor de ligging van leidingtracé en uitstroomconstructie.

In deze paragraaf wordt een uitwerking van de inpassing van het gemaal gegeven.

### **6.1. Uitgangspunten**

In de uitwerking van de zandige oplossing worden het gemaal en de waterleiding ingepast. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten van toepassing:

- indicatie van nieuwe uitstroomlocatie van het gemaal op locatie zoals aangegeven in [ref. 2.] (zie bijlage I);
- het oppervlaktewater van de Prins Hendrikpolder wordt op dezelfde locatie door de dijk gevoerd, dat wil zeggen op de locatie van het huidige Prins Hendrikgemaal.

### **6.2. Beschrijving huidige gemaal**

Gemaal Prins Hendrikpolder bevindt zich ter hoogte van dijkpaal 4,6 in de dijk van de Prins Hendrikpolder. Het gemaal behoort tot de kunstwerken in categorie II, constructies die in combinatie met een grondconstructie de waterkerende functie moeten vervullen. De eigenlijke functie van het gemaal is het oppervlaktewater uit de Prins Hendrikpolder in de Waddenzee te lozen. In afbeelding 6.1 is de ligging van het huidige gemaal gegeven.

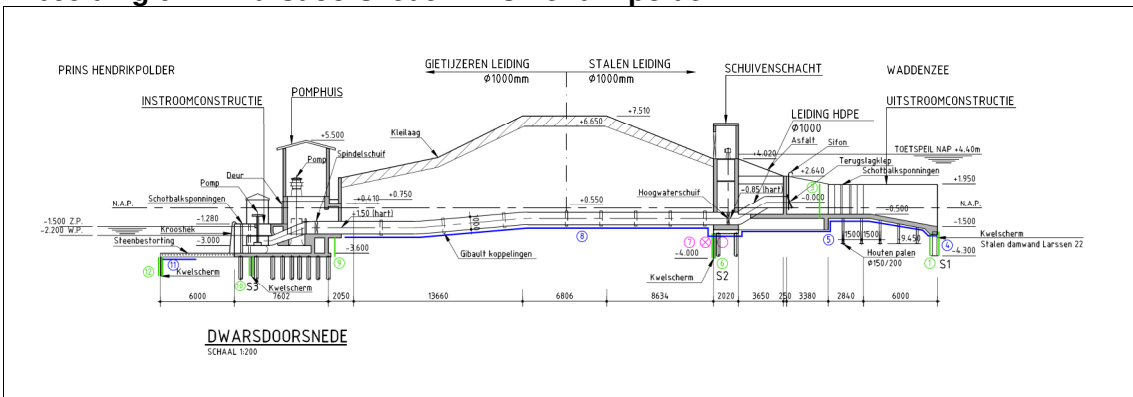
**Afbeelding 6.1. Ligging gemaal Prins Hendrikpolder**



Een nadere omschrijving van het Prins Hendrikgemaal is onder andere te vinden in [ref. 11.].

In afbeelding 6.2 is een dwarsdoorsnede van het gemaal te zien. Enkele karakteristieke kenmerken zijn gegeven in tabel 6.1.

**Afbeelding 6.2. Dwarsdoorsnede Prins Hendrikpolder**





**Tabel 6.1. Karakteristieken Prins Hendrikgemaal**

object	gegevens
opvoerwerktuig	pomp (2 stuks)
totale capaciteit	110 m <sup>3</sup> /min
oppervlakte polder	900 ha
diameter leiding	1 m
huidige uitstroomhoogte (leiding)	NAP - 0,5 m.

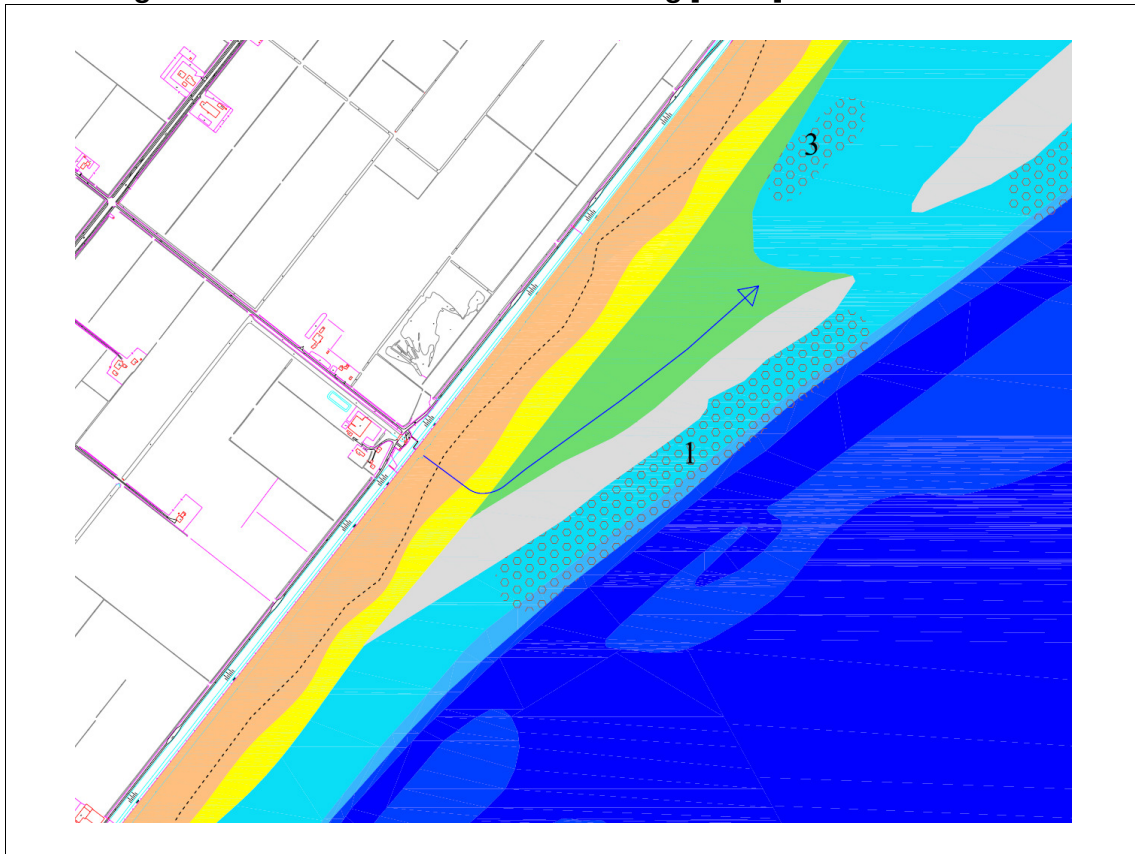
### 6.3. Omschrijving situatie zandige oplossing

In de zandige oplossing wordt een duin van circa 150 m breed aansluitend aan de huidige dijk en over de volle lengte gecreëerd.

Als uitgangspunt is gehanteerd dat in de toekomst het gemaal op deze locatie in de dijk wordt gehandhaafd. Andere oplossingen, zoals een oplossing waarin het water binnen de huidige dijk wordt omgeleid tot buiten de zandige oplossing (bijvoorbeeld via gemaal de Schans) worden niet beschouwd.

In afbeelding 6.3 is de indicatieve locatie gegeven van de uitstroomleiding vanaf het huidige Prins Hendrikgemaal. De leiding start bij het Prins Hendrikgemaal en eindigt aan het einde van de 'vloedhaak' (de vloedhaak is grijs gearceerd). Op deze manier wordt getracht het gebied te voeden met zoet water zodat een zoet-zout overgangsmilieu kan ontstaan. Het groene gebied in afbeelding 6.3 zijn schorren en slikken, dit wordt intergetijdengebied wat met hoogwater onderloopt en bij laag water grotendeels droogvalt. Het lichtblauwe gebied heeft een waterdiepte van 1 - 3 m. (vergelijkbaar met de huidige situatie).

**Afbeelding 6.3. Indicatieve locatie uitstroomleiding [ref. 2.]**



De waterkerende functie van de dijk wordt door de nieuwe duinenrij volledig overgenomen. De functie van het bestaande gemaal water te keren vervalt daarom. Dit is een cruciaal element van deze oplossing omdat de veiligheidsproblematiek rond het bestaande gemaal hiermee vervalt en het vraagstuk (noodzaak) van vervanging van het gemaal in een ander daglicht wordt geplaatst. De enige functie van het gemaal is derhalve het pompen van oppervlaktewater uit de Prins Hendrikpolder naar en van de Waddenzee. Wel dient ter plaatse van het duinmassief een afsluiting in de leiding te worden aangelegd. Deze constructie is een waterkerende constructie die aan alle eisen van veiligheid van een primaire waterkering dient te voldoen.

#### **6.4. Inpassing gemaal, leiding en uitstroomconstructie**

De waterkerende functie van de dijk wordt door de nieuwe duinenrij volledig overgenomen. De waterkerende functie van het gemaal vervalt hiermee. De functie die het gemaal dient te vervullen is het afvoeren van water uit de polder en om tijdens hoog water stromen van water naar binnen te voorkomen.

Om deze functies te blijven vervullen moeten een persleiding, afsluiters en een uitstroomconstructie in de zandige oplossing worden ingepast. In deze paragraaf worden daartoe de volgende onderdelen besproken:

- Prins Hendrikgemaal
- tracé leiding;
- vervangende waterkering;
- afsluiting;
- uitstroomconstructie.

Doel van deze paragraaf is enerzijds inzicht te geven in de haalbaarheid van de inpassing van het gemaal en anderzijds een inschatting te kunnen geven van de hoeveelheden. Op basis van deze hoeveelheden kan vervolgens een kosteninschatting gemaakt worden.

#### **6.4.1. Prins Hendrikgemaal**

Het huidige Prins Hendrikgemaal kent een aantal problemen:

- de capaciteit is te laag in relatie tot wateraanvoer. Dit probleem wordt mogelijk vergroot in de zandige oplossing omdat de leidingverlenging een grotere pompcapaciteit vraagt;
- de fundering, persleiding en uitstroomconstructie van het huidige gemaal zijn afgekeurd in de toetsing. Hierbij is er vanuit gegaan dat deze onderdeel uitmaken van de primaire waterkering. Derhalve geldt dit mogelijk niet voor de zandige oplossing;
- het gemaal is relatief oud en kent verschillende problemen. Naar verwachting zal het niet meerdere decennia haar functie (in de zandige oplossing) kunnen vervullen.

Vanuit de toetsing bestaat de noodzaak voor vervanging van het gemaal. Derhalve wordt in het kader van de MER een nieuw gemaal ontworpen. In beginsel kan in de uitwerking van de zandige oplossing worden volstaan met de aanname dat er sprake is van een gemaal op dezelfde locatie als het bestaande gemaal. Wanneer aan het nieuwe gemaal ten behoeve van de zandige oplossing een langere leiding wordt gekoppeld zullen er extra wrijvingsverliezen optreden. Uit verkennende berekeningen van het nieuwe gemaal met een verlengde uitstroomleiding volgt:

- het verhogen van opvoerhoogte geeft problemen wegens beschikbaarheid van pompen met hogere pompcapaciteit;
- wrijvingsverliezen die ontstaan door de langere leiding het beste kunnen worden gecompenseerd door het vergroten van de leiding waardoor de stroomsnelheid (minder stromingsweerstand) wordt verlaagd. De afmetingen van de leiding worden gesteld op 2 leidingen met een diameter van 1 m.

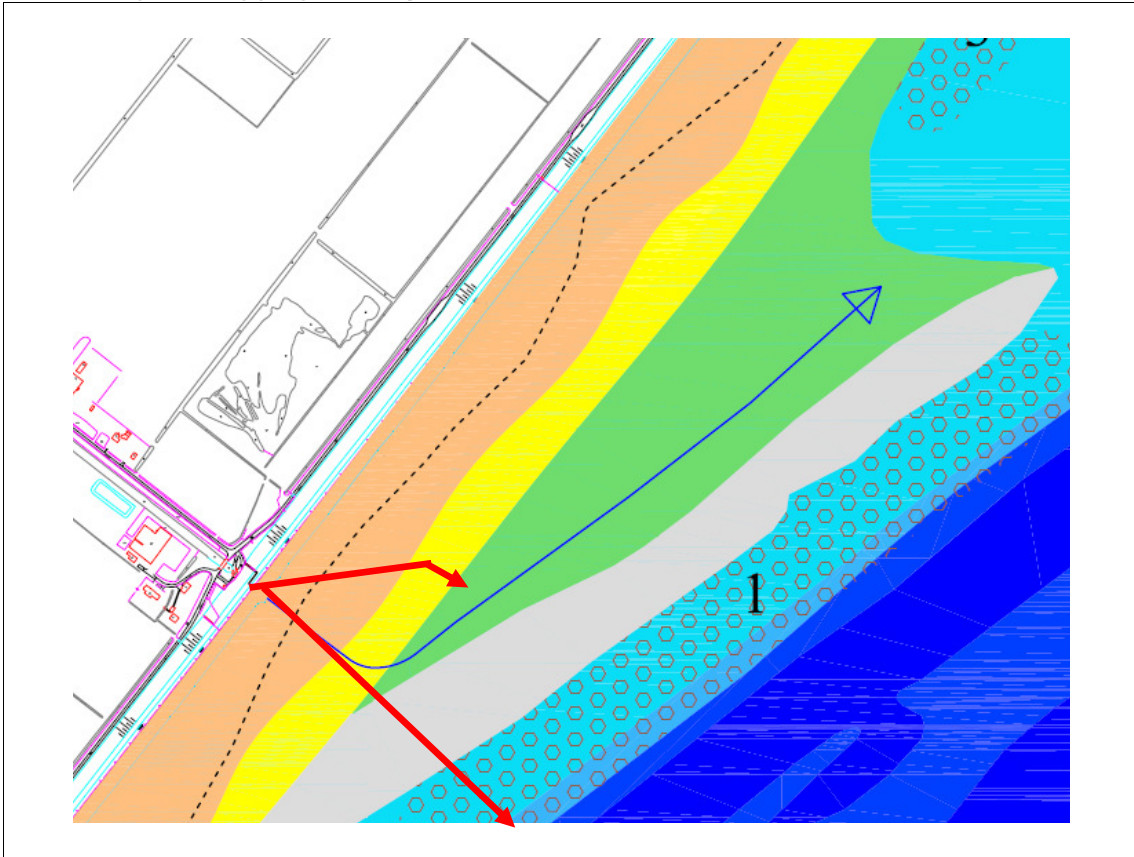
Als uitgangspunt wordt gehanteerd dat er 2 uitstroomleidingen zijn (aantal gelijk het nieuwe ontwerp van het Prins Hendrikgemaal binnen kader van de MER). Hier dienen dan ook het dubbele aantal afsluitmiddelen ingepast te worden.

#### **6.4.2. Tracé leiding**

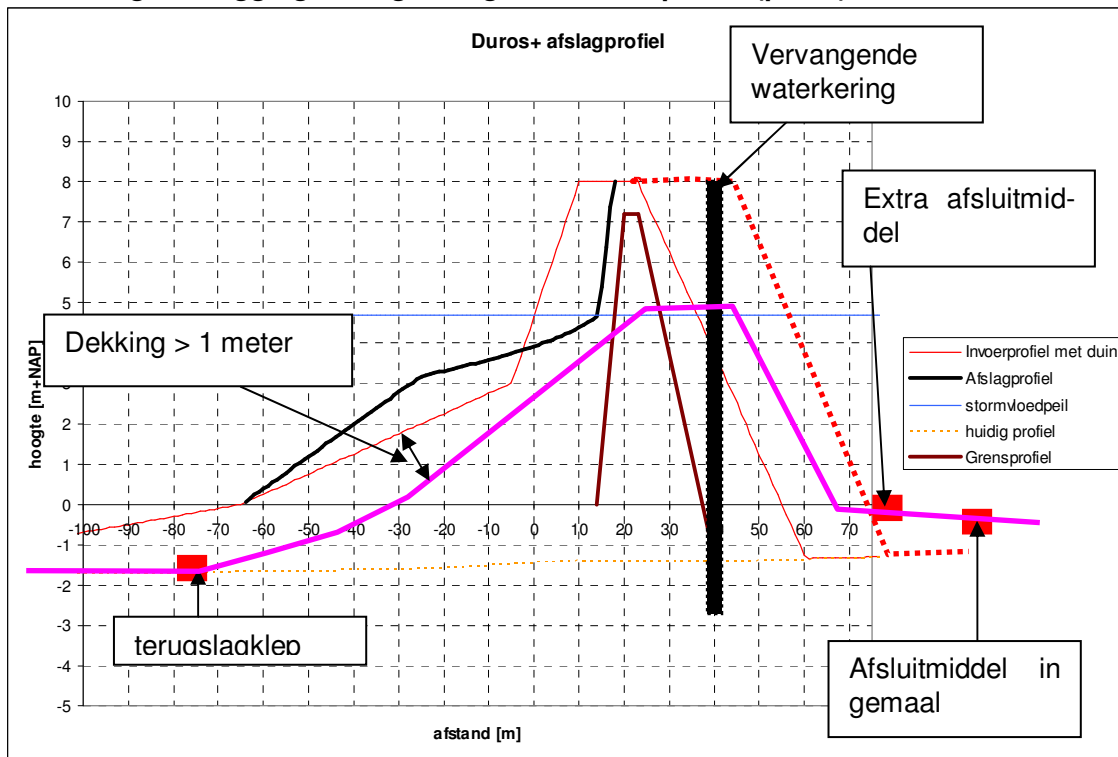
In afbeelding 6.4 zijn de twee leidingtracés en uittreepunten weergegeven (rode pijlen). Het leidingtracé dient zich minimaal 1 meter onder het afslagprofiel te bevinden (minimale dekking 1 m). Het grootste deel van de leidingen bevindt zich onder het duin en afslagprofiel en is daar beschermd tegen erosie en hydraulische belasting. De uitstroomconstructie wordt wel belast, deze wordt besproken in paragraaf 6.4.5.

Het uittreepunt tussen vloedhaak en duin is niet gelijkgesteld aan het uittreepunt als voorgesteld (blauwe pijl in afbeelding 6.4). Door het uittreepunt dicht bij het duin te leggen is er sprake van een korter tracé. De verticale ligging van de leiding is te zien in afbeelding 6.5. Aan de landzijde van het grensprofiel moet de leiding bij uitvoering als sleepzinker tot boven het maximale stormvloedpeil reiken [ref. 22.]. Dit wordt hier als uitgangspunt gehanteerd.

**Afbeelding 6.4. Ligging uittreepunten**



**Afbeelding 6.5. Ligging leiding naar geul in dwarsprofiel (paars)**



### 6.4.3. Vervangende waterkering

In feite is er sprake van een leiding door de waterkering, met achter de waterkering een gemaal. In deze situatie dient er een vervangende waterkering in de vorm van een onverankerde stalen damwand te worden aangebracht ter beperking van het risico bij lekkage of breuk van de leiding [ref. 22.]. De breedte van de vervangende waterkering dient volgens [ref. 22.] 25 m te bedragen. De hoogte van de damwand is circa 15 m. Aan weerszijden van de dam dient een minimale kruinbreedte van 3 m aanwezig te zijn. De locatie van de vervangende waterkering is gegeven in afbeelding 6.5 en op tekening in bijlage VI.

### 6.4.4. Afsluiting

Het gemaal Prins Hendrikpolder ligt in de primaire waterkering, de betrouwbaarheid van de hoogwatersluiting van de afsluitmiddelen dient te voldoen aan de 'Leidraad kunstwerken' [ref. 21.]. Afsluiters zijn nodig om de leiding te allen tijde drukloos te kunnen maken [ref. 22.]. Daarom dienen ze ook altijd bedienbaar te zijn.

In de leidraad kunstwerken worden de volgende eisen aan de afsluiting voor een type 2 gemaal-persleiding gesteld:

- 1 terugslagklep in buitenhoofd;
- 1 afsluiter in het gemaal: Gezien de lage kans op tegelijkertijd optreden van leidingbreuk en falen van het afsluitmiddel is een dubbele uitvoering niet nodig. Voor lozingswerken is een terugslagklep adequaat;
- als algemene eis geldt dat de afsluitmiddelen te allen tijde over land bereikbaar moeten zijn (en dus bedienbaar zijn);
- er is geen sprake van een vermaasd leidingnetwerk, er hoeft daarom niet aan weerszijden een bedienbare afsluiting dient te zijn [ref. 22.].

Daarnaast eist het hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier [ref. 19.] twee onafhankelijke afsluitmiddelen (waarbij de terugslagklep niet mee mag tellen) in serie te zetten. Vanuit deze eis dient dus 1 extra afsluiter geplaatst te worden. De onafhankelijkheid van de afsluitmiddelen wordt onder andere bepaald door hun positie in het kunstwerk. Als twee afsluitmiddelen vlak bij elkaar geplaatst worden, zijn ze bij falen niet als onafhankelijk te beschouwen, aangezien het falen van de sluiting van de voorste het sluiten van de tweede kan bemoeilijken. Wanneer de afsluiters op enige afstand van elkaar in serie worden geplaatst worden, is deze onafhankelijkheid gegarandeerd.

Op basis van bovenstaande zijn in het ontwerp de volgende afsluitmiddelen opgenomen. Deze afsluitmiddelen dienen in beide leidingen aanwezig te zijn, het totale aantal afsluiters is daarmee zes:

- terugslagklep in het hoofd. Deze is gepositioneerd aan de waterzijde van het grensprofiel. (alternatief is om deze bij de uitstroomopening te plaatsen);
- 1 afsluiter in het gemaal zelf. Deze is enige afstand landinwaarts gelegen (op de locatie van de binnenzijde huidige dijk). Deze is daarom altijd bereikbaar, ook tijdens hoog water;
- 1 (extra) afsluiter achter het grensprofiel.

Er is geen noodzaak afsluiters direct ter weerszijden van de veiligheidszone/grenszone te plaatsen. De afsluiters zijn bedoeld om de leiding in de kruising zo spoedig mogelijk drukloos te maken [ref. 22.].

Het duin is plaatselijk verbreed om aan de achterzijde van het grensprofiel voldoende ruimte te creëren voor de vervangende waterkering en de leiding die boven het stormvloedpeil reikt.

#### 6.4.5. Uitstroomconstructie

De uitstroomconstructie is het punt waar uitstroom uit de leiding in de Waddenzee plaatsvindt. De uitstroomconstructie heeft over het algemeen een aantal functies, te weten:

1. voorkomen van instabiliteit door ongewilde erosie veroorzaakt door:
  - de uitstroom;
  - 'grootschalige' erosie;
2. beschermen van uiteinde van de leiding tegen hydraulische belasting;
3. voorkomen van dichtslibben van de uitstroomopening.

Ad 1.

De uitstroom uit de leiding en golven kunnen lokaal erosie veroorzaken. Deze erosie kan geaccepteerd worden of op voldoende afstand van de constructie worden gehouden door het toepassen van een bodembescherming.

Belangrijker is het effect van 'grootschalige' erosie. Met 'grootschalige' erosie wordt erosie door de erosie- en sedimentatiepatronen bedoeld. Met name tijdens een storm kan hier significante erosie optreden. Door een juiste ligging van de uitstroomconstructie te kiezen kan het effect van deze erosie, ontgronding bij constructie, worden beperkt. Mogelijke oplossingen bij het plaatsen van de uitstroomconstructie in een erosiegevoelig gebied zijn het plaatsen van de constructie op een paalfundering of erosiewerende maatregelen (bijvoorbeeld plaatsen van breuksteen).

Ad 2.

Het uiteinde van de leiding bevindt zich boven de bodem en zal daarom belast worden door stroming en golven. De uitstroomconstructie beschermt het uiteinde van de leiding tegen hydraulische belasting. Een constructie van bijvoorbeeld beton of breuksteen dient het uiteinde te beschermen tegen deze belasting (uit te werken in latere fase).

Ad 3.

De uitstroomopening van de leiding mag niet dusdanig dichtslibben dat uitstroom niet meer mogelijk is. De uitstroom uit de leiding kan tijdens normale omstandigheden de uitstroomconstructie schoonspoelen. Dit is bijvoorbeeld ook het geval bij de uitstroomconstructie van het gemaal van Katwijk: hier verzandt de uitstroomconstructie geregeld, na enige tijd malen is de uitstroomconstructie vervolgens weer 'schoongespoeld'.

Tijdens stormcondities worden er grote hoeveelheden zand uit het duin richting de Waddenzee getransporteerd. Bij een verkeerde positionering van de uitstroomconstructie kan een deel van het afgeslagen zand voor de opening worden gedeponneerd en de uitstroom blokkeren. Het 'schoonspoelen' van de uitstroomconstructie is dan waarschijnlijk niet meer mogelijk.

Om uitstroom, ook na een storm, te waarborgen dient de uitstroomlocatie buiten het afslag/aanzandingsprofiel geplaatst te worden. Dit kan zowel in verticale als in horizontale zin. In verticale zin betekent dat de uitstroomlocatie relatief hoog moet zijn. In horizontale zin zal de uitstroomlocatie richting geul verplaatst moeten worden.

### **Locaties uitstroomconstructies**

Gezien de onzekerheden in morfologische ontwikkeling is de ligging van een uittreepunt tussen de vloedhaak en het duin (zie afbeelding 6.4) zeer onzeker. In het beoogd gebied kan zowel erosie als aanzanding zich voordoen, en bij het ontwerp van de constructie moet daarom met beide rekening worden gehouden. Daarom wordt voorgesteld om twee leidingen en twee uittreepunten te realiseren. De volgende twee uittreepunten worden voorgesteld (zie afbeelding 6.4):

- een uittreepunt in de Texelstroom. Deze verzorgt de afwatering wanneer het andere uittreepunt dichtslibt. Deze zorgt echter niet voor een zoetwaterinstroom tussen vloedhaak en duin;
- een uittreepunt op de natuurbouw, tussen de vloedhaak en het duin. Dit uittreepunt zorgt voor de zoetwateruitstroom in het gebied tussen vloedhaak en duin. Dit uittreepunt mag dichtslibben tijdens een storm.

Het hanteren van twee uittreepunten sluit aan op het nieuwe ontwerp van het gemaal in het kader van de MER waar tevens twee leidingen worden ingepast.

#### **Uitstroomconstructie 1 (in de Texelstroom)**

Het eerste uitstroompunt betreft de uitstroomlocatie in de Texelstroom. Deze komt uit op enige waterdiepte (NAP - 2,5 m). De belasting door golven is hier gering. Er is hier wel sprake van belasting door stroming.

De geulwand wordt hier beschermd om verdere uitsnijding van de Texelstroom te voorkomen. Belangrijk is dat de kokerleiding door de bestaande erosiebescherming steekt en hier op aan sluit. Aanvulling van de bescherming wordt in eerste instantie niet nodig geacht.

#### **Uitstroomconstructie 2 (op de natuurbouw)**

De tweede uitstroomlocatie is gelegen op de natuurbouw (zie afbeelding 8.4).

Zoals te zien in afbeelding 8.5 is de leiding voor een groot gedeelte onder de bodem gelegen. Waar de leiding weer boven het bodemoppervlak komt, dient de constructie voldoende beschermt te worden. Zoals in bijlage VI te zien, zal de leiding boven de zeebodem beschermd worden door breuksteen. Het breuksteen talud is ingegraven om te anticiperen voor lokale ontgronding. De uitstroomopening is 1 m. boven de verwachte bodemhoogte, zodat aanzanding/dichtslibbing van de opening wordt voorkomen.

## **6.5. Hoeveelheden**

In tabel 6.2 zijn de hoeveelheden gegeven voor de inpassing van het Prins Hendrikgemaal.

**Tabel 6.2. Hoeveelheden inpassing Prins Hendrikgemaal**

onderdeel	hoeveelheid	
stalen leiding Ø 1 m.	700	[m]
afsluiters		
terugslagklep	2	
afsluiter in gemaal, zonder aanvullende constructies (anders dan reeds aanwezig in het gemaal)	2	
extra afsluiter in grensprofiel, inclusief schuivenschacht met een hoogte van 5 m en toegangspad	2	
damwand - vervangende waterkering	375	m <sup>2</sup>
extra volume zand voor verbreding duin	10.000	m <sup>3</sup>
uitstroomconstructie, bescherming van koker met breuksteen	100	m <sup>3</sup>
prefab betonnen uitstroombak	2	

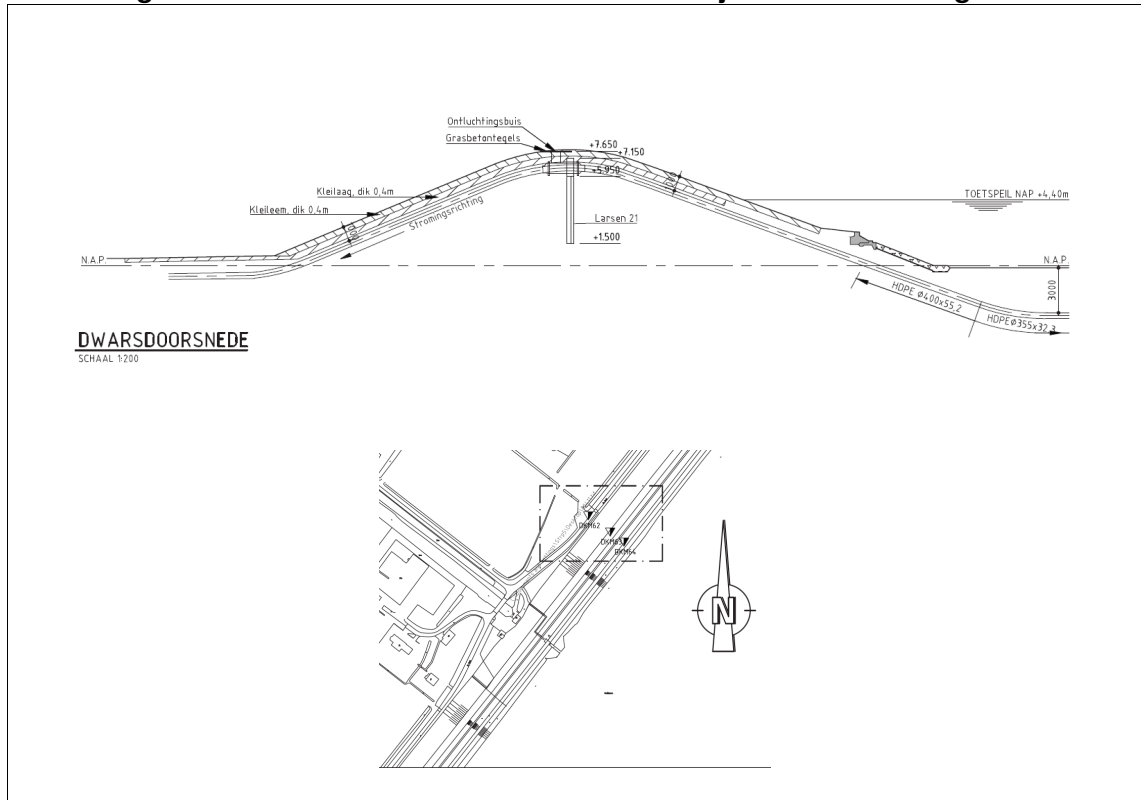
## 6.6. Waterleiding

In afbeelding 6.6 is de waterleiding (kunstwerk 115k) die net ten noorden van het Prins Hendrikgemaal aanland. Aan de waddenzeezijde van de dijk verdwijnt deze waterleiding > 3 meter onder NAP. De leiding ligt daarom ten allen buiten het 'afslagprofiel - 1 m' van de zandige oplossing. Daarnaast wordt er in de huidige situatie reeds voldaan aan de eis dat de leiding aan de landzijde van het grensprofiel moet reiken tot boven het maximale stormvloedpeil [ref. 22.].

Wel dient de waterleiding onder het duin versterkt te worden zodat deze voldoet aan de eisen die worden gesteld aan de sterkte van een leiding in een kruising met een waterkering.



**Afbeelding 6.6. Dwarsdoorsnede en bovenaanzicht dijk met waterleiding**





## **7. AANSLUITING NOORD EN ZUIDZIJDE**

De zandige oplossing zal in langsrchting op de huidige primaire waterkering worden aangesloten. In deze paragraaf wordt een globale uitwerking van de aansluiting aan de zuid- en de noordzijde van de zandige oplossing op de dijk gegeven.

De zandige oplossing neemt de functie van primaire waterkering over van de dijk. Het is van belang de locatie vast te stellen waar het duin de functie van primaire waterkering overneemt van de dijk. De dijk moet tot dit punt voldoen als primaire waterkering: voor de zuidelijke overgang betekent dat de dijk tot dat punt versterkt dient te worden. Waar het duin de functie van primaire waterkering heeft overgenomen is de sterkte van de dijk niet meer van belang.

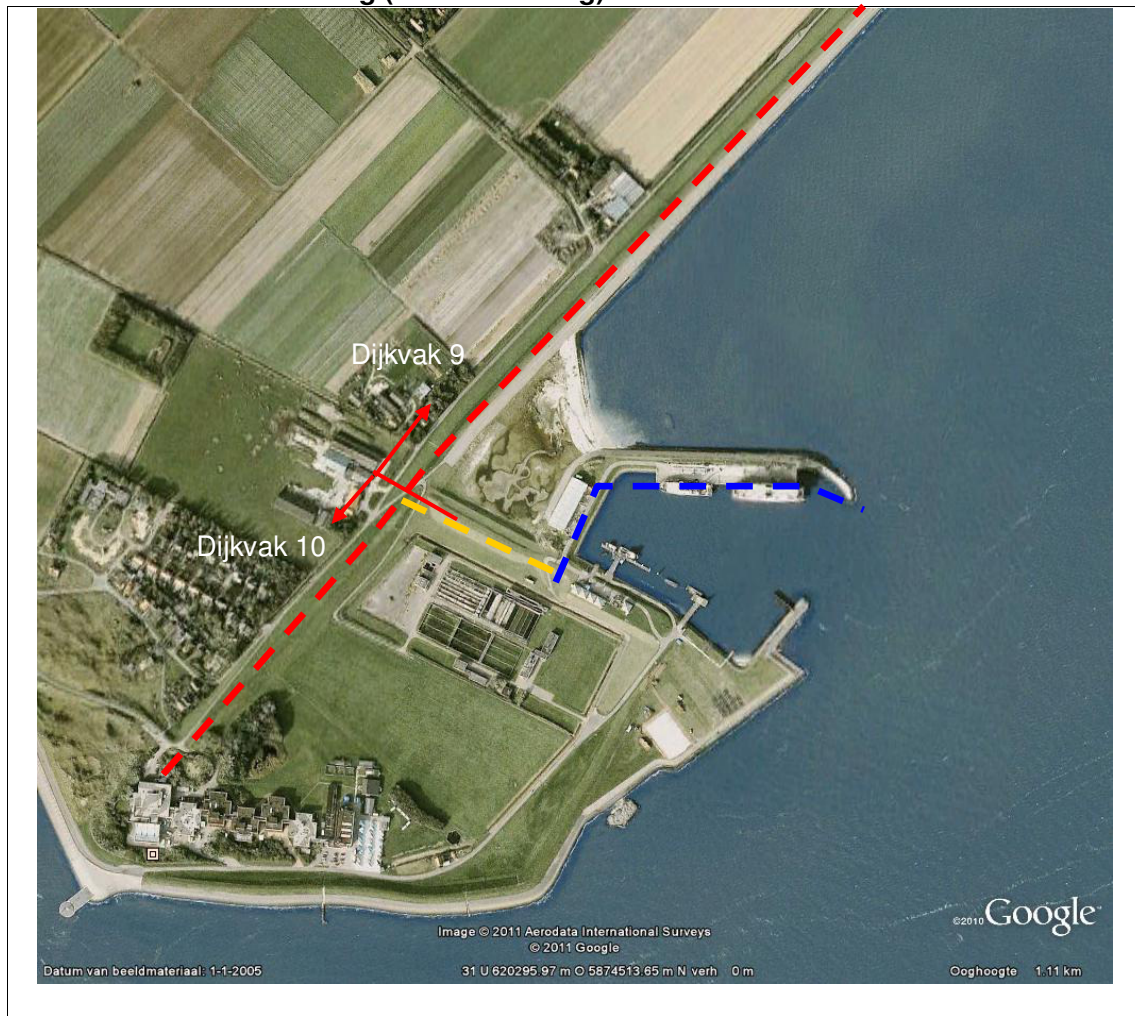
### **7.1. Aansluiting zuidzijde - NIOZ haven**

#### **7.1.1. Huidige situatie**

In afbeelding 7.1 is het bovenaanzicht ter plaatse van dijkvak 9 en dijkvak 10 gegeven. De rode stippellijn geeft de locatie van de huidige primaire waterkering weer. Dijkvak 10 is de inlaagdijk 't Horntje en dijkvak 9 is de zeedijk van de Prins Hendrikpolder. Beide dijkvakken zijn over het gehele traject grasdijken. Voor de inlaagdijk 't Horntje ligt de oude waterkering (voorlandkering). De voorlandkering is een schaaldijk (gele stippellijn in afbeelding 7.1) langs de Texelstroom en maakt formeel geen deel uit van de primaire waterkering.

Voor het meest zuidelijke gedeelte van de zeedijk (dijkvak 9E) ligt de NIOZ haven. De kruinhoogte van de noordelijke havendam van de haven (blauw gestippelde lijn in de afbeelding) verloopt van NAP + 3,65 m aan de zuidzijde tot NAP + 2,0 m aan de westzijde. Tussen de dijk en de NIOZ-haven bevindt zich een schorretje: een relatief ondiep gedeelte wat naar alle waarschijnlijk is ontstaan door dat het gebied golf- en stromingsluw is.

**Afbeelding 7.1. Huidige locatie NIOZ haven (in rood, de huidige primaire waterkering, in blauw de havendam van de NIOZ haven en in oranje de oude waterkering (voorlandkering)**



### 7.1.2. Aansluiting NIOZ haven in zandige oplossing

#### Aansluiting op de dijk

In afbeelding 7.2 is de indicatieve ligging van het duin in de aansluiting aangegeven [ref. 2.]. Hier loopt de zandige kering door tot de voorlandkering (oude waterkering voor dijkvak 10). Het doorzetten van het duin in langsrichting tot aan de voorlandkering is een logische keuze. Verder doorzetten in dijkvak 10 geeft conflicten met bebouwing en het korter doorzetten betekent dat de harde zeewering over een langer traject dient te worden versterkt.

Het duin zal hoger worden dan de havendam en de voorlandkering (gelegen op NAP + 4,5 m). Om dit hoogteverschil te overbruggen zal het duin onder een flauw talud aansluiten op havendam en voorlandkering.

In een veel voorkomende overgangsconstructie van een duin naar een dijk is vaak sprake van zandonthouding voor de harde constructie. Dit onthouden zandvolume moet dan worden gecompenseerd met zand uit het zachte profiel. De voorlanddijk belet echter zandtransport richting het zuiden (voor een groot gedeelte) en van een onthouden zandvolume

is daarom geen sprake. Hierdoor is er geen extra zandafslag en is de aansluitingszone relatief kort (ten opzichte van een algemeen/ meer voorkomende duin-dijk overgang).

Om een veilige aansluiting te creëren moet de dijk voldoende ver doorlopen achter het duin. (zie rode stippellijn afbeelding 7.2). Dit betekent dat de dijk over dit traject verbeterd zal moeten worden conform het versterkingsplan. De lengte van het overlappende deel hangt af van:

- de lengte van het talud (tussen duin en voorlandkering);
- het onthouden zandvolume, in deze situatie niet van toepassing: er wordt geen/ zeer weinig zand 'onthouden';
- de lengte waarover mogelijk erosie door langtransport plaatsvindt: erosie door langtransport tijdens een ontwerpstorm is echter relatief klein is (zie hoofdstuk 7);
- de lengte van het basisprofiel in de dwarsrichting. De afslag die loodrecht op de dijk plaatsvindt, kan bij de aansluiting mogelijk ook in lengterichting plaatsvinden (men zou vanaf het punt waar de dijk als primaire waterkering ophoudt een straal kunnen trekken). De breedte van het duin op NAP + 4,5 m (hoogte van de kruin van de voorlandkering) is circa 50 m.

De zone waarin deze processen van extra zandvraag en -aanbod zich afspelen wordt de aansluitingszone genoemd, De aansluitingszone (of overlapping) strekt zich in het algemeen uit over een afstand van 100 tot 200 m aan weerszijden van de aansluiting.

In deze situatie kan deze overlapping relatief kort zijn, circa 50 - 75 m. Deze wordt met name bepaald door de lengte van het talud en het benodigde basisvolume.

Daarnaast zal het duin daadwerkelijk aansluiten op de dijk. Er mag ter hoogte van de aansluiting geen opening ontstaan tussen het duin en de dijk.

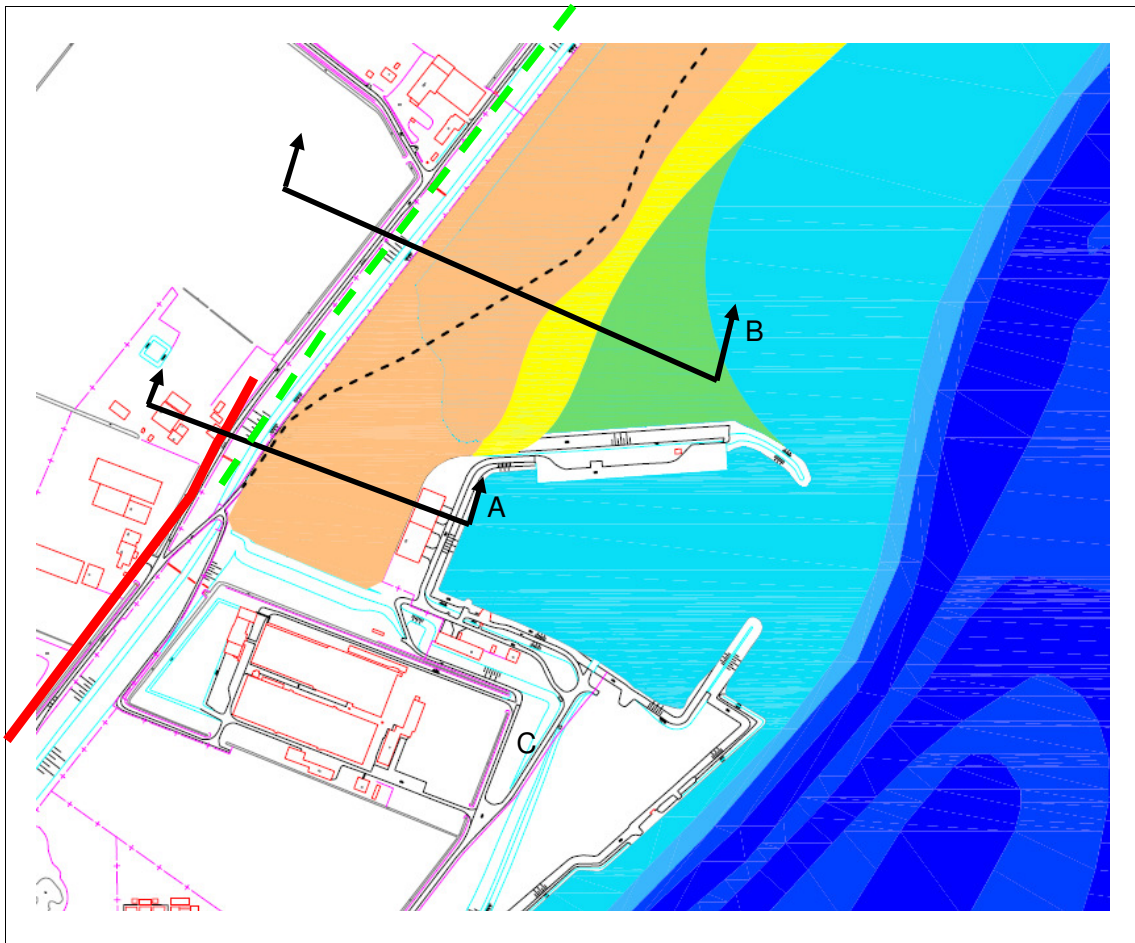
### **Aansluiting duin - havendam**

Het duin tussen de zeedijk en de havendam (dwarsprofiel A in afbeelding 7.2) zit opgesloten tussen de voorlandkering van dijkvak 10 aan de zuidkant en de havendam van de NIOZ haven aan de westkant. De voorlandkering voorkomt transport van het onverdedigde duin zuidwaarts voor een groot deel. Tijdens een storm is de zandafslag vermoedelijk zeer klein: de golfbelasting wordt gedempt door de havendam en het zandtransport in dwarsrichting zal grotendeels verhinderd worden door de havendam. Daarbij komt dat er alleen tijdens extreem hoge waterstanden (hoogte dam: NAP + 3,65 m) sprake is van golfbelasting op het duin achter de havendam. Tijdens dagelijkse omstandigheden ligt de aansluiting in een relatief luv gebied, naar verwachting zal er dan weinig erosie in dit gebied optreden. Een relatief klein zandvolume volstaat daarom in het gebied tussen dijk en noordelijke havendam (doorsnede A).

Het duin sluit onder een flauw talud vloeiend aan op de noordelijke dam van de NIOZ-haven. Hier zijn enkele aandachtspunten van toepassing:

- porositeit van de dam: de dam is bekleedt met waterbouwasfalt. Sediment zal daarom niet direct door de dam heen transporteren;
- om te voorkomen dat er zand over de dam, in het havenbasin, wordt getransporteerd, moet de hoogte van het duin nabij de dam lager zijn dan de hoogte van de dam;
- door de dominante zeewaartse windrichting zal er eolisch transport richting NIOZ-haven plaatsvinden. Dit kan leiden tot noodzaak van onderhoudsbaggerwerkzaamheden van het havenbasin.

**Afbeelding 7.2. Aansluiting duin op dijk en NIOZ-haven: groene stippellijn: indicatieve afslaglijn, rood: doorzetting dijkversterking**



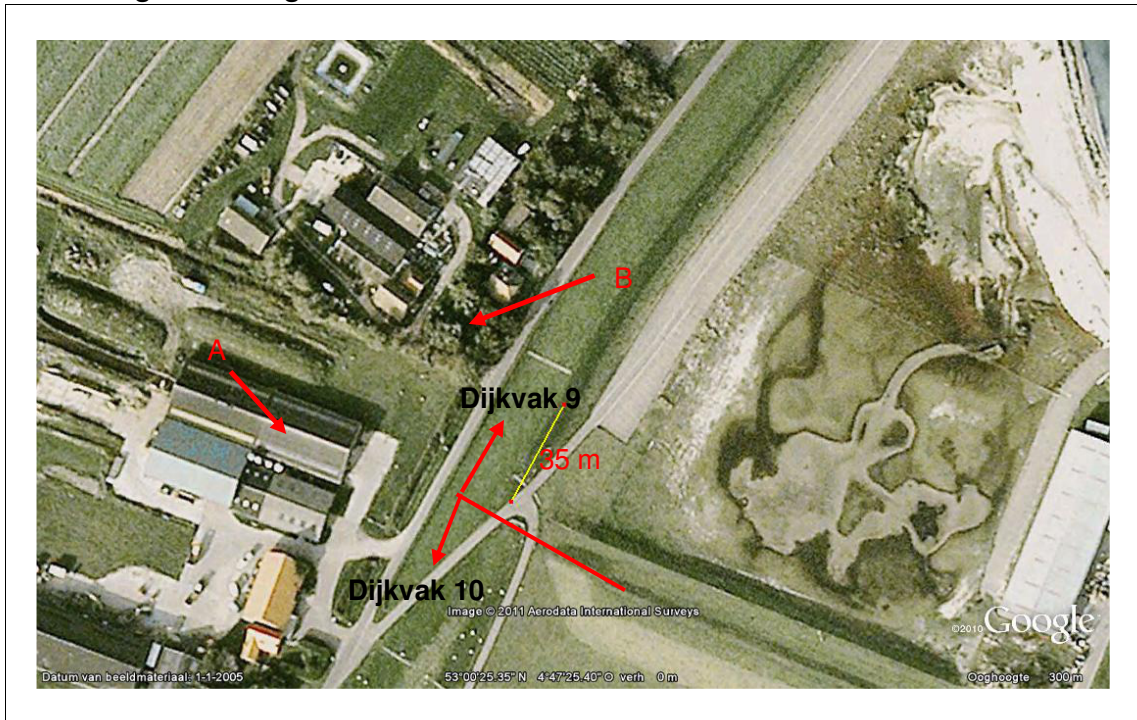
### **Bebouwing aan binnenzijde dijk**

In afbeelding 7.3 is ingezoomd op de overgang van dijkvak 9 naar dijkvak 10. Op de plaats waar het duin de functie van primaire waterkering overneemt van de dijk, hoeft de dijk niet te worden versterkt. De meest kritieke locaties in de dijkversterking zijn de locaties waar er sprake is van bebouwing aan de binnenzijde van de dijk. In afbeelding 7.3 zijn twee gebouwen onderscheiden (in de afbeelding aangeduid met A en B). Bebouwing A is gelegen in dijkvak 10, voor deze bebouwing biedt de zandige variant geen oplossing. Bebouwing B ligt echter op een kritieke locatie. Aan de voorzijde van de dijk ligt hier het duin. De locatie is kritiek omdat de bebouwing op het randje van de overgangszone is gelegen. Wanneer een overlapping van dijk en duin van 35 m wordt gehanteerd (zie afbeelding), hoeft de dijk ter hoogte van bebouwing B (aan de binnenzijde) niet te worden versterkt.

Gezien voorgaande analyse wordt er vanuit gegaan dat een overlappingslengte van 35 m niet haalbaar is.

Een mogelijk alternatief is om in plaats van een deel van dijkvak 9, de voorlandkering te versterken. Dit wordt hier verder niet uitgewerkt.

**Afbeelding 7.3. Huidige locatie**



## 7.2. Aansluiting Noordzijde

In afbeelding 7.4 is de huidige situatie ter hoogte van de aansluiting van het duin aan de noordzijde van de zandige oplossing (km 6,2) te zien.

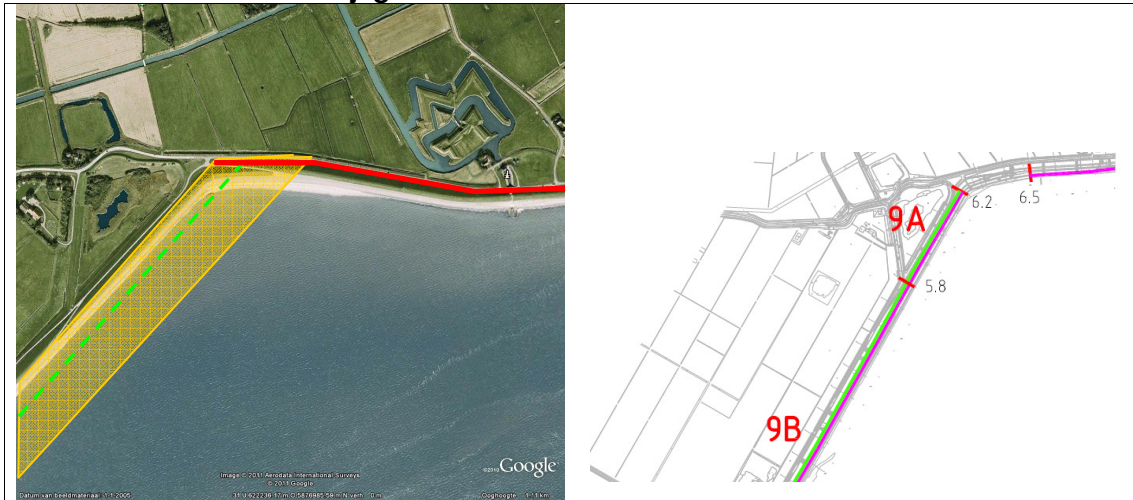
In de rechterzijde van de afbeelding is met kleuren aangegeven welke gedeelten van de huidige dijk versterkt dienen te worden. In deze afbeelding valt te zien dat het traject tussen km 6,2 en km 6,5 niet versterkt behoeft te worden.

In afbeelding 7.4 is de ligging van de primaire waterkering in de nieuwe situatie weergegeven. De groene lijn geeft de indicatieve afslaglijn van het duin weer. Deze afslaglijn kan gezien worden als de ligging van de primaire waterkering. Het duin wordt logischerwijs in lengterichting in dezelfde lijn doorgezet tot het kruist met de dijkstrekking 'km 6,2 - 6,5'. Het duin is op deze manier 'ingekapseld'/opgesloten.

Omdat het duin is opgesloten, is er geen sprake van onthouding van zandvolume uit het afslagprofiel. De ligging van het afslagprofiel wordt verwacht zoals in de afbeelding is ingetekend. Omdat het langtransport relatief klein is wordt geen significante erosie in lengterichting verwacht.

De huidige dijk hoeft op de strekking km 6,2 - 6,5 niet versterkt te worden. De huidige dijk wordt als primaire waterkering, de rode lijn in de afbeelding, wordt als primaire waterkering doorgezet tot km 6,2 (tot de bocht). Op deze manier is er een overlap bij de overgang van duin naar dijk. De overlap die op deze wijze wordt gecreëerd wordt voldoende geacht.

**Afbeelding 7.4. Links: aansluiting noordzijde met indicatieve ligging nieuwe duin (gele arcering), indicatieve afslaglijn (groene stippellijn) en doorzetting huidige dijk als primaire waterkering (rood)  
 Rechts: dijkgedeelten die wel/ niet verbeterd dienen te worden**





## 8. KOSTEN

De kosten voor de zandige oplossing bestaan uit de volgende onderdelen:

- de kosten voor het zand in het basisvolume en de slijtlaag;
- natuurbouw en recreatie;
- inpassingskosten:
  - kosten voor gemaal/ leiding op basis van hoeveelheden in hoofdstuk 6;
  - kosten voor de overgangconstructie aan de zuidzijde.

Deze onderdelen worden in dit hoofdstuk toegelicht. Per onderdeel wordt aangegeven welk deel in de kostenraming is opgenomen. Een belangrijke parameter in de kostenraming is de prijs van het zand. De belangrijkste aannamen voor het bepalen van de prijs zijn daarom in dit hoofdstuk opgenomen. Het hoofdstuk wordt afgesloten met de daadwerkelijke kostenraming.

### 8.1. Benodigde volume zand in duin en zandprijs

#### 8.1.1. Basisvolume

Het benodigde volume zand in het duin is per strekkende meter bepaald (zie hoofdstuk 4). Het totaal benodigde volume is de lengte van de dijk maal het benodigde volume per lengte eenheid. Het benodigde volume per strekkende meter is in hoofdstuk 4 bepaald op  $700 \text{ m}^3/\text{m}$  dit kan worden vertaald naar een totaal basisvolume van  $2.240.000 \text{ m}^3$ . In paragraaf 4.5.3 is de gevoeligheid van de berekeningen beschouwd. Naast de gevoeligheid van de resultaten van de berekeningen is er tevens een variatie in het benodigde volume doordat het huidige profiel van het plateau varieert langs de dijk. Zoals te zien in tabel 4.2 is het benodigde volume niet heel gevoelig voor de hydraulische parameters. Het benodigde volume valt binnen een bandbreedte van  $\pm 20 \%$ .

Zoals aangegeven in hoofdstuk 4 kan er een extra volume zand in het duin worden verwerkt om te voldoen aan de vereiste duinbreedte voor winderosie. Dit is niet opgenomen in de kostenraming. Wanneer ten behoeve van de natuurbouw volume aan het duin wordt toegevoegd (zie paragraaf 8.2) wordt mogelijk ook aan de eisen voldaan.

#### 8.1.2. Slijtlaag

Voor de ontwerpperiode van 50 jaar is het totale volume te suppleren zand ten behoeve van de slijtlaag circa 1,9 miljoen  $\text{m}^3$  (zie paragraaf 5.3). Dit volume bestaat uit het initiële volume en een 10-jaarlijkse onderhoudssuppletie. In paragraaf 5.3.9 zijn ook onder- en bovengrenzen gegeven voor het verwachte onderhoud. De verwachtingswaarde, ondergrens en bovengrens voor het onderhoud zijn respectievelijk  $310.000 \text{ m}^3/10$  jaar,  $130.000 \text{ m}^3/10$  jaar en  $760.000 \text{ m}^3/10$  jaar.

#### 8.1.3. Zandprijs

De zandprijs is bepaald in overleg met Rijkswaterstaat directie Noordzee. Voor het bepalen van de zandprijs zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- zand beschikbaar in een offshore zand wingebied;
- gemiddelde afstand offshore zandwingebied en loslocatie is 22 km;
- weinig/beperkte windgolven/swell ( $< 1 \text{ m}$ ) op de plaats waar de TSHD zijn lading lost via een persleiding.

## Productie

Gebaseerd op een werkweek van 168 uur en een schip als de Shoreway (Boskalis) van 5.600 m<sup>3</sup> hopperinhoud, ligt de weekproductie op circa 100.000 m<sup>3</sup> (in-situ zand). Het zand wordt dan aan wal geperst via een zinkerleiding (circa 600 m) en vervolgens met land leidingen direct het werk in geperst.

## Kosten

De kosten voor het ontgraven, transporteren en aanbrengen van het zand, inclusief staartkosten, mobilisatie/demobilisatie en aankoopkosten zijn EUR 7,34/m<sup>3</sup> (+/- 15 %) voor de initiële suppletie. Voor onderhoud is de prijs EUR 7,84/m<sup>3</sup> (+/- 15 %). Deze hogere eenheidsprijs wordt veroorzaakt door eenmalige installatiekosten, vooral voor het stort (transport leidingen, materieel, personeel).

De zandprijs is opgebouwd uit:

- materieel (50 %);
- brandstof and smeermiddelen (22 %);
- staf en bemanning (11 %);
- indirecte kosten (winst, risico, verzekering, alg. kosten) (17 %);
- domeinafdracht zand (EUR 0,84).

De percentages geven aan welk aandeel het onderdeel heeft in de zandprijs (exclusief domeinafdracht) bij initiële aanleg.

## 8.2. Natuurbouw

Een ontwerp van de natuurbouw aan de waddenzeekant van het duin is bepaald in een workshop [ref. 2.]. Deze natuurbouw is niet primair bedoeld voor de veiligheid (hoewel het hier wel aan bijdraagt) maar levert wel de meeste natuurwaarde op. De natuurbouw is een essentieel onderdeel van de zandige oplossing Prins Hendrikpolder en wordt daarom ook opgenomen in de kostenraming. De natuurbouw bestaat uit de volgende onderdelen:

- mogelijke verontdieping zuidelijke helft tussen de huidige dijk en geul (niet opgenomen in hoeveelhedenstaat en raming);
- landtong (vloedhaak) met een lengte van 1 - 1,3 km, een breedte van circa 100 - 150 m en de hoogte van het maaiveld op NAP + 0,7 m (blijft droog tijdens gemiddeld tij en er staat water tijdens springtij-hoogwater);
- eiland tussen de geul en het zandlichaam met een lengte van circa 1 km, een breedte van circa 100 - 150 m en hoogte van het maaiveld op NAP + 0,7 m;
- ter bescherming tegen erosie van de vloedhaak en het eiland kan een mossel-/oesterbank worden aangelegd. Voorgesteld wordt om de oesterbanken als oestermatrassen uit te voeren. Dit zijn matrassen (soort schanskorven) gevuld met dode oesterresten waar naar verloop van tijd zich oesters op kunnen vestigen. Momenteel worden hier (tot nog toe succesvolle) proeven mee uitgevoerd in de Oosterschelde. Door de matrassen liggen de oesters stabiel ten aanzien van hydraulische belasting. De oestermatrassen hebben zelf een hoogte van 30 cm. De bovenkant van de matrassen ligt op NAP + 0 m. Onder de matrassen wordt daarom ook materiaal gesuppleerd. De oestermatrassen worden aangebracht langs de geul over de gehele lengte van vloedhaak en eiland (totale lengte circa 2 km). De breedte waarover de oestermatrassen worden toegepast is 40 m;
- extra volume ten behoeve van gevarieerd duin: bij het basisvolume wordt benadrukt dat het gaat om een minimaal volume. De doorsnede van het basisvolume is een relatief smalle doorsnede en in lengterichting recht. Vanuit landschappelijk en ecologisch oogpunt is een gevarieerder duin (wellicht) wenselijk. Een verbreding van het duin van 50 m is opgenomen in de hoeveelhedenstaat en raming (optioneel);

- door de duinen is een fietspad voorgesteld: het fietspad zal in deze fase nog niet in de kosten worden verdisconteerd.

Op basis van bovengenoemde onderdelen is een schatting gemaakt van benodigde hoeveelheden zand en oestermatrassen. Deze hoeveelheden zijn opgenomen in de raming. De onzekerheid voor deze hoeveelheden is zeer groot omdat er een grove indicatie is gemaakt van de hoeveelheden op basis van een globaal schetsontwerp. De exacte hoogte, lengte en oppervlakten zijn onbekend en nog nader te definiëren. De bedragen geven een indicatie van de kosten voor de natuurbouw.

### **8.3. Inpassingskosten**

De inpassingskosten bestaan uit de kosten voor inpassing van het gemaal en voor de kosten van de overgangsconstructie aan de zuidzijde.

- de kosten voor gemaal/ leiding zijn bepaald op basis van hoeveelheden in hoofdstuk 10;
- de kosten voor de overgangsconstructie aan de zuidzijde bestaan uit de kosten van het versterken van het gedeelte van de dijk in dijkvak 9E. Hiervoor worden de kosten gehanteerd zoals bepaald in [ref. 23.] verdisconteerd naar de te versterken lengte.

### **8.4. Raming**

Een overzicht van de hoeveelheden en de kosten is opgenomen in bijlage V.

De verwachtingswaarde van de investeringskosten (inclusief omzetbelasting) bedraagt EUR 90 miljoen met een variatiecoëfficiënt van 26 %. De bandbreedte (met een 85 %-betrouwbaarheidsindex) is EUR 65 miljoen tot EUR 116 miljoen. Het totale aandeel voor benoemde en niet benoemde risico's is 17 %.

De kosten zijn onder te verdelen in grofweg de volgende componenten:

- $\pm 30$  % voor het basisvolume;
- $\pm 10$  % voor de initieel aan te brengen slijtlaag;
- $\pm 20$  % voor onderhoudssuppleties;
- $\pm 35$  % voor de natuurbouw en een gevarieerd duin;
- $\pm 5$  % voor de inpassing.

De onzekerheden die van toepassing zijn op deze basisraming zijn weergegeven in het volgende hoofdstuk. Opgemerkt wordt dat bepaalde onzekerheden kunnen leiden tot een wezenlijke aanpassing in het ontwerp, dit kan leiden tot andere kosten.



## 9. ONTWERPOVERZICHT EN ONZEKERHEDEN

### 9.1. Ontwerpoverzicht

Het ontwerp van het duin in de zandige oplossing bestaat uit de volgende onderdelen:

- huidige dijk en de aansluiting daarop;
- basisvolume duin (hoofdstuk 4);
- zettingen duin (paragraaf 4);
- slijtlaag (paragraaf 5);
- natuurbouw (hoofdstuk 8);
- inpassing van het gemaal Prins Hendrikpolder (hoofdstuk 6);
- aansluiting op de bestaande waterkering (hoofdstuk 7).

Het uitgangspunt is dat de zandige oplossing functioneert als zelfstandige waterkering. Logischerwijs wordt er wel gebruik gemaakt van de huidige dijk in het grensprofiel omdat dan een kleiner benodigd zandvolume nodig is. Hierbij is als uitgangspunt gehanteerd dat het gedeelte van de dijk wat stabiel is mag worden meegeteld als volume in het duin. Dit volume blijkt echter zeer klein. Derhalve wordt het volume van de dijk niet als onderdeel van het duin beschouwd.

Het basisvolume en een inschatting van de zettingen zijn gegeven in hoofdstuk 4. Bij dit volume wordt benadrukt dat het gaat om een minimaal volume. De doorsnede van dit volume is een relatief smalle doorsnede en in lengterichting recht. Vanuit landschappelijk en ecologisch oogpunt is een gevarieerder duin (wellicht) wenselijk en derhalve is een extra volume opgenomen in de kostenraming.

In hoofdstuk 5 en bijlage IV is een inschatting gemaakt van de totale onderhoudsbehoefte voor een periode van 10 jaar (circa 320.000 m<sup>3</sup>/10 jaar). Initieel zal dit volume als slijtlaag bij aanleg moeten worden aangebracht om te zorgen voor een minimale veiligheid gedurende een onderhoudsvrije periode van 10 jaar na aanleg. De dikte van de initieel aangebrachte laag is echter gering. Daarom wordt geadviseerd om initieel bij aanleg van het duin een extra buffer aan te leggen die het duin meer 'body' moet geven. Deze buffer zou een minimale laag dikte van 1 meter over het hele profiel moeten garanderen.

Een ontwerp van de natuurbouw aan de waddenzeekant van het duin is bepaald in een workshop [ref. 2.]: in de workshop zijn aan de zeezijde van het duin oesterbanken, een landtong (een vloedhaak) en een eiland tussen de Texelgeul en het zandlichaam voorgesteld. Deze zijn hier niet in meer detail verder uitgewerkt. Er is wel een inschatting gemaakt van de hoeveelheden zodat deze in de kostenraming zijn opgenomen.

In bijlage VI zijn dwarsdoorsneden en een bovenaanzicht gegeven van het ontwerp.

Voor de inpassing van het Prins Hendrikgemaal is onder andere een vervangende waterkering, een verlenging van de uitstroombleiding en extra afsluiters toegevoegd in het ontwerp van het duin. Dit is nader uitgewerkt in hoofdstuk 7.

Voor de aansluiting op de waterkering aan de zuidzijde dient een gedeelte van de huidige dijk (in dijksectie 9<sup>E</sup>) te worden versterkt om een overlap tussen de duinige kering en de dijk te realiseren. Aan de noordzijde hoeft de dijk in sectie 9A niet te worden versterkt.

Een raming van de zandige oplossing is gegeven in hoofdstuk 8. De verwachte investeringskosten (inclusief omzetbelasting) voor de zandige oplossing van sectie 9 met de onderdelen zoals voorgesteld in hoofdstuk 8 bedraagt circa EUR 90 miljoen. Deze raming

heeft een variatiecoëfficiënt van 26 %. De bandbreedte van deze raming (met een 85%-betrouwbaarheidsindex) is EUR 65 miljoen tot EUR 116 miljoen.

De kosten zijn onder te verdelen in grofweg de volgende componenten:

- ± 30 % voor het basisvolume;
- ± 10 % voor de initieel aan te brengen slijtlaag;
- ± 20 % voor onderhoudssuppleties;
- ± 35 % voor de natuurbouw en een gevarieerd duin;
- ± 5 % voor de inpassing.

De onzekerheid in zandprijs en de hoeveelheden te suppleren zand zijn opgenomen in hoofdstuk 8. Er zit een zeer grote onzekerheid in de hoeveelheden voor de natuurbouw en gevarieerd duin. De hoeveelheden zijn gebaseerd op een schetsontwerp en geven een indicatie van de hoeveelheden.

De onzekerheden die van toepassing zijn op deze basisraming zijn weergegeven in de volgende paragraaf.

## 9.2. Risico's en onzekerheden

In deze rapportage is de zandige oplossing voor de Prins Hendrikpolder uitgewerkt. In deze uitwerking zijn een aantal uitgangspunten gehanteerd en aannames gedaan. Deze leiden tot risico's en onzekerheden betreffende het gemaakte ontwerp en de bijhorende kostenraming. Daarnaast is er een aantal aandachtspunten benoemd die in verdere besluitvorming enige aandacht verdienen.

De belangrijkste risico's en onzekerheden zijn opgenomen in deze paragraaf.

### Hydraulische randvoorwaarden

In de door Arcadis aangeleverde hydraulische randvoorwaarden zijn twee innovatieve onderdelen verwerkt die nog niet zijn goedgekeurd door het ENW, te weten:

- gebruikmaking van richtingsafhankelijke waterstand;
- alleen de golfcomponenten die daadwerkelijk kustgericht zijn, dragen bij aan de belasting op het duin.

Omdat goedkeuring nog niet is verkregen, kan dit uiteindelijk leiden tot het 'afkeuren' van de gehanteerde randvoorwaarden en mogelijk dienen dan zwaardere randvoorwaarden te worden gebruikt. In hoofdstuk 4 zijn gevoeligheidsberekeningen gemaakt met zwaardere randvoorwaarden. Hieruit blijkt dat de invloed van de golfhoogte op het benodigde volume zand relatief klein is. Het hanteren van een niet-richtingsafhankelijke waterstand leidt wel tot een significant groter benodigd basisvolume: 800 m<sup>3</sup>/m in plaats van 700 m<sup>3</sup>/m.

### Gebruik huidige dijk als onderdeel van het duin

Voor het bepalen van de volumes is er van uitgegaan dat de huidige dijk geen onderdeel uit kan maken van het zandvolume. Dit is een aanname. Uit nieuwe (lopende) onderzoeken kan blijken dat de invloed van piping op de dijk gering is en derhalve toch een gedeelte van de dijk in het zandvolume gebruikt kan worden (zie hoofdstuk 4, het gaat dan om 120 m<sup>3</sup>/m).

Aan de andere kant kan uit verdergaand onderzoek naar piping blijken dat de veronderstelling dat een doorgaande pijp onder een duin zal verzanden niet juist is. Het ontwerp zal dan moeten worden aangepast. In de gekozen inpassing van de dijk ligt de zeezijde van het duin al op redelijke afstand van de dijk. In de gekozen inpassing wordt de benodigde pi-

pinglengte echter niet gehaald. Een aanpassing in het ontwerp betreft dan een verschuiving van het duinige profiel in de richting van de geul, totdat de pipinglengte voldoende is. Het gevolg is dan, dat de breedte van het plateau dat overblijft voor de natuurbouw kleiner is.

Een onzekerheid die hier op aansluit is dat de pipinglengte die bepaald wordt met nieuwe pipingregels (die op dit moment worden ontwikkeld), anders kan uitvallen dan de huidig gehanteerde pipinglengte.

### **Winderosie**

In het huidige ontwerp is uitgegaan van voldoende en vitale begroeiing. Mogelijk wordt dit uitgangspunt niet haalbaar geacht. In dat geval dient er een veel breder duin te worden ontworpen. In dat ontwerp dient de minimale afstand tussen de binnenkruin van het grensprofiel en de binnenzijde van het duin groter dan 50 m. te zijn. Dit zou grofweg betekenen dat er een 50 meter breder duin ontworpen dient te worden.

Daarnaast wordt opgemerkt dat het verlies door eolisch transport in deze rapportage niet is beschouwd. Eolisch transport is wel een belangrijke factor. Zeker gezien het feit dat de overheersende windrichting aflagdig is en dat na (zware) storm hierdoor geen/beperkt afgeslagen zand weer richting duin wordt getransporteerd.

Indien het eolisch transport tot ongewenste erosie leidt dienen aanvullende maatregelen getroffen te worden. Bijvoorbeeld door het plaatsen van stuifschermen.

### **Ontbreken duidelijke toetsrichtlijn**

Voor een eventuele toekomstige wettelijke zesjaarlijkse toetsing van de zandige oplossing ontbreken duidelijk toepasbare toetsrichtlijnen voor een zandige oplossing zoals voorgesteld in deze rapportage. De toekomstige toetsing vormt daarom een onzekerheid.

### **Onzekerheid basisvolume**

Het benodigde basisvolume is bepaald op basis van een aantal uitgangspunten. Enkele belangrijke uitgangspunten zijn bijvoorbeeld de vorm van het profiel en de mediane korrel diameter van het suppletiemateriaal. De gevoeligheid van een aantal parameters is onderzocht in hoofdstuk 4. Uit hoofdstuk 4 blijkt dat het hanteren van andere uitgangspunten voor bijvoorbeeld het aanlegprofiel kan leiden tot een wijziging in het benodigd basisvolume.

### **Onzekerheid slijtlaagvolume**

De gepresenteerde transporten en kustlijnontwikkelingen (bijlage IV) zijn indicatief en moeten met een aanzienlijke range geïnterpreteerd worden. Derhalve is bij het bepalen van de benodigde volumes in de slijtlaag, een veiligheidsmarge toegepast zodat een ontwerp van de slijtlaag is ontstaan dat als veilig wordt beschouwd. De gepresenteerde volumes kunnen als conservatief worden beschouwd.

In de berekeningen van de slijtlaag zijn de volgende onderdelen niet opgenomen:

- niet golfgedreven stroming;
- kleine veranderingen in locale golfcondities ten gevolge van autonome morfologische ontwikkelingen. Naar verwachting is de invloed van deze onderdelen op de slijtlaag beperkt.

### **Inspanning onderhoudsbehoefte slijtlaag**

Bij het vaststellen van de slijtlaag is uitgegaan van een onderhoudsfrequentie van eens in de 10 jaar. Voorafgaand aan een onderhoudssuppletie dient een survey te worden uitge-

voerd. Deze survey wijst uit wat de daadwerkelijke onderhoudsbehoefte is. Omdat de berekeningen conservatief zijn, zal de (10-jaarlijkse) onderhoudsbehoefte naar verwachting kleiner zijn dan bepaald in deze rapportage. Mogelijk verdwijnt (een gedeelte van) het geërodeerde volume niet uit het systeem en kan het (10-jaarlijkse) onderhoud volstaan met het verzetten van zand van locaties waar aanzanding heeft plaatsgevonden naar locaties waar erosie is opgetreden;

### **Winbaarheid zand**

Het is onzeker of het zand zo maar winbaar is, dus dat vraagt dat om een concessieverlening daarvoor (inclusief daarbij behorende RvW). Daarnaast is er mogelijk een ontgrondingsvergunning benodigd voor het winnen van het zand.

In de berekeningen is uitgegaan van suppletiemateriaal met een gemiddelde korreldiameter (d50) van 300µm en de rekenmodellen gaan uit van een bepaalde korrelverdeling. Mogelijk is er geen materiaal beschikbaar wat aan de uitgangspunten voor het suppletiemateriaal voldoet.

### **Onzekerheid zandprijs**

1. de prijs van het zand is voor een belangrijk deel afhankelijk van de vaarafstand naar het wingebied en van de persafstand. Een verandering in de gehanteerde uitgangspunten zal leiden tot een andere prijs voor het zand;
2. als de aannemer op stand-by moet door toedoen van derden (vergunningen, explosieven, obstructie, et cetera) kan dit leiden tot een significante verhoging van de zandprijs. Het materieel is erg duur.

### **Benodigde vergunningen**

Het is nog niet zeker of de benodigde vergunningen voor aanleg van de zandige oplossing worden verleend.

### **Inpassing waterleiding**

De inpassing van de waterleiding brengt een aantal onzekerheden met zich mee. Mogelijk zijn er nog meer maatregelen nodig voor de inpassing dan voorgesteld in deze rapportage. Bovendien is de eigenaar van de waterleiding tot dusver nog niet betrokken bij het traject. Dit kan leiden tot discussie over de voorgestelde inpassing.

### **Variantkeuze inpassing dijk**

In de keuze voor de inpassing van de dijk is het uitgangspunt dat de huidige dijk kan en mag bezwijken. De weg aan de binnenzijde van de dijk kan hierdoor ook bezwijken. Deze weg aan de binnenzijde van de dijk wordt onder andere gebruikt als evacuatieroute. Daarom zal bijvoorbeeld een alternatieve evacuatieroute gepland moeten worden.

### **Aanzanding NIOZ-haven**

In de voorliggende rapportage is een beperkte beschouwing gemaakt van de gevolgen van de zandige oplossing voor aanzanding in de NIOZ-haven (ten gevolge van verstuiving en sedimenttransporten door waterstroming). Mogelijk zijn de effecten van de zandige oplossing veel groter (meer aanzanding) waardoor er in de toekomst aanvullende maatregelen getroffen dienen te worden.

### **Natuurbouw**

#### *Gevarieerd duin*

Bij het basisvolume en de slijtlaag wordt benadrukt dat het gaat om een minimaal benodigd volume. De doorsnede van het basisvolume is een relatief smalle doorsnede en in lengte-



richting recht. De benodigde volumes zand zijn significant groter wanneer een gevarieerd duin wordt gevraagd. In de kostenraming is een indicatieve (en optionele) post opgenomen voor een extra duinbreedte van 50 m. Mogelijk wordt deze extra breedte te klein bevonden om werkelijk tot een gevarieerd duin te komen.

*Natuurbouw - vloedhaak, eiland en ondiep gedeelte*

In hoofdstuk 8 is een inschatting gemaakt van de hoeveelheden ten behoeve van de natuurbouw tussen het duin en geul op basis van schetsontwerp uit [ref. 2.]. Verdere uitwerking en optimalisatie van dit schetsontwerp kan leiden tot andere hoeveelheden.

In de uitwerking van het duin ten aanzien van waterveiligheid is geen rekening gehouden met de natuurbouw. Deze natuurbouw heeft een positieve invloed op deze veiligheid.

Het effect en de werking van de natuurbouw is niet onderzocht. Ook is de erosie van de natuurbouw niet bepaald. Mogelijk is onderhoud van deze natuurbouw in de toekomst noodzakelijk. Dit is in deze rapportage niet beschouwd.



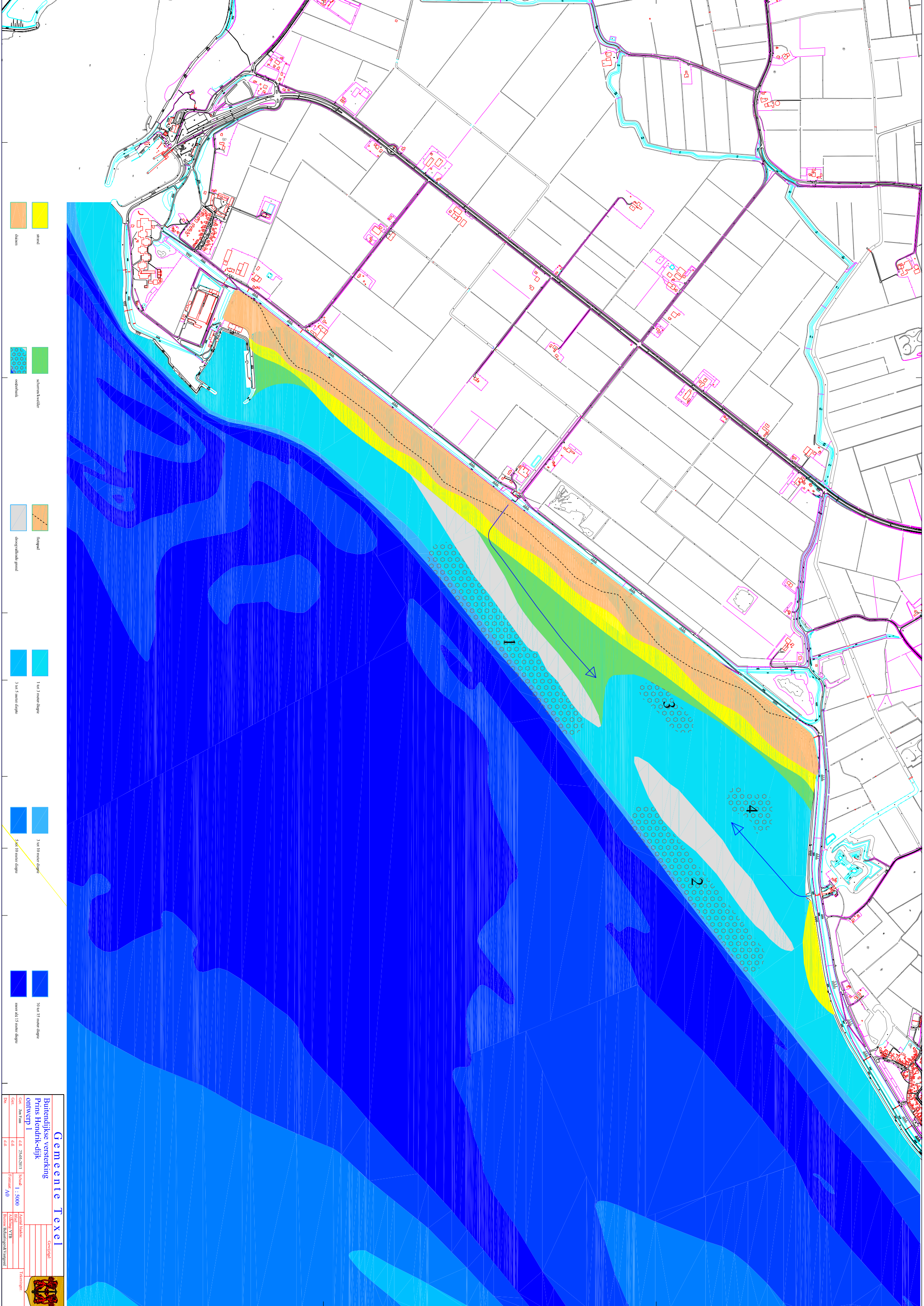
## 10. LITERATUUR

1. Witteveen+Bos, Planstudie dijkversterking Waddenzeedijk Texel, nota van uitgangspunten herziene uitgave februari 2011, 3 maart 2011, referentie EDM70-1/schs5/074.
2. Gemeente Texel, Besprekingsverslag, Workshop ecologische meerwaarde zandige variant versterking Prins Hendrikdijk, 17 januari 2011.
3. Witteveen+Bos, versterkingsalternatieven de dijk Texel in sectie 9 en 10.
4. Bodemdata Waddenzee: WESTWAD.asc.
5. HHNK, Afslagprofielen 'duindijk' voor Prins Hendrikpolderdijk Texel, een eerste verkenning. afslagprofielen PHPdijk Texel.doc.
6. Toetsing kop v. Ameland.
7. Arcadis, SWAN berekeningen Texel, 15 april 2011.
8. Rapport RIKZ/2000.040, december 2000, A.P. Roskam, J. Hoekema en J.J. W. Seiffert.
9. Expertise Netwerk Veiligheid, Technisch rapport duinafslag, mei 2007.
10. Elias, E.P.L. Morphodynamics of Texel inlet.
11. Witteveen+Bos, Gemaal Prins Hendrikgemaal, toetsing conform VTV2006, EDM70-4-83.
12. IDON, Integraal beheerplan Noordzee 2015.
13. VROM, derde nota Waddenzee.
14. Rijkswaterstaat, Milieueffectenrapport winning suppletiezand Noordzee 2008-2012 (2007).
15. RWS RIZA, WL Delft Hydraulics en KNMI (2000), Scenario's extreme krachten voor WB21.
16. Rijkswaterstaat servicedesk, Bodemligging Waddenzee nabij Texel, sm43.csv.
17. Van Rijn, Principles of coastal morphology, 1998.
18. Witteveen+Bos, verslag expertsessie zandige oplossing Prins Hendrik Polder 16 juni 2011, EDM70-5/tutr/006.
19. Witteveen+Bos, uitgangspuntennotitie gemaal Prins Hendrikpolder, kunstwerken Waddenzee Texel, EDM70-6/winb/008.
20. Witteveen+Bos, versterkingsalternatieven dijk Texel, EDM70\_1\_065.
21. TAW, Leidraad Kunstwerken, mei 2003.
22. NEN3651, aanvullende eisen voor leidingen in kruisen met belangrijke waterstaatswerken.
23. Witteveen+Bos, Versterking Waddenzeedijk Texel raming, EDM70\_1\_087.



**BIJLAGE I    SCHETSONTWERP BUITENDIJKSE VERSTERKING [REF. 2.]**





strand  
dijk

schoneit kwelder  
oeverbank

rijweg  
droogvallende grond

1 tot 3 meter diepte  
3 tot 5 meter diepte


3 tot 10 meter diepte  
5 tot 10 meter diepte

10 tot 15 meter diepte  
meer dan 15 meter diepte

**Gemeente Texel**  
 Buitendijkse versterking  
 Prins Hendrik-dijk  
 ontwerp 1

Titel	Jan Ruis	Schaal	1 : 5000	Aantal bladen	
Teken		Uitg.	25-01-2011	Totaal	
Uitg.		Formaat	A0	Aankoop	VRB
Uitg.		Uitg.		Bevoegd	Besluitgevond Verkeers

Geografisch  
 Tekeningen



## **BIJLAGE II SWAN BEREKENINGEN TEXEL [REF. 7.]**





## MEMO

Onderwerp:  
SWAN berekeningen Texel

Marknesse,  
15 april 2011

Van:  
Gerbrant van Vledder

Opgesteld door:  
Gerbrant van Vledder

DIVISIE WATER

Afdeling:  
Divisie Water Marknesse

Ons kenmerk:  
:

Aan:  
Edwin Meisner

Kopieën aan:  
Henk Steetzel

---

## Inleiding

Momenteel is bureau Witteveen + Bos bezig met de toetsing en het ontwerp van de hoogwaterkering van de Prins Hendrik Polder (PHP) op Texel. Voor het ontwerp van een mogelijk duin langs de dijk van de PHP op Texel zullen met een duinafslagmode (DUROS+ of DUROSTA, hierna D-model genoemd) berekeningen gemaakt worden. Voor dit model zijn golfrandvoorwaarden op diep water nodig. Deze golfrandvoorwaarden zijn met het SWAN model bepaald op een wijze die consistent is met de methode die ook voor de HR2011 wordt toegepast.

De duinafslagmodellen gebruiken naast de waterstand als invoer ook een significante golfhoogte ( $H_{m0}$ ) en piekperiode ( $T_p$ ) aan het begin van een raai beginnend op diep water (voor de kust is dat de 20 m dieptecontour) en eindigend bij de beoogde duinverdediging. Voor de situatie op Texel zijn dat een aantal locaties in de diepe geul de Texelstroom. In deze studie worden de piekperiode  $T_p$  als de spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  opgeleverd. De periode  $T_{m-1,0}$  wordt echter aanbevolen omdat deze meer robuust is dan de piekperiode  $T_p$ , vooral in situaties met meer-toppige spectra. Voor toepassing in het D-model kan een standaard spectrum vorm worden aangenomen zodat  $T_p$  direct uit  $T_{m-1,0}$  kan worden afgeleid op basis van de formule  $T_p = 1.1 * T_{m-1,0}$ .

Het doel van de studie is om golfrandvoorwaarden te leveren voor het uitvoeren van duinafslagberekeningen met het duinafslagmodel model. Deze duinafslag berekeningen maken geen onderdeel uit van deze studie, zij worden aansluitend door Witteveen+Bos uitgevoerd.

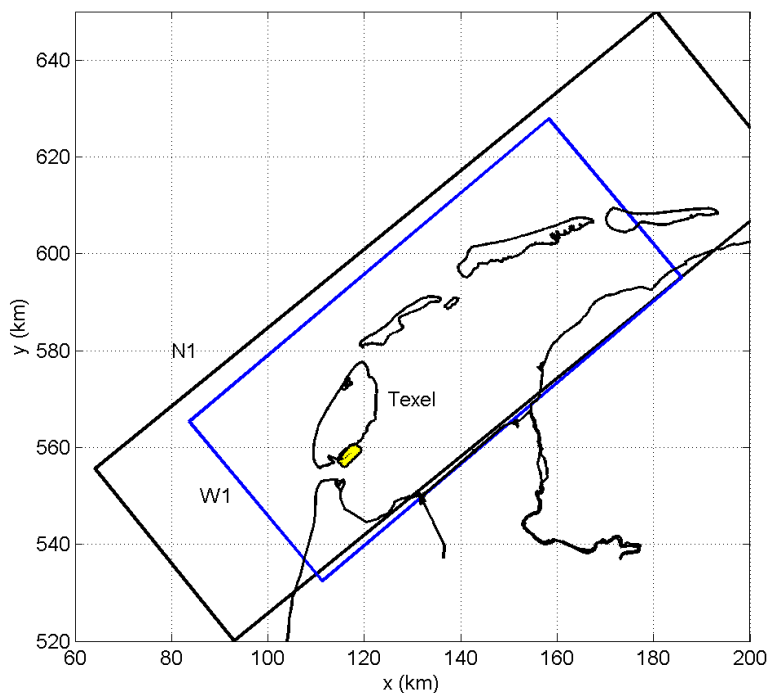
## Aanpak van de studie

Het D-model berekent de transformatie van een diep water conditie langs een rekenraai die loodrecht op de lokale kustnormaal staat. In deze methode wordt aangenomen dat de invallende golfrichting evenwijdig aan de rekenraai gericht is. De golfrandvoorwaarde wordt daarom slechts gegeven in termen van een significante golfhoogte  $H_{m0}$  en een piekperiode  $T_p$ . De invallende golfrichting wordt in deze aanpak niet gespecificeerd.

De te beschouwen wind en golfcondities komen overeen met de 1 op 4000 jaar condities die ook zijn gebruikt in de HR2011 en in de SWAN berekeningen uit 1999 voor de westelijke Waddenzee door Alkyon (2009). In die berekeningen is een constante waterstand aangenomen, terwijl voor de huidige aanpak een richtingafhankelijke waterstand genomen is. Omdat niet op voorhand te zeggen is voor welke windrichting de grootste golfcondities optreden aan het begin van de rekenraaien, zijn de berekeningen uitgevoerd voor 14 windrichtingen (elke  $30^\circ$ , aangevuld met  $285^\circ$  en  $315^\circ$ ).

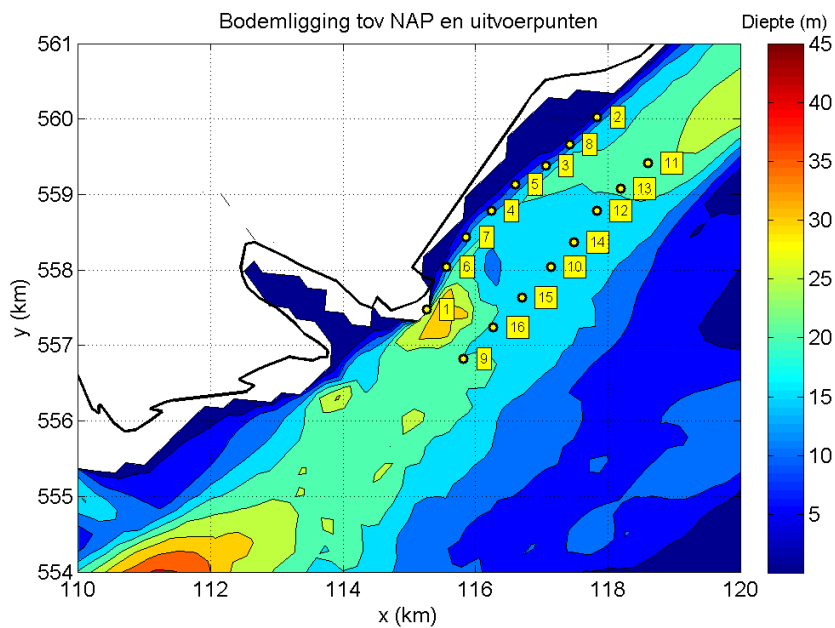
## SWAN schematisatie

De SWAN berekeningen zijn uitgevoerd op 2 rekenroosters. Deze rekenroosters zijn ook toegepast in de Alkyon studie voor Den Oever (Alkyon, 2010). Figuur 1 toont de ligging van deze rekenroosters rondom Texel. Het buitenste rekenrooster N1 heeft een resolutie van 500 m bij 500 m. Hierin genest is het W1 rooster dat een resolutie van 100 m bij 100 m heeft. De golfrandvoorwaarden voor het N1-rooster zijn afgeleid uit de statistiek van de golfcondities bij de boeien Eierlandse Gat (ELD) en Schiermonnikoog Noord (SON).



Figuur 1: SWAN rekenroosters en uitvoerpunten bij Texel.

Figuur 2 toont de bodemligging ten oosten van Texel met de locaties van de SWAN uitvoerpunten ten behoeve van de duinafslagberekeningen. Deze locatie zijn door bureau Witteveen+Bos aangeleverd. De coördinaten van deze locaties zijn opgenomen in tabel 1.



Figuur 2: Bodemligging en uitvoerpunten

#	x (m)	y (m)	Bodemligging (m) tov NAP
1	115260	557480	22.2
2	117840	560020	8.7
3	117060	559380	13.6
4	116240	558780	14.4
5	116600	559140	10.5
6	115560	558040	12.6
7	115860	558440	12.0
8	117420	559660	11.2
9	115820	556820	20.5
10	117140	558040	17.3
11	118606	559412	22.7
12	117830	558781	19.2
13	118190	559082	20.5
14	117486	558370	18.3
15	116698	557632	19.5
16	116271	557237	18.9

Tabel 1: Locatie uitvoerpunten en bodemligging tov NAP voor de SWAN berekeningen.

De golfrandvoorwaarden zijn afgeleid voor de 1 op 4000 jaar conditie. Dit komt overeen met de zogenaamde windklasse 2 conditie. Voor deze conditie zijn golfrandvoorwaarden opgelegd langs de randen van het N1-rooster zoals beschreven in Alkyon (1999). De windsnelheid is richtingafhankelijk en beschreven in Alkyon (1999). De richtingafhankelijke waterstanden zijn gebaseerd op RIKZ (2000). Het toepassen van de richtingafhankelijke waterstanden wordt ook wel de semi-probabilistische methode genoemd om onderscheid te maken met de volledig probabilistische aanpak met het Hydra-K model en de deterministische methode waarin een constante waterstand wordt gebruikt die voor alle windrichtingen hetzelfde is.

Tabel 2 geeft een overzicht van de golf, wind- en waterstandrandvoorwaarden die in deze studie gebruikt zijn. Om rekening te houden met bodemdaling, zeespiegelrijzing en golfopzet is conform de aanpak voor de Havendijk in Den Oever een toeslag van 0.37 toegepast op alle waterstanden.

Windrichting (°N)	Windsnelheid (m/s)	Waterstand NAP (m)	Hm0 (SON) (m)	Tp (SON) (s)	Hm0 (ELD) (m)	Tp (ELD) (s)
30	25.7	2.13	6.0	14.6	7.1	13.9
60	26.7	2.13	3.7	9.7	4.0	9.1
90	25.7	2.13	3.7	9.7	4.0	9.1
120	24.4	2.13	3.7	9.7	4.0	9.1
150	25.7	2.13	3.7	9.7	4.0	9.1
180	28.7	2.13	3.7	9.7	4.0	9.1
210	33.7	2.35	4.8	11.7	4.0	12.4
240	36.7	3.60	7.0	14.3	5.8	15.5
270	37.7	4.41	8.7	16.3	8.6	16.5
285	37.7	4.50*	8.8	16.6	<b>9.5</b>	<b>16.7</b>
300	36.7	4.58	9.1	16.9	9.4	16.4
315	34.7	4.63*	<b>9.3</b>	16.8	9.4	16.3
330	31.7	<b>4.68</b>	9.0	<b>18.5</b>	9.2	16.2
360	28.7	3.70	8.2	17.5	8.6	15.5

Tabel 2: Toegepaste wind, golf, en waterstandcondities voor de SWAN berekeningen. De waterstanden voor de windrichtingen 285° en 315° zijn verkregen met lineaire interpolatie uit omliggende waarden. In de berekeningen zijn de waterstanden met een toeslag van 0.37 m verhoogd.

## SWAN instellingen

De SWAN berekeningen zijn uitgevoerd met versie 4081 en de volgende fysische en numerieke instellingen. Deze instellingen zijn ook gebruikt voor de SWAN berekeningen tbv de HR2011 (Deltares, 2010). Deze instellingen wijken af van de standaard SWAN instellingen van TUD.

```
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 Cn14=3.00000e+07
LIMITER ursell=10.0000 qb=1.00000
FRICTION JONSWAP CFJON=0.038
BREA WESTH alpha=0.960000 pown=2.50000 bref=-1.39630 shfac=500.000
TRIAD trfac=0.1000000 cutfr=2.50000
NUM STOPC 0.00 0.01 0.001 99 STAT mxitst=40 alfa=0.002
```

## Primaire resultaten

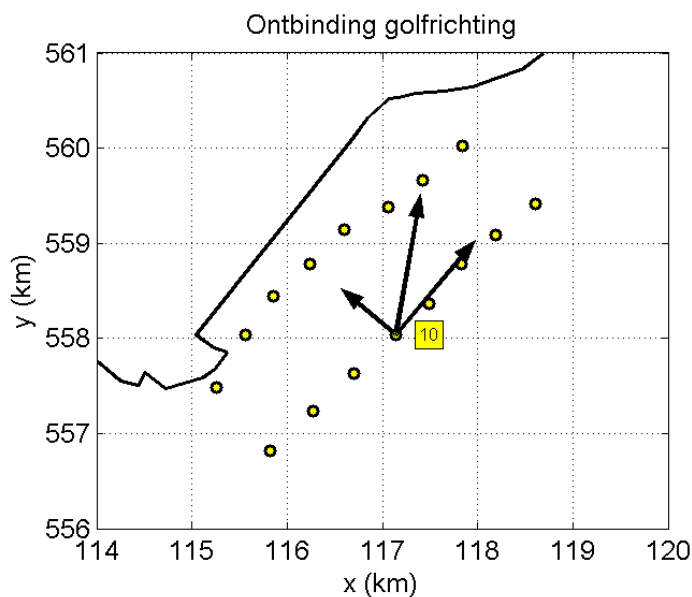
De resultaten van de SWAN berekeningen zijn per locatie opgenomen in tabellen met de berekende golfparameters  $H_{m0}$ ,  $T_p$ ,  $T_{m-10}$ , DIR als functie van de windrichting. Voor locatie 10 is een tabel met resultaten opgenomen in tabel A1. De resultaten voor alle uitvoerpunten zijn opgenomen in een XLS bestand dat separaat aan dit memo aan opdrachtgever is geleverd. De resultaten zijn ook weergegeven in de figuren A1 t/m A5 van bijlage A als zwarte lijnen met kruisjes. Een overzicht van de ruimtelijke variatie van de significante golfhoogte  $H_{m0}$  en de spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  voor 6 windrichtingen is gegeven in de figuren 3 en 4. De resultaten voor de significante golfhoogte (fig. 3) geven aan dat de grootste golfcondities optreden voor  $240^\circ$  en dat de golven in geul het hoogst zijn. De resultaten voor de spectrale periode  $T_{m-10}$  (fig. 4) laten een vergelijkbaar beeld zien als voor de significante golfhoogte hoewel de variatie iets minder geprononceerd is.

De resultaten zijn gegeven voor 2 rijen uitvoerpunten. Afhankelijk van het toe te passen model moet de uitvoer van een bepaalde rij gebruikt worden. Voor het huidige DUROS model moet diep water gebruikt worden en bij het DUROSTA model kunnen beide sets uitvoerpunten gebruikt worden. In het laatste geval moeten eventuele verschillen in golfhoogten nader bekeken worden en de effecten hiervan op de profielontwikkeling.

## Nadere beschouwing van de resultaten

De primaire resultaten van de SWAN berekeningen geven de golfcondities aan het begin van de raai. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de gemiddelde richting van de golven. Dit betekent dat voor situaties met afluende wind en een gemiddelde golfrichting die naar "open zee" wijst, er voor de duinafslag berekeningen toch veronderstelt wordt dat de gemiddelde golfrichting langs de raai naar het land wijst. Deze ongelijkheid is in wezen onrealistisch en leidt tot conservatieve golfbrandvoorwaarden.

Een eenvoudige methode om realistischere golfrandvoorwaarden te verkrijgen is om gemiddelde golfrichting te ontbinden in een component langs de raai en een component dwars op de raai. Dit wordt geïllustreerd in figuur 5. Toepassing deze methode leidt tot lagere waarden voor de invallende golfhoogte. Dit is voor de significante golfhoogte geïllustreerd in figuur A1 met een blauwe lijn met rondjes. Voor de andere golfparameters werkt deze methode niet. Uit de figuur blijkt dat voor noordwestelijke tot noordelijke richtingen deze methode leidt tot nul-waarden voor de golfhoogte omdat de gemiddelde golfrichting van de kust af is gericht.



Figuur 5: Ontbinding van de gemiddelde golfrichting in een dwars en een kustnormaal component.

Een betere methode is om het golfveld als een richting gespreid golfveld te beschouwen en alleen die golfcomponenten te beschouwen die naar de kust toe zijn gericht (dus alle componenten die minder dan  $90^\circ$  afwijken van de kustnormaal). Op basis van deze componenten kan dan de significante golfhoogte  $H_{m0}$  bepaald worden (en ook de piekperiode  $T_p$ , de spectrale periode  $T_{m-10}$ , de gemiddelde golfrichting DIR en de richtingspreiding DSPR).

De werking van deze methode is geïllustreerd in figuur 6 voor locatie 10. Voor alle uitvoerpunten is het berekende genormaliseerde 2D-golfspectrum getoond in polaire vorm. De zwarte driehoekjes geven de windrichting aan. De blauwe lijn is de richting van de kustnormaal ( $137^\circ N$ ) en de rode lijn is de scheidingslijn tussen spectrale componenten die al of niet een kustwaartse component hebben.

Bovenstaande methode is toegepast voor alle locaties en de golfparameters  $H_{m0}$ ,  $T_p$ ,  $T_{m-10}$ , DIR en DSPR. De berekende spectrale parameters op basis van de kustwaarts gerichte spectrale componenten is in de figuren A1 t/m A5 weergegeven als rode lijn met bolletjes.

Voor de significante golfhoogte (figuur A1) worden voor zuidoostelijke richtingen min of meer dezelfde resultaten gevonden als voor het totale spectrum. Voor zuidwestelijke richtingen is de golfhoogte enigszins gereduceerd, terwijl voor noordwestelijke richtingen een grote reductie

plaatsvindt. In tegenstelling tot de vectoriële methode blijkt dat in de spectrale methode er altijd enige golfenergie naar de kust toe loopt.

Voor de piekperiode  $T_p$  (figuur A2) zijn de resultaten in het algemeen gelijk, behalve voor westelijke en noordelijke richtingen. Voor deze condities zijn de uitvoerpunten afgeschermd door Texel en zijn de effecten op het spectrum merkbaar.

Voor de spectrale periode  $T_{m-10}$  (figuur A3) blijkt de spectrale methode te leiden tot een verhoging van deze periodemaat. Dit effect treedt met name op voor zuidwestelijke en westelijke windrichting. Dit resultaat lijkt verrassend maar komt doordat juist deze componenten door refractie in de geul sterker vertegenwoordigd zijn in kustwaartse richting dan de kortere component. Deze constatering is van belang omdat zo een realistischer beginconditie voor de DUROSTA berekeningen wordt verkregen.

Voor de gemiddelde golfrichting DIR (figuur A4) blijkt de richting dichter bij de kustnormaal te komen liggen. Deze normaal is in de afzonderlijke figuren weergegeven met een blauwe streepjeslijn. De grootte van de verandering neemt toe naarmate de windrichting meer afwijkt van de kustnormaal.

De richtingsverspreiding DSPR (figuur A5) neemt altijd af, maar verandert nauwelijks voor zuidoostelijke richtingen. Voor andere richtingen neemt de spreiding sterker af omdat alleen kustwaartse componenten worden meegenomen.

## Effect waterstand op resultaten

In deze studie zijn berekeningen uitgevoerd voor een windrichtingafhankelijke waterstand, zie tabel 2, inclusief een toeslag van 0.37 m voor verschillende effecten. Het effect van deze toeslag op de berekende golfcondities is onderzocht door ook berekeningen uit te voeren zonder deze waterstands toeslag. Het resultaat van deze berekeningen is gegeven in de figuren B1 en B2 met daarin de variatie van de significante golfhogte  $H_{m0}$  en de spectrale golfperiode  $T_{m-10}$ . De zwarte lijnen geven de resultaten op basis van het totale golfspectrum, en de rode lijnen zijn op basis van het invallende golfspectrum. De lijnen met symbolen zijn voor de waterstanden zonder toeslag, de gestreepte lijnen zijn op basis van een waterstandtoeslag van 0.37 m.

De resultaten geven aan verschillen klein zijn en alleen optreden voor oostelijke richtingen. Dat komt omdat voor die windrichtingen de golven beïnvloed worden door de ondieptes in de Waddenzee ten oosten van Texel.

Ter referentie zijn de berekeningen ook uitgevoerd met een constante waterstand voor alle richtingen met (NAP + 5.20 m) en zonder toeslag (NAP +4.87 m). Het resultaat voor locatie 10 met de hoogste waterstand is opgenomen in Tabel B1. De resultaten voor alle rekenpunten zijn in een XLS-bestand opgeleverd. De resultaten voor beide constante waterstanden zijn verwaarloosbaar omdat de waterstanden hoger zijn dan bij de richtingafhankelijke waterstanden. Dat geldt zeker voor de oostelijke windrichtingen.



## Discussie

De resultaten van de berekeningen laten zien dat de significante golfhoogte  $H_{m0}$  in de meeste gevallen tussen de 2 m en 3 m ligt en dat de golfperiode  $T_{m-1,0}$  maximaal tussen de 6 en 7 s ligt. De piekperiode komt zelden boven de 7 s uit. Voor duinafslag zijn dit milde condities. Opgemerkt wordt dat het DUROS model uitgaat van een minimale piekperiode van 8 s, zodat de berekende variatie van de periode geen effect zal hebben.

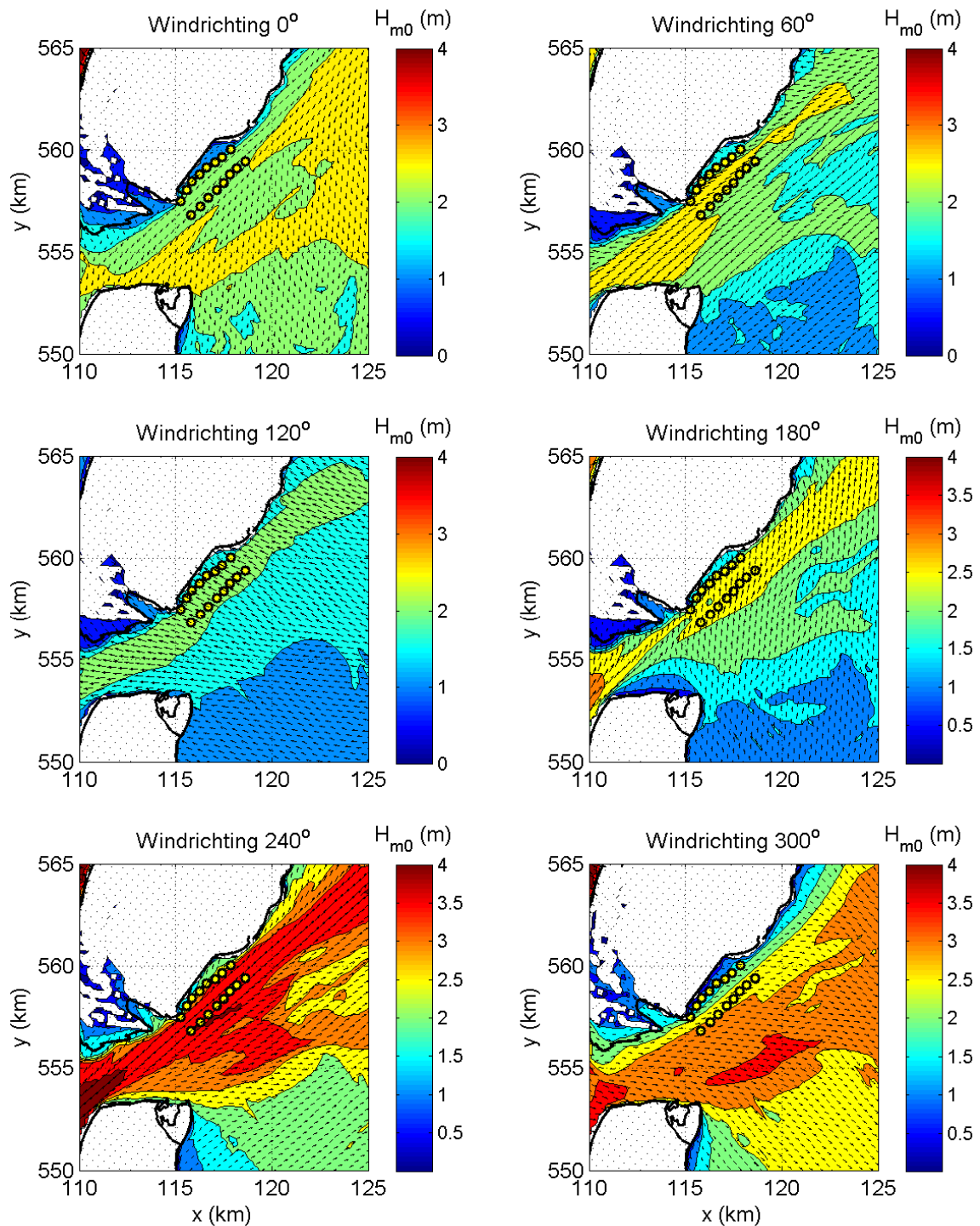
De huidige studie maakt gebruik van gebruik van modelinstellingen voor het SWAN model die ook voor de berekening van de HR2011 gebruikt worden. Die berekeningen worden ook uitgevoerd voor de Waddenzee. Het enige verschil is dat voor de HR2011 een kromlijng rekenrooster wordt gebruikt terwijl hier regelmatige rechthoekige rekenroosters worden toegepast. Naar verwachting zullen de resultaten nauwelijks van elkaar verschillen.

In deze studie, en in de studie voor Den Oever, is een richtingafhankelijke waterstand gebruikt. Deze semi-probabilistische methode leidt tot lagere waterstanden voor met name oostelijke windrichtingen en daardoor tot lagere golfhoogten en golfperioden langs de kust van Texel. Deze methode wijkt af van de tot nu toe gevolgde deterministische methode waarbij een constante waterstand van NAP + 4.87 m (zonder toeslag) en NAP + 5.20 (inclusief toeslag) wordt gebruikt. Het gebruik van deze methode wordt momenteel voorgelegd aan ENW (Expertise Centrum Waterkeringen).

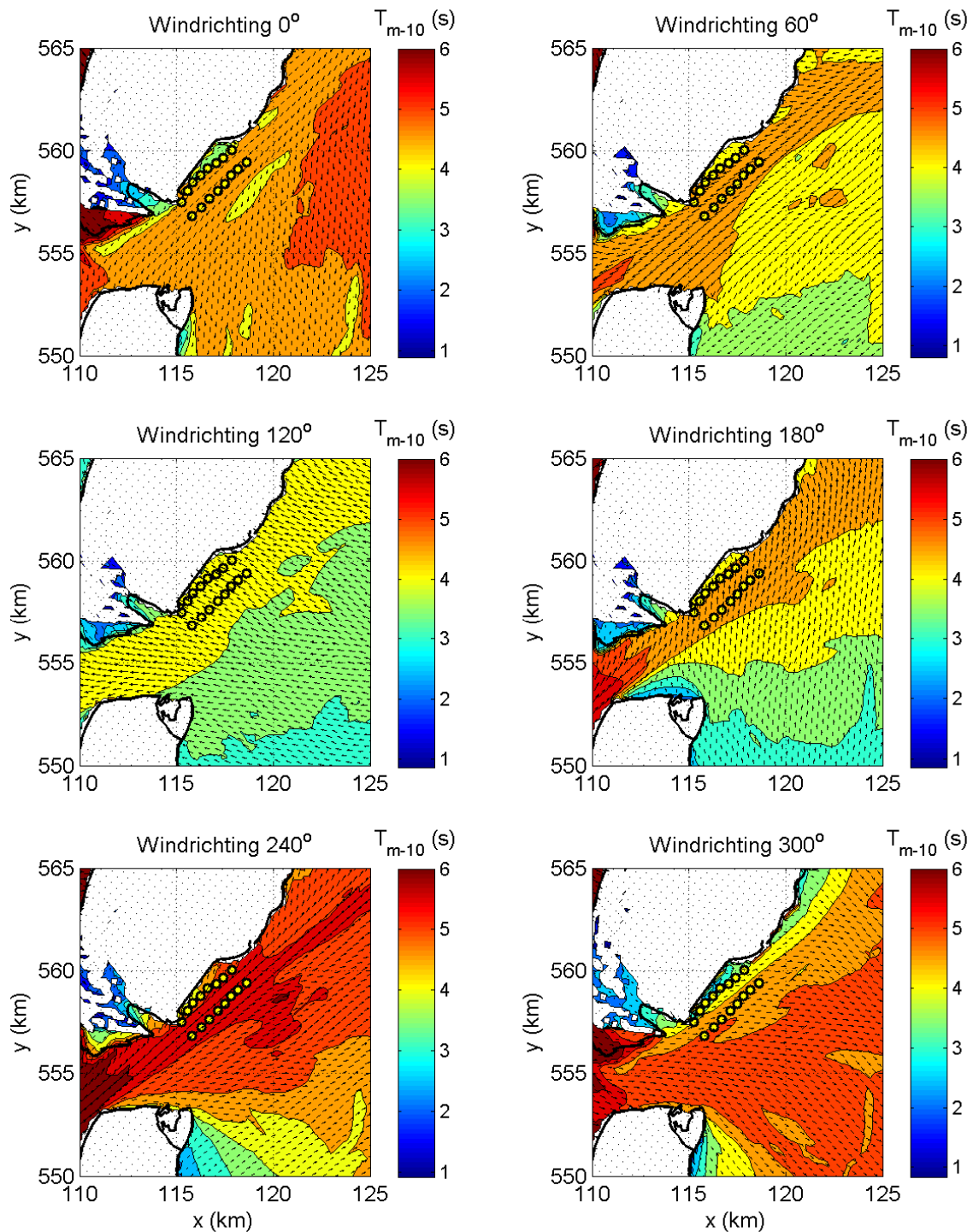
Tenslotte is in deze studie onderzocht wat het effect is van het ontbinden van het 2D-richtingspectrum om alleen componenten in beschouwing te nemen die de kust kunnen bereiken. Deze methode leidt met name voor afluiddige wind condities en voor strijkgolven tot significante reducties in golfrandvoorwaarden. Ook blijkt dat voor sommige condities de golfperiode iets toeneemt. Deze methode is echter nog niet algemeen geaccepteerd en moet daarom met terughoudendheid worden toegepast. Vooral omdat de ontworpen kering ook door latere toetsingen moeten komen. In de nabije toekomst zal deze methode aan de VTV-commissie (Voorschrift voor Toetsing Veiligheid) worden voorgelegd.

## Referenties

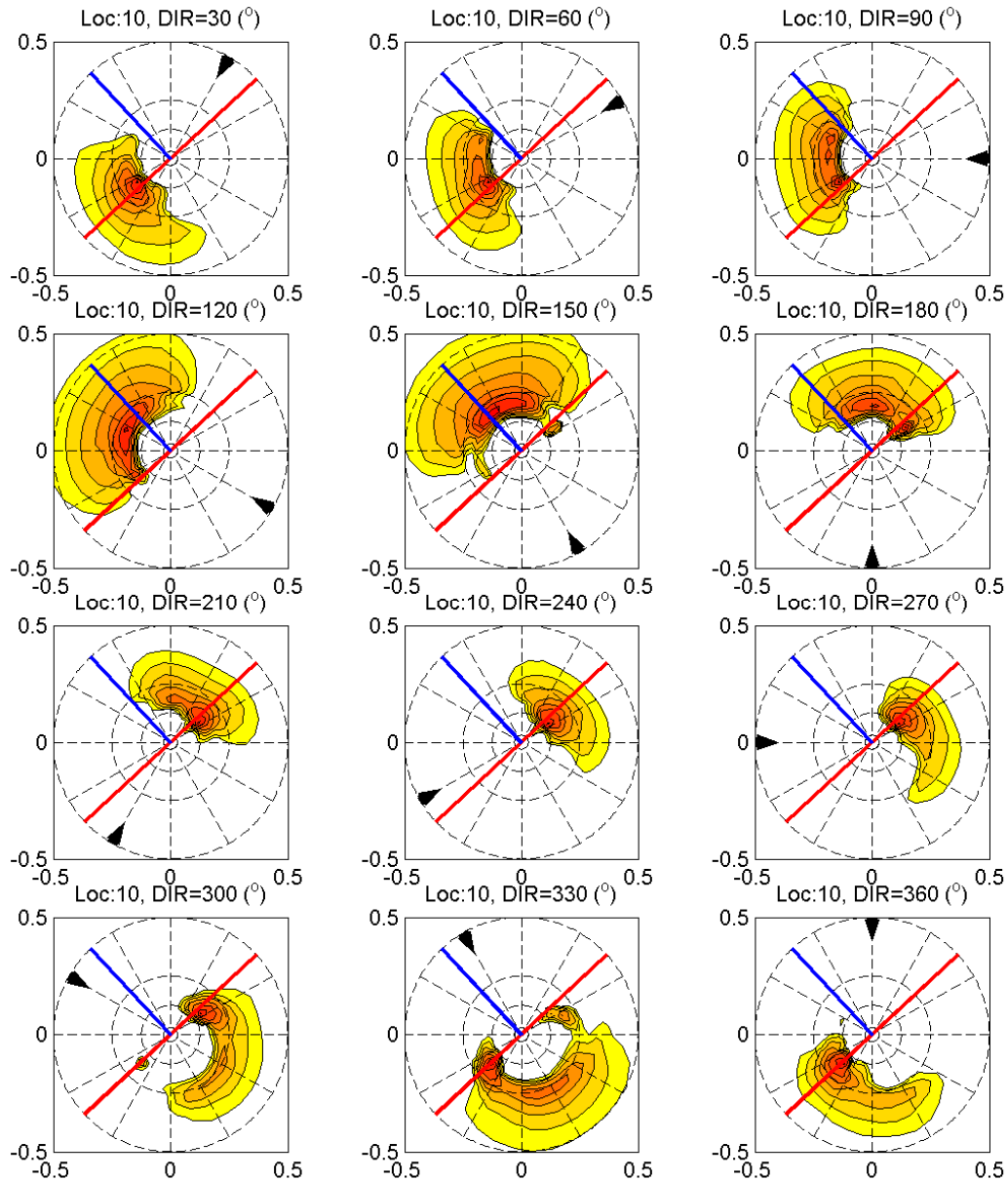
- Alkyon, 1999: SWAN golfberekeningen Waddenzee, rapport A352.
- Alkyon/Arcadis, 2010: Dijkveiligheid Den Oever. Nadere studie naar de effectiviteit van het dammenstelsel. Rapport C03011.0000026. G.Ph. van Vledder, B. van Rijn, en A. Haghgo.
- Arcadis, 2009: Startdocument Hoogwaterkering Den Oever d.d. 3 december 2009 met kenmerk 09.35228.
- Booij, N., R.C. Ris, and L.H. Holthuijsen, 1999: A third-generation wave model for coastal regions – model description and validation. *J. Geophys. Res.* 104, 7649–7666.
- Deltares, 2010: SWAN calibration and validation for HBC2011. Rapport 1200103-020-HYE-0002. C. Gautier.
- RWS, 2000: Richtingafhankelijk extreme waarden voor HW-standen, golfhoogte en golfperiodes. Rapport RIKZ/2000.040, december 2000, A.P. Roskam, J. Hoekema en J.J. W. Seijffert.



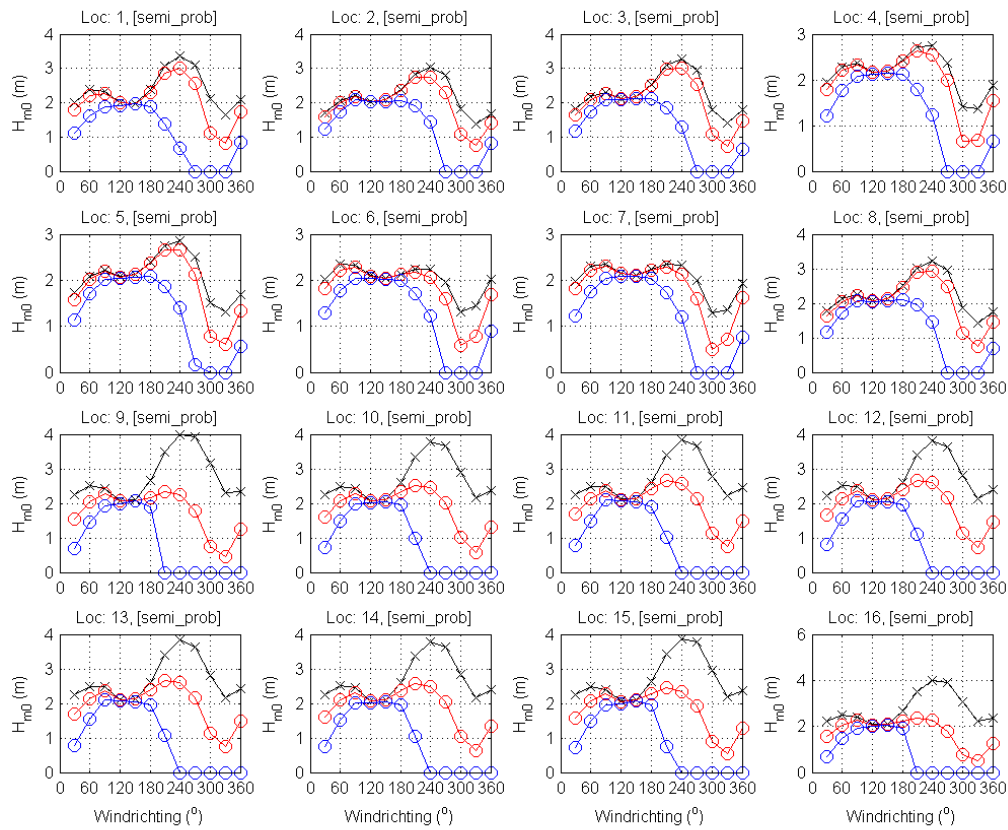
Figuur 3: Ruimtelijke variatie van de significante golfhoogte  $H_{m0}$  voor de windrichtingen 0°, 60°, 120°, 180°, 240°, en 300°. Berekend met SWAN met een windrichtingafhankelijke waterstand inclusief toeslag.



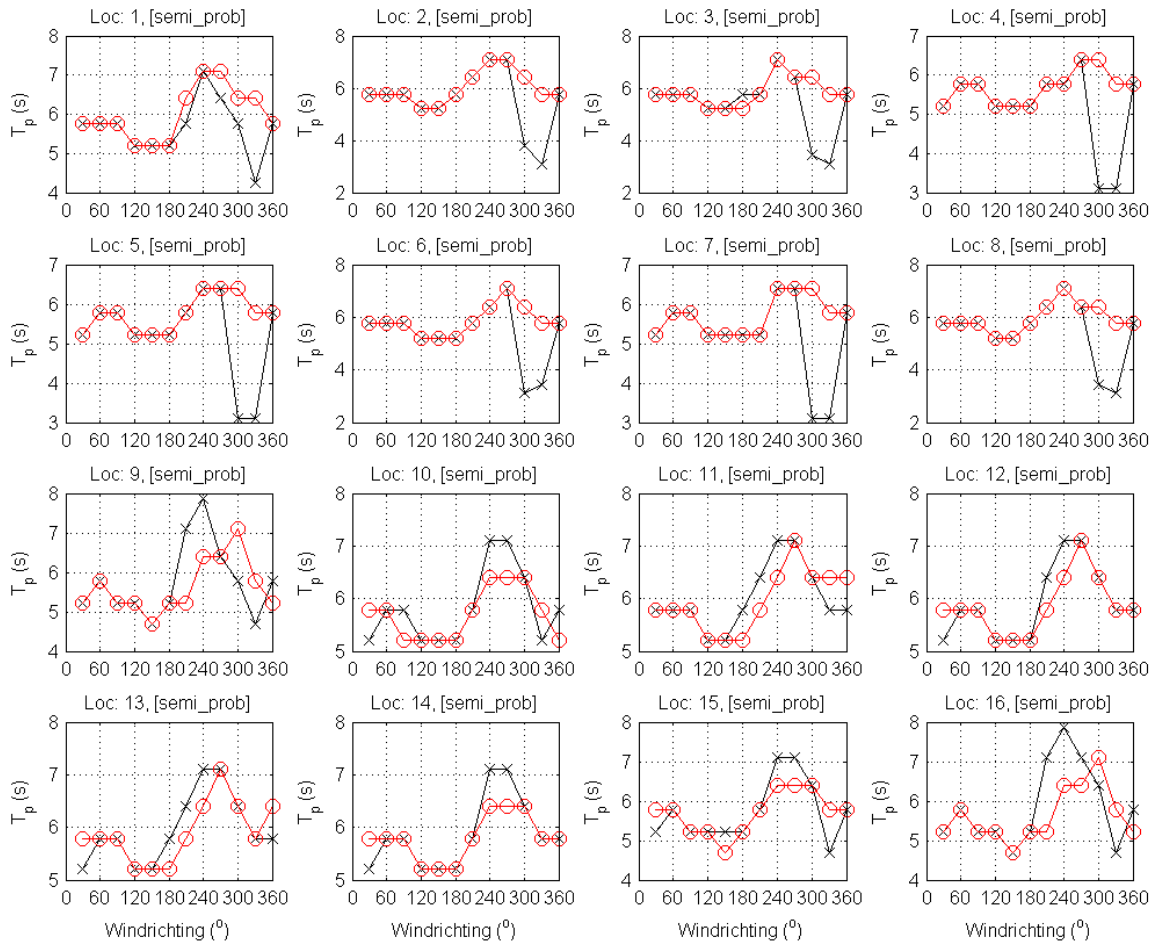
Figuur 4: Ruimtelijke variatie van de spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  voor de windrichtingen 0°, 60°, 120°, 180°, 240°, en 300°. Berekend met SWAN met een windrichtingafhankelijke waterstand inclusief toeslag.



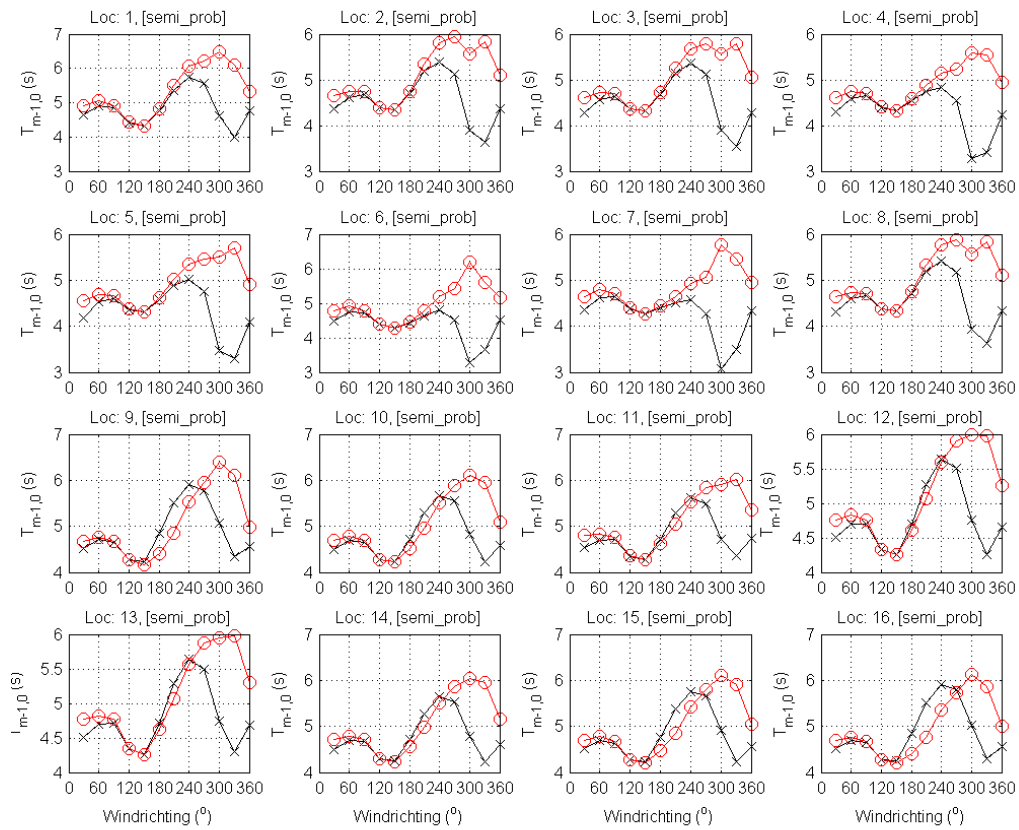
Figuur 6: Genormaliseerde polaire 2D-spectra voor locatie 10. Contourlijnen op de niveaus 0.9, 0.5,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{1}{16}$ ,  $\frac{1}{32}$ ,  $\frac{1}{64}$  en  $\frac{1}{128}$ . Windrichting (zwarte driehoek), kustnormaal (blauwe lijn), kustlangse scheidinglijn (rode lijn). Frequenties in Hz. Berekend met SWAN met windrichtingafhankelijke waterstand inclusief toeslag.



Figuur A1: Variatie significante golfhoogte  $H_{m0}$  voor 16 locaties als functie van de windrichting. Totale golfhoogte (zwarte lijn met kruisjes). Vectoriële invallende golfhoogte (blauwe lijn met bolletjes). Golfhoogte op basis van invallende spectrale componenten (rode lijn met bolletjes). Op basis van SWAN berekeningen met windrichtingafhankelijke waterstand inclusief toeslag.

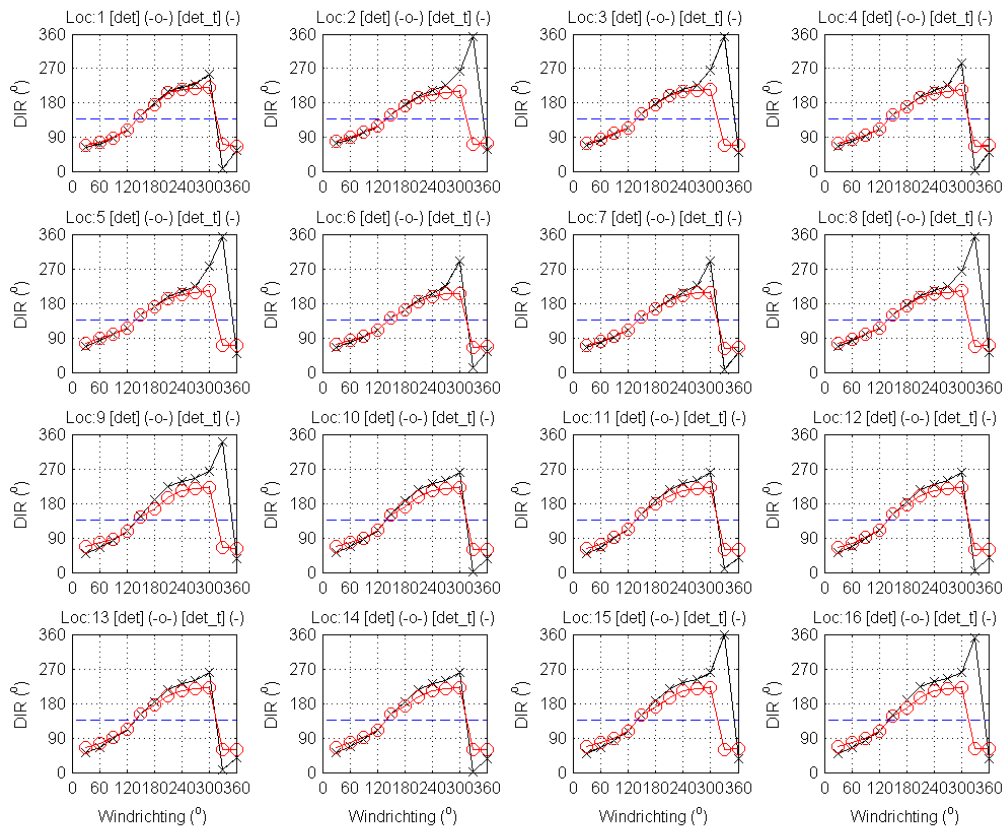


Figuur A2: Variatie piekperiode  $T_p$  voor 16 locaties als functie van de windrichting. Totale periode (zwarte lijn met kruisjes). Golfperiode op basis van invallende spectrale componenten (rode lijn met bolletjes). Op basis van SWAN berekeningen met windrichtingafhankelijke waterstand inclusief toeslag.

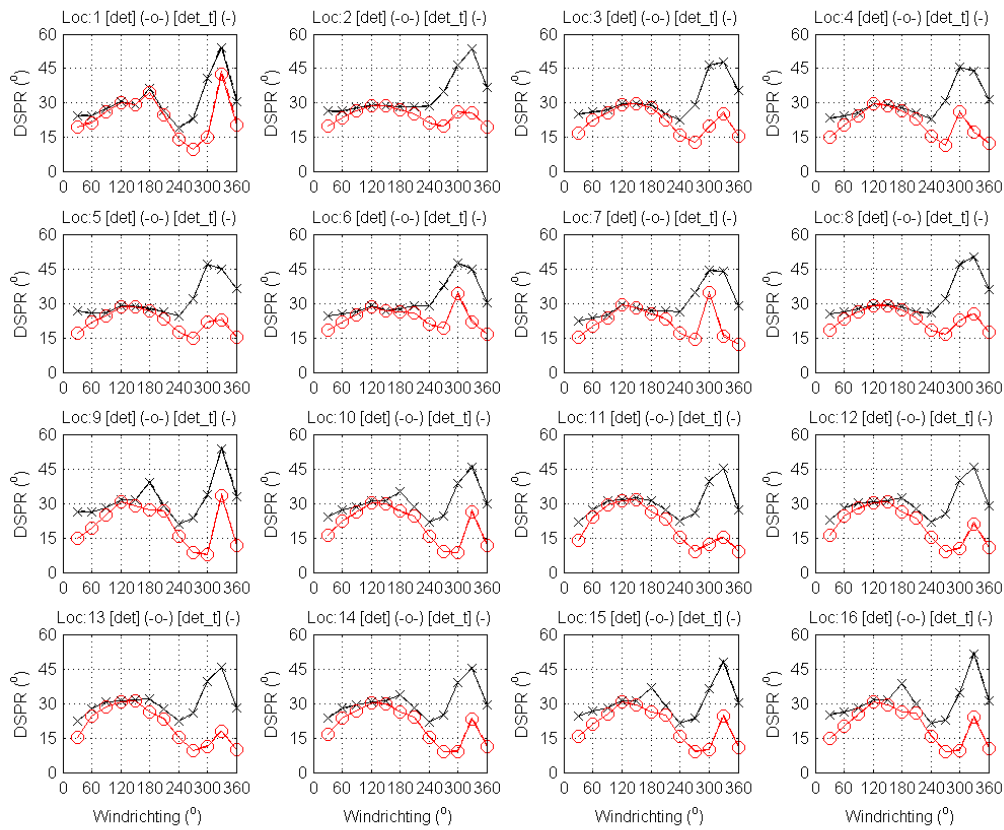


Figuur A3: Variatie spectrale periode  $T_{m-1,0}$  voor 16 locaties als functie van de windrichting. Totale periode (zwarte lijn met kruisjes). Golfperiode op basis van invallende spectrale componenten (rode lijn met bolletjes). Op basis van SWAN berekeningen met windrichtingafhankelijke waterstand inclusief toeslag.

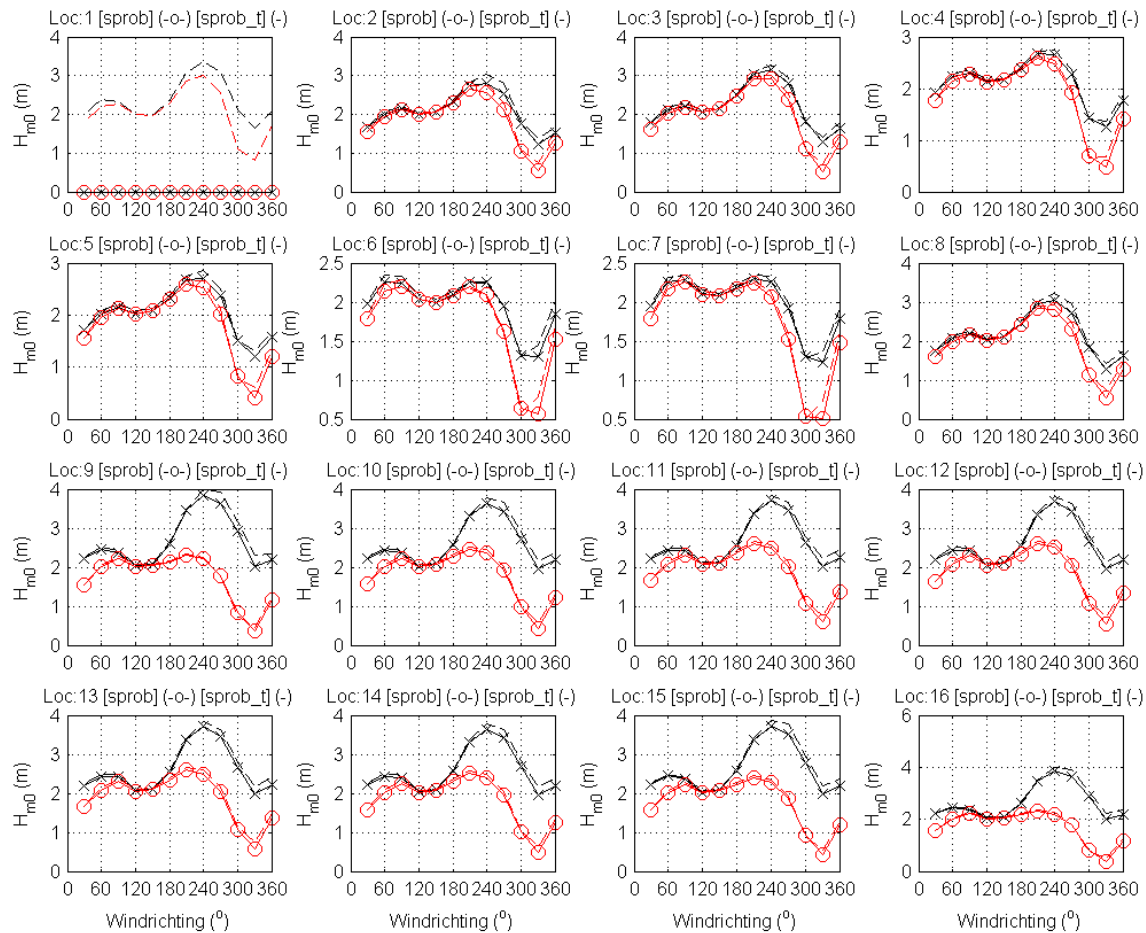




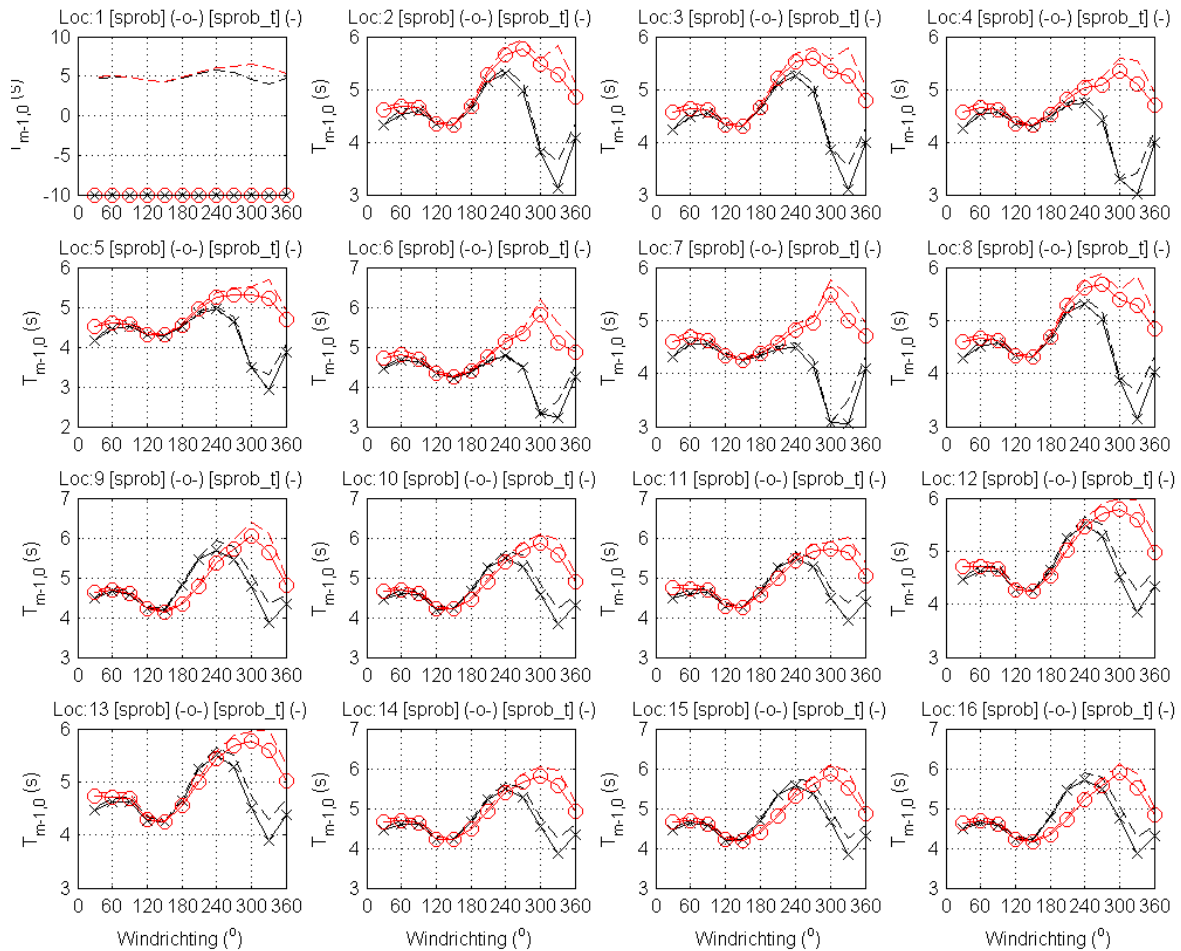
Figuur A4: Variatie gemiddelde golfrichting DIR voor 16 locaties als functie van de windrichting. Totale gemiddelde golfrichting (zwarte lijn met kruisjes). Golfrichting op basis van invallende spectrale componenten (rode lijn met bolletjes). Op basis van SWAN berekeningen met windrichtingafhankelijke waterstand inclusief toeslag.



Figuur A5: Variatie richtingspreiding DSPR voor 16 locaties als functie van de windrichting. Totale periode (zwarte lijn met kruisjes). Richtingspreiding op basis van invallende spectrale componenten (rode lijn met bolletjes). Op basis van SWAN berekeningen met windrichtingafhankelijke waterstand inclusief toeslag.



Figuur B1: Variatie significante golfhoogte  $H_{m0}$  voor 16 locaties als functie van de windrichting. Totale golfhoogte (zwarte lijn met kruisjes). Vectorieel invallende golfhoogte (blauwe lijn met bolletjes). Golfhoogte op basis van invallende spectrale componenten (rode lijn met bolletjes). Op basis van SWAN berekeningen met windrichtingafhankelijke waterstand zonder (lijnen met symbolen) en inclusief toeslag (gestreepte lijnen). NB: Voor locatie 1 bleek het punt deels droog te vallen bij de laagste waterstand waardoor SWAN niet goed kon interpoleren.



Figuur B2: Variatie spectrale golfperiode  $T_{m-10}$  voor 16 locaties als functie van de windrichting. Totale golfhoogte (zwarte lijn met kruisjes). Vectoriël invallende golfhoogte (blauwe lijn met bolletjes). Golfhoogte op basis van invallende spectrale componenten (rode lijn met bolletjes). Op basis van SWAN berekeningen met windrichtingafhankelijke waterstand zonder (lijnen met symbolen) en inclusief toeslag (gestreepte lijnen).



## ARCADIS

	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
H_tot	2.24	2.49	2.41	2.07	2.11	2.61	3.35	3.77	3.65	2.89	2.16	2.37
H_inv	1.59	2.07	2.29	2.06	2.10	2.33	2.53	2.44	2.02	1.01	0.57	1.30
T_tot	4.5	4.7	4.6	4.3	4.2	4.7	5.3	5.7	5.6	4.8	4.2	4.6
T_inv	4.7	4.8	4.7	4.3	4.2	4.5	5.0	5.5	5.9	6.1	6.0	5.1
DIR_tot	49	64	85	114	153	189	218	232	241	259	1	35
DIR_inv	66	77	90	114	152	176	200	213	218	221	61	60
SPR_tot	24	28	30	31	30	33	27	22	25	38	46	30
SPR_inv	15	22	28	31	29	26	23	15	9	9	27	11

Golfcondities voor uitvoerpunt 10

Locatie x=117140 (m), y=558040 (m)

Tabel A1: Berekende golfparameters voor locatie 10 voor alle windrichtingen. Op basis van SWAN berekeningen met een windrichting afhankelijk van waterstand inclusief toeslag.



# ARCADIS

	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
H_tot	2.53	2.86	2.81	2.36	2.28	2.8	3.54	3.82	3.71	2.92	2.18	2.47
H_inv	1.81	2.44	2.68	2.34	2.26	2.48	2.65	2.46	2.05	1.02	0.57	1.34
T_tot	4.9	5.1	5.1	4.6	4.4	4.9	5.5	5.7	5.6	4.9	4.2	4.7
T_inv	5.1	5.3	5.2	4.6	4.4	4.7	5.1	5.6	5.9	6.2	6	5.2
DIR_tot	51	67	85	108	152	185	217	232	240	259	1	36
DIR_inv	67	78	90	109	150	171	197	212	218	221	61	61
SPR_tot	24	27	29	31	31	35	29	22	24	38	46	30
SPR_inv	16	22	26	30	30	26	24	16	9	9	27	12
TP_tot	5.8	5.8	5.8	5.8	5.2	5.8	5.8	7.1	7.1	6.4	4.7	5.8
TP_inv	5.8	5.8	5.8	5.8	5.2	5.2	5.8	6.4	6.4	6.4	5.8	5.8

Golfcondities voor uitvoerpunt 10 Deterministisch

Locatie x=117140 (m), y=558040 (m)

Tabel B1: Berekende golfparameters voor locatie 10 voor alle windrichtingen. Op basis van SWAN berekeningen met een constante waterstand van NAP + 5.20 (is inclusief toeslag).





## **BIJLAGE III HISTORISCHE KUSTONTWIKKELING ZUIDKUST TEXEL**



Witteveen+Bos  
Van Twickelostraat 2  
Postbus 233  
7400 AE Deventer  
telefoon 0570 69 79 11  
telefax 0570 69 73 44  
www.witteveenbos.nl

onderwerp historische kustontwikkeling zuidkust Texel  
project planstudie dijkversterking Waddenzeedijk Texel  
zandige oplossing Prins Hendrik polder  
opdrachtgever HHNK  
projectcode EDM70-5  
referentie EDM70-5/rijm3/015  
opgemaakt door B.A.D. van Veen  
goedgekeurd door ir. M.H.P. Jansen  
status definitief  
datum opmaak 25 augustus 2011  
bijlagen -

paraaf



---

aan	Witteveen+Bos	H. Helder
aan	HHNK	C. Reuther
		M. Schotvanger
		R. Joosten
		B. Kuiper
kopie	Witteveen+Bos	S. Pwa
		B. van den Berg

---

## 1. INLEIDING

### 1.1. Achtergrond

In het bestuurlijk overleg van 19 oktober jl. is besloten om, wat betreft de zienswijze van de gemeente Texel c.s., een extra variant voor sectie 9, de zeewering van de Prins Hendrikpolder, volwaardig in het MER te onderzoeken. De extra variant is een zandige zeewaartse oplossing. De gemeente Texel is van mening dat een zandige oplossing makkelijk te onderhouden en eventueel te verhogen is. Op uitdrukkelijk verzoek van de gemeente Texel is de zandige oplossing in het MER meegenomen. Het bestuurlijk overleg heeft de volgende uitgangspunten voor deze variant meegegeven:

- het betreft een zandige oplossing in het gedeelte tussen de huidige dijk en de diepe geul voor de kust;
- de zandige oplossing is een volwaardige primaire waterkering en vervangt dus de huidige dijk.

De zeedijk van Prins Hendrikpolder heeft een lengte van circa 3.200 m (DP 3.0 - DP 6.2). De geul van de Texelstroom ligt meer dan 400 m uit de dijk. Omdat de Texelstroom de neiging heeft om dichters langs de kant te gaan lopen is door Rijkswaterstaat langs de geul een erosiebescherming aangebracht die voortdurend wordt uitgebreid en onderhouden (dijkbeheerder). Tussen de dijk en de geulwandbestorting ligt een ondiep plateau (tot circa

NAP - 1 m aan de buitenzijde van de steenstorting). Dit plateau tussen de Prins Hendrikdijk en de getijdegeul Texelstroom beslaat een oppervlakte van ongeveer 200 hectare.

Aan de zuidzijde sluit de dijk van dijksectie 9 aan op de inlaatdijk 't Horntje en aan de noordzijde op de Westdijk. In dijksectie 9 bevinden zich één kunstwerk en één leiding: gemaal Prins Hendrikpolder (115k1) en een waterleiding (115k).

In de tweede toetsronde scoorde (gedeelten van) dijksectie 9 onvoldoende voor de volgende faalmechanismen: erosie buitentalud, afschuiven binnentalud, micro-instabiliteit, afschuiven binnentalud (binnenberm) en piping. Derhalve is dit dijkvak opgenomen in het landelijk Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP).

## **1.2. Doel van deze notitie**

Op 16 juni 2011 zijn de tussenresultaten van de zandige oplossing gepresenteerd. De zandige oplossing bestaat uit 2 delen een zandbuffer en een slijtlaag. De zandbuffer is nodig om voldoende veiligheid te garanderen tijdens maatgevende stormomstandigheden en een slijtlaag is nodig om het verlies tot de maatgevende storm op te vangen. In hoofdstuk 2 wordt hier nader op ingegaan.

Doel van deze notitie is om de historische ontwikkeling te beschrijven en een kwalitatieve analyse uit te voeren over de te verwachten processen en ontwikkelingen in het gebied.

## **1.3. Leeswijzer**

In hoofdstuk 2 bespreken we kort de beschikbare gegevens. Vervolgens geven we in hoofdstuk 3 een historische beschrijving van de ontwikkelingen van de zuidkust van Texel in het algemeen en het gebied rond de Prins Hendrikdijk, het plateau en de Texelstroom in het bijzonder. In hoofdstuk 4 bespreken we de fysische processen in het gebied die onderliggend zijn aan lokale kusterosie en kustaanwas.

## **2. BESCHIKBARE GEGEVENS**

Er zijn verschillende historische kaarten beschikbaar. Oud kaartmateriaal geeft weinig inzicht in dieptes maar geeft een goed inzicht in algemene ontwikkelingen. Kaartmateriaal is afkomstig van [www.watwaswaar.nl](http://www.watwaswaar.nl) (geraadpleegd in juli 2011).

Uit verschillende bronnen zijn metingen vanaf 1900 gevonden. Pas na 1965 zijn structureel jarkusraaien gemeten en vanaf 1983 vaklodingen:

- metingen in jarkusraaien in 1900, 1965 jaarlijks tot 2010;
- vaklodingen vanaf 1983 tot 2010.

Veel data is niet bruikbaar voor de zandige oplossing omdat de metingen alleen uitgevoerd zijn in de Texelstroom en stoppen bij de plateaurand. Voor deze studie zijn we met name geïnteresseerd in de ontwikkelingen van het plateau tussen de Prins Hendrikpolder en de Texelstroom. In de jaren 1986, 1991, 1997 en 2009 zijn vaklodingen uitgevoerd inclusief het plateau.

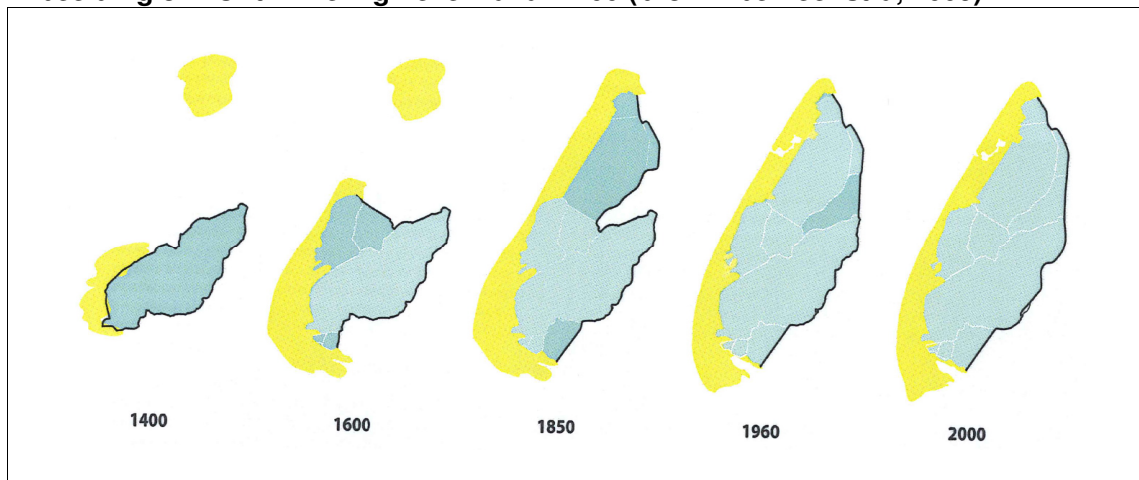
### 3. HISTORISCHE ONTWIKKELING

#### 3.1. Texel en de Prins Hendrikpolder

De basis voor Texel is ontstaan als stuwwal tijdens de voorlaatste ijstijd toen gletsjertongen ondergrond voor zich uitschoven. Vrij dicht aan het oppervlakte bevindt zich kleileem: een dicht, slecht doorlatend mengsel van keien, grind en leem (bron presentatie Abe Veenstra landschapsarchitect).

Tot de Allerheiligenvloed in 1170 maakte Texel deel uit van het vaste land van Noord Holland. Tijdens de vloed brak de duinenrij door waardoor het Marsdiep ontstond en werd Texel een eiland. In de loop der tijd is het eiland mede door menselijk ingrijpen verder ontwikkeld. De ontwikkeling in de tijd is goed weergegeven in afbeelding 3.1.

**Afbeelding 3.1. Ontwikkeling Texel vanaf 1400 (bron: Abe Veenstra, 2009)**



Tussen 1847 en 1848 wordt de Prins Hendrikpolder ingepolderd op een ondiepe vlakte die aan de oostzijde begrensd wordt door de Texelstroom. De noord/westzijde van de polder wordt gevormd door de oude stuwwal die de basis van het eiland Texel vormt.

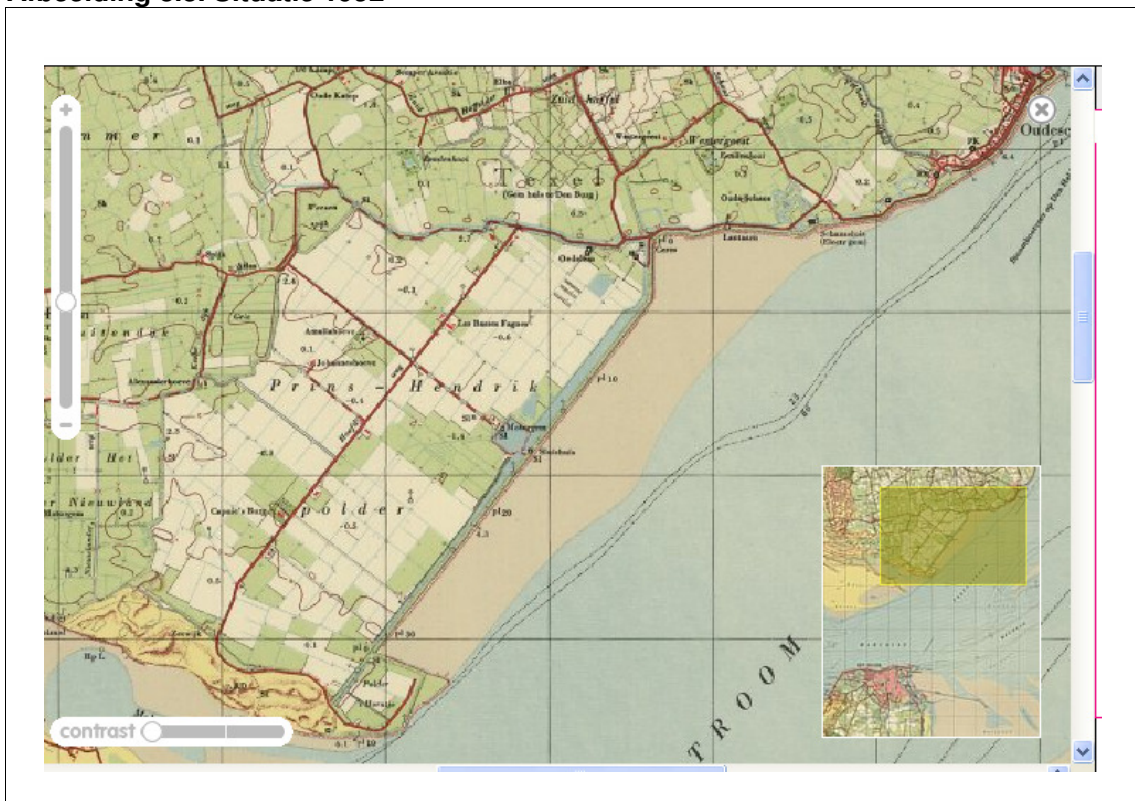
#### 3.2. Plateau en Texelstroom

Afbeeldingen 3.2 tot 3.8 geven de ontwikkeling van het plateau (de vooroever) bij de Prins Hendrikpolder weer vanaf 1850 tot 2009 (bron [www.watwaswaar.nl](http://www.watwaswaar.nl) en Dienst voor het kadaaster en openbare registers, Apeldoorn). In de afbeeldingen is te zien dat het plateau redelijk stabiel is. De Texelstroom snijdt wel in op het kleilemen plateau, maar sprake van flinke achteruitgang is er niet. Sinds de jaren 80 van de vorige eeuw is er geulwandbestorting aanwezig die de Texelstroom verder heeft gestabiliseerd.

Afbeelding 3.2. Situatie 1850



Afbeelding 3.3. Situatie 1952



**Afbeelding 3.4. Situatie 1961**



**Afbeelding 3.5. Situatie 1971**





Afbeelding 3.6. Situatie 1981



Afbeelding 3.7. Situatie 1994



**Afbeelding 3.8. Situatie 2009**



In de figuren is te zien dat het gearceerde gedeelte op het plateau sinds 1850 afneemt in de tijd. Mogelijk dat hiermee het droogvallend gedeelte wordt beschreven en dat dit langzaam afneemt.

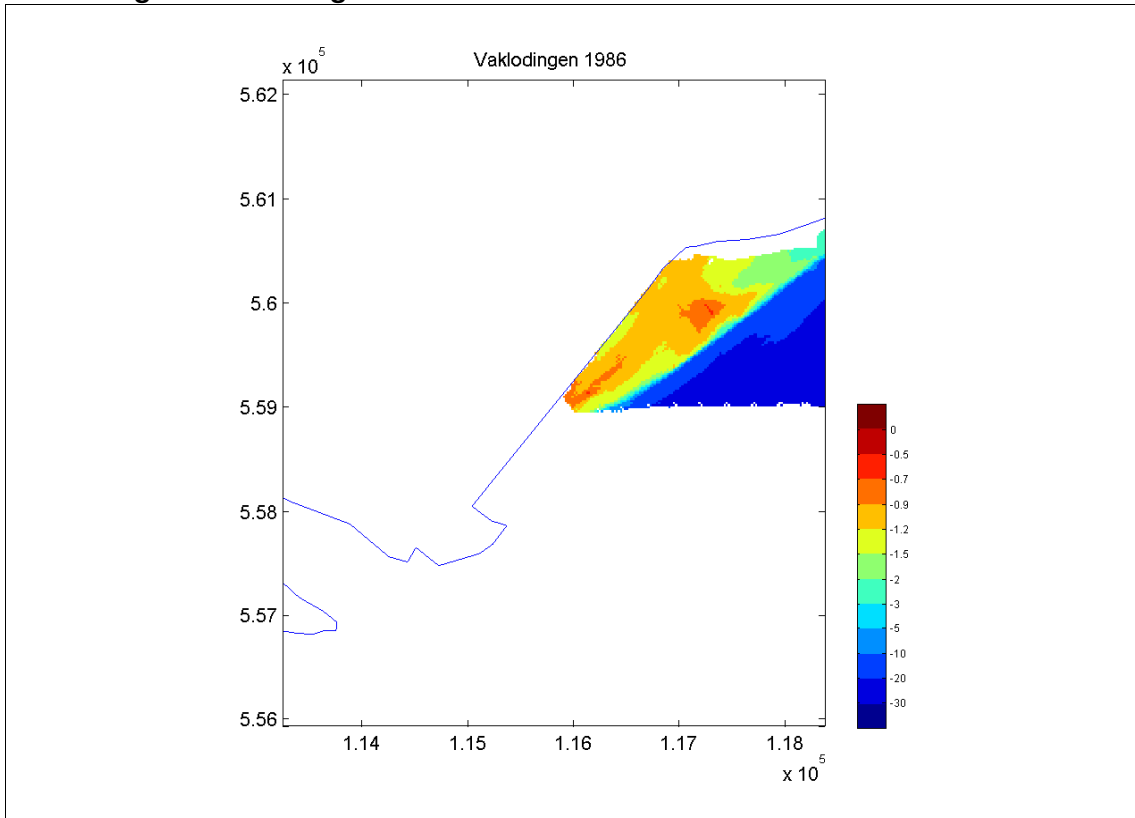
Tevens is te zien dat er op het plateau langs de dijk in de laatste jaren geen significante duinvorming is. Dit kan komen door het ontbreken van voldoende zand, of het ongeschikte morfologische klimaat.

Het vermoeden bestaat dat de Texelstroom in noordelijke richting bijdraait. Dit zou een mogelijk gevolg zijn van de aanleg van de Afsluitdijk in de periode 1927-1932. De aanleg heeft een effect gehad op de geulen van de binnendelta van het zeegat van Texel. Voorheen was de stroming door het Zeegat van Texel hoofdzakelijk west-oost, na de aanleg van de Afsluitdijk is dat meer zuidwest-noordoost. Dit aanpassingsproces duurt waarschijnlijk nog enkele decennia.

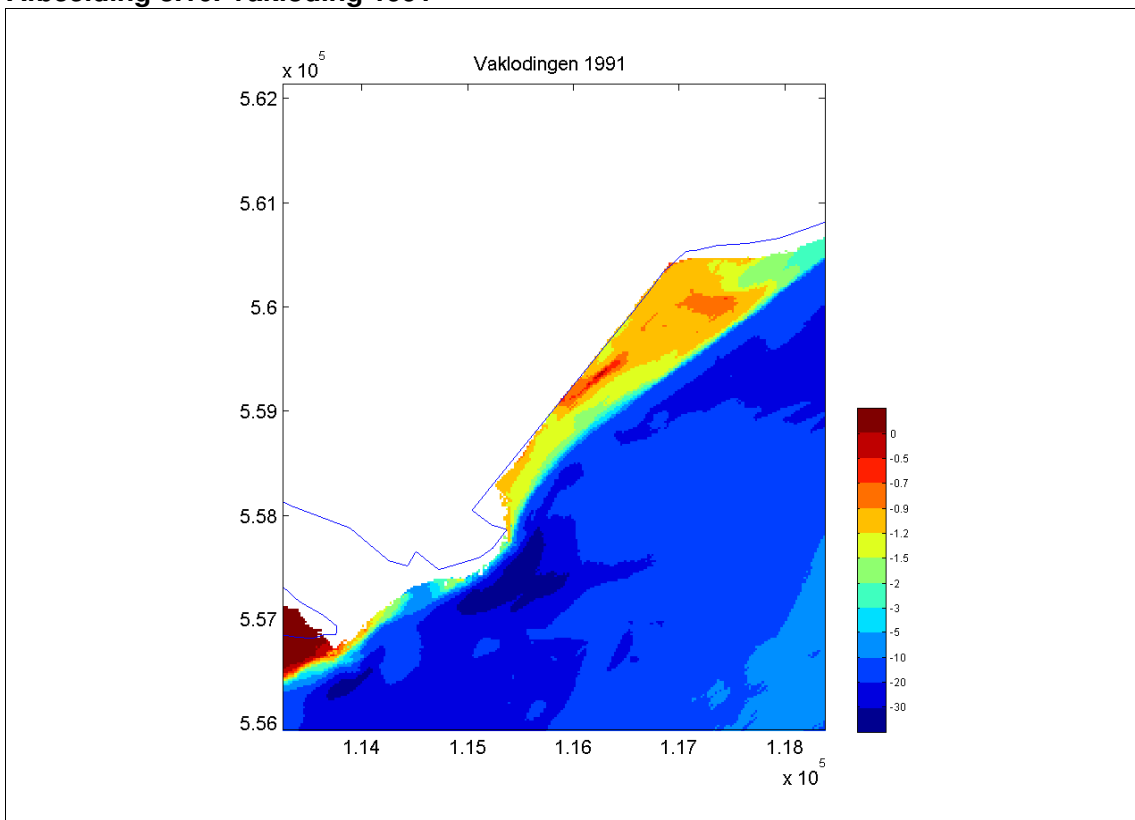
### **3.3. Recente ontwikkeling**

In de afbeeldingen 3.9 t/m 3.12 is te zien dat de Texelstroom zeer dynamisch is en het plateau redelijk stabiel. In de figuren is ook te zien dat het plateau onderhevig is aan lichte erosie. Het plateau ligt op een diepte van NAP - 2 m tot NAP - 1 m.

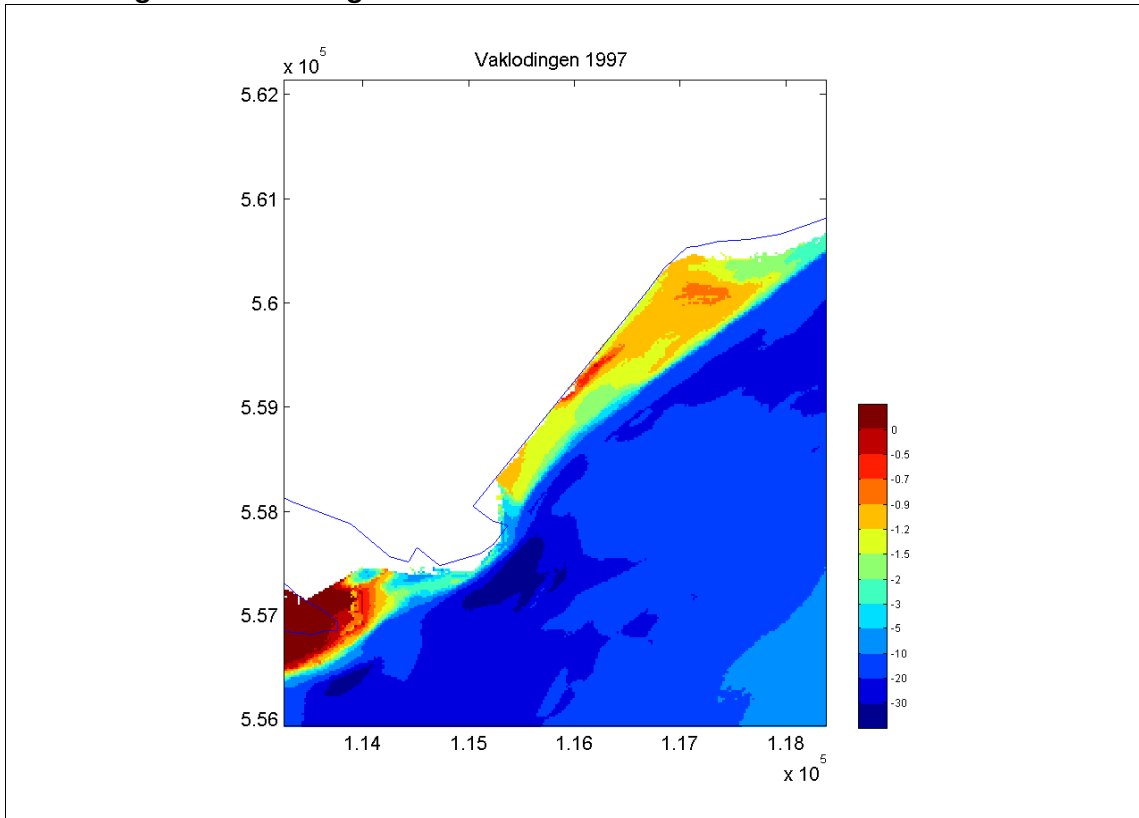
**Afbeelding 3.9. Vakloding 1986**



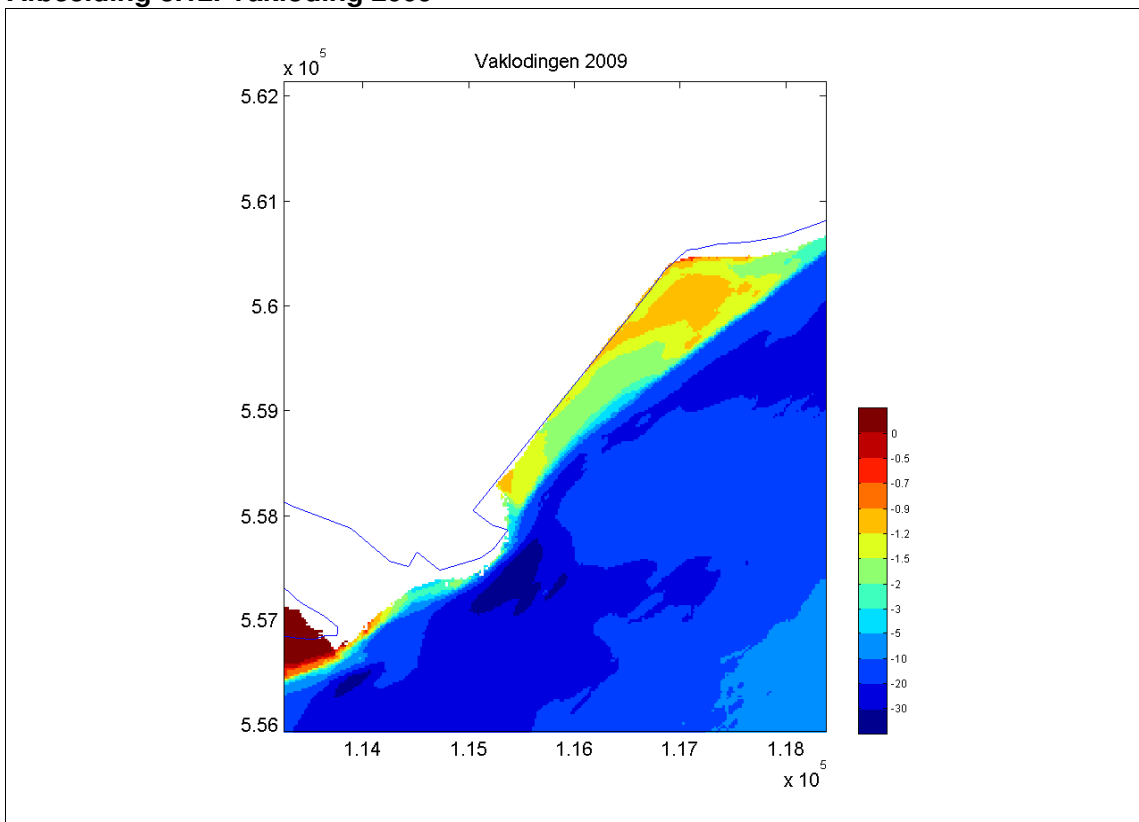
**Afbeelding 3.10. Vakloding 1991**



**Afbeelding 3.11. Vakloding 1997**



**Afbeelding 3.12. Vakloding 2009**



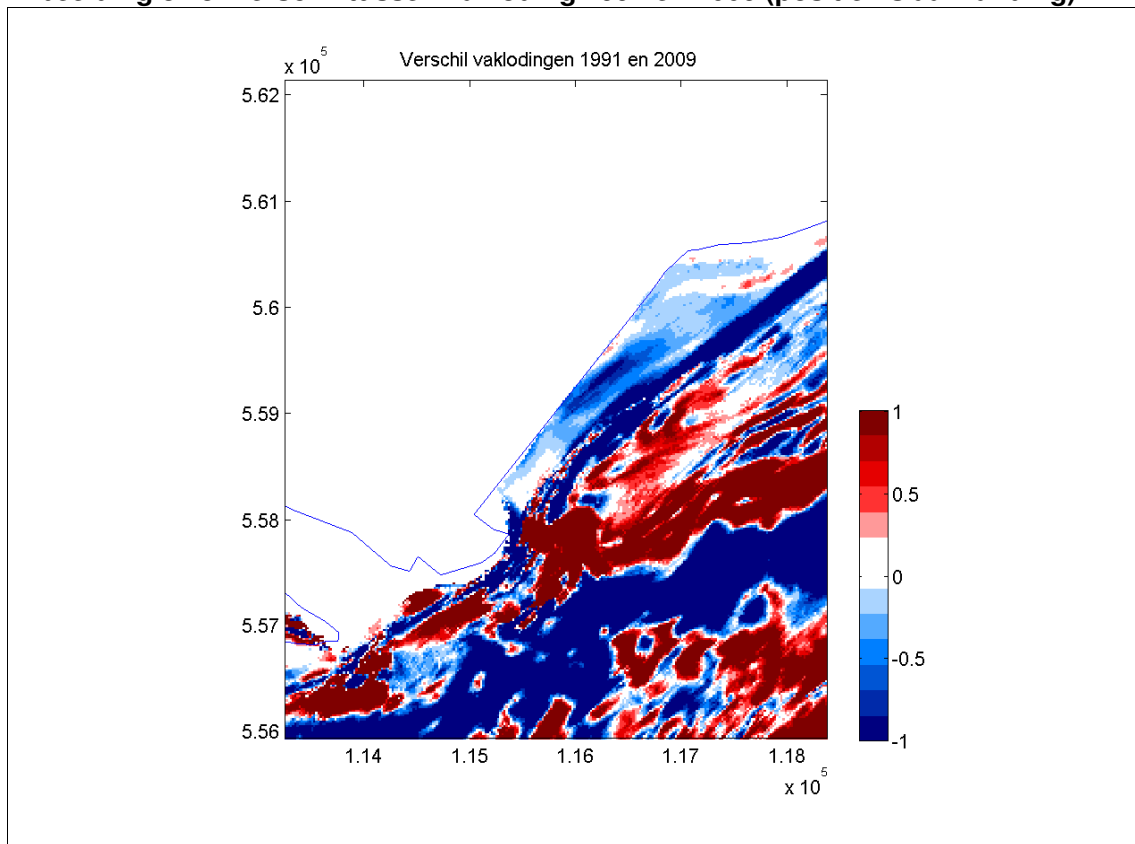
In afbeelding 3.13 is het verschil tussen de vaklodingen van 1991 en 2009 gepresenteerd. Hierin is in blauw erosie aangegeven en in rood sedimentatie.

In deze afbeelding is te zien dat op het plateau voor een groot gedeelte sprake is van erosie en aan zuid- en noordkant consolidatie plaatsvindt. De erosie is grotendeels lager dan 0,5 m in 18 jaar, wat gekenmerkt kan worden als zeer licht mate van erosie.

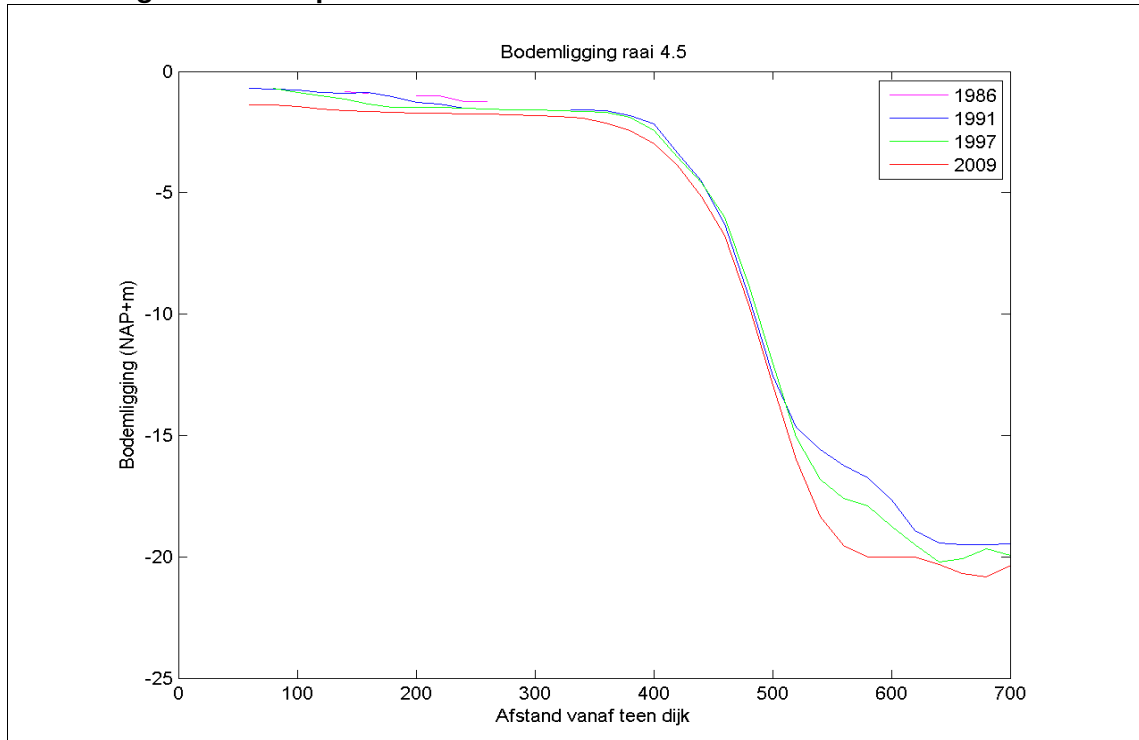
In afbeelding 3.13 is ook duidelijk het dynamische gedrag van de Texelstroom te zien en de erosie van de plateaurand. Dit geeft het insnijden van de Texelstroom weer.

In afbeelding 3.14 en 3.15 is het dwarsprofiel van raai 4.5 weergegeven. Ook hierin is te zien dat de bodem op het plateau erodeert en de geulwand langzamerhand opschuift. In afbeelding 3.15 is verder ingezoomd op het plateau.

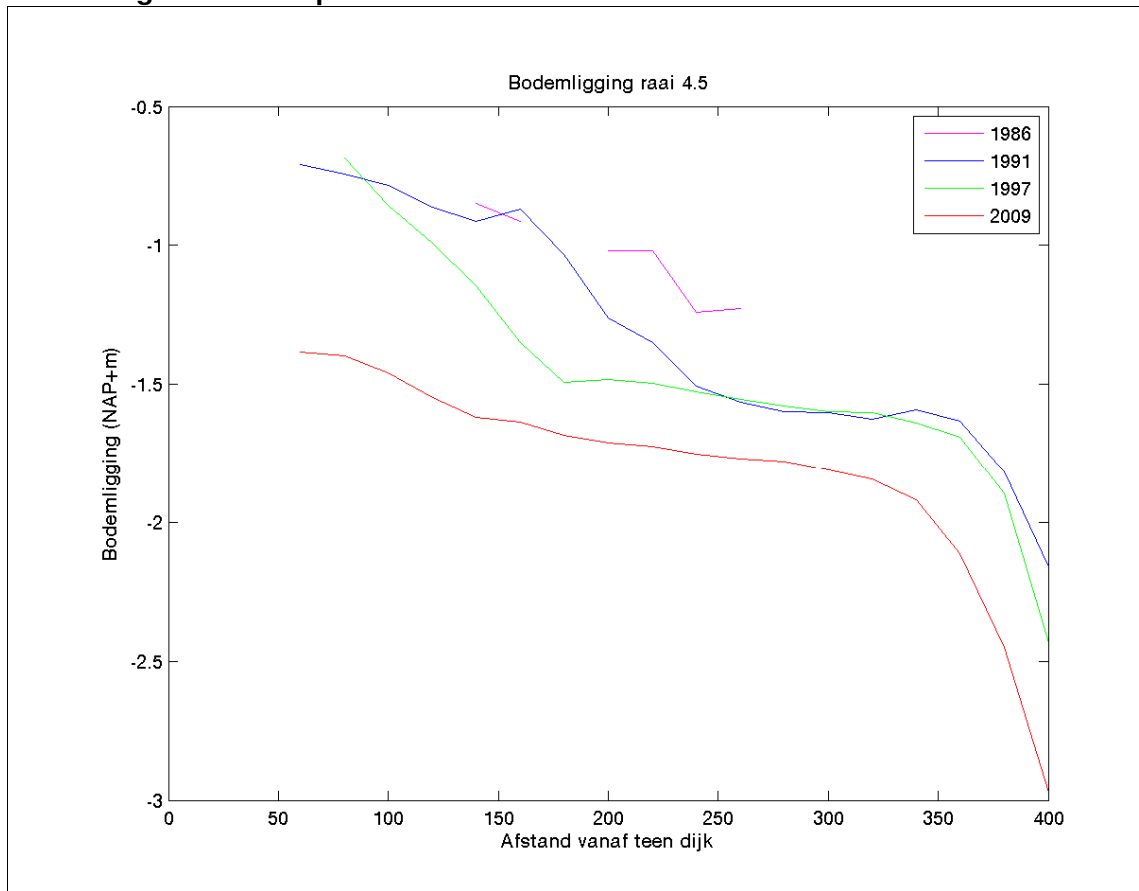
**Afbeelding 3.13. Verschil tussen vakloding 1991 en 2009 (positief is aanzanding)**



**Afbeelding 3.14. Dwarsprofiel van raai 4.5**



**Afbeelding 3.15. Dwarsprofiel van raai 4.5**



### **3.4. Conclusies**

Historische analyse op basis van topografische kaarten en analyse van de vaklodingen in de laatste 20 jaar geven aan dat het plateau licht erodeert. Deze morfologische veranderingen zijn echter gering in verhouding tot het dynamische gedrag van de Texelstroom. In de laatste 20 jaar is de erosie in grote gedeelten minder dan 0,5 m. Wellicht dat de oorzaak hiervan het vastleggen van de geulwand van de Texelstroom is.

## **4. PROCESSEN**

### **4.1. Inleiding**

In dit hoofdstuk geven we een kwantitatieve analyse met betrekking tot de processen die ten grondslag liggen aan het te verwachten sedimenttransport ter hoogte van de Prins Hendrikpolder. Hierbij gaan we er dan ook vanuit dat de zandige oplossing aanwezig is. Zolang er geen zand aanwezig is, is er immers ook geen sedimenttransport mogelijk. De hier gegeven beschrijving is gebaseerd op 'expert judgement'.

Sedimenttransport vindt op een aantal wijzen plaats:

- transport als gevolg van wind;
- transport als gevolg van golven;
- transport als gevolg van stroming.

Na aanleg van de zandige oplossing zal sedimenttransport plaatsvinden onder invloed van alle bovengenoemde transporten.

Bij het sedimenttransport kan onderscheid gemaakt worden tussen het transport boven de waterspiegel (windtransport), in de brekerzone (voornamelijk golven) en op dieper water (golven en stroming).

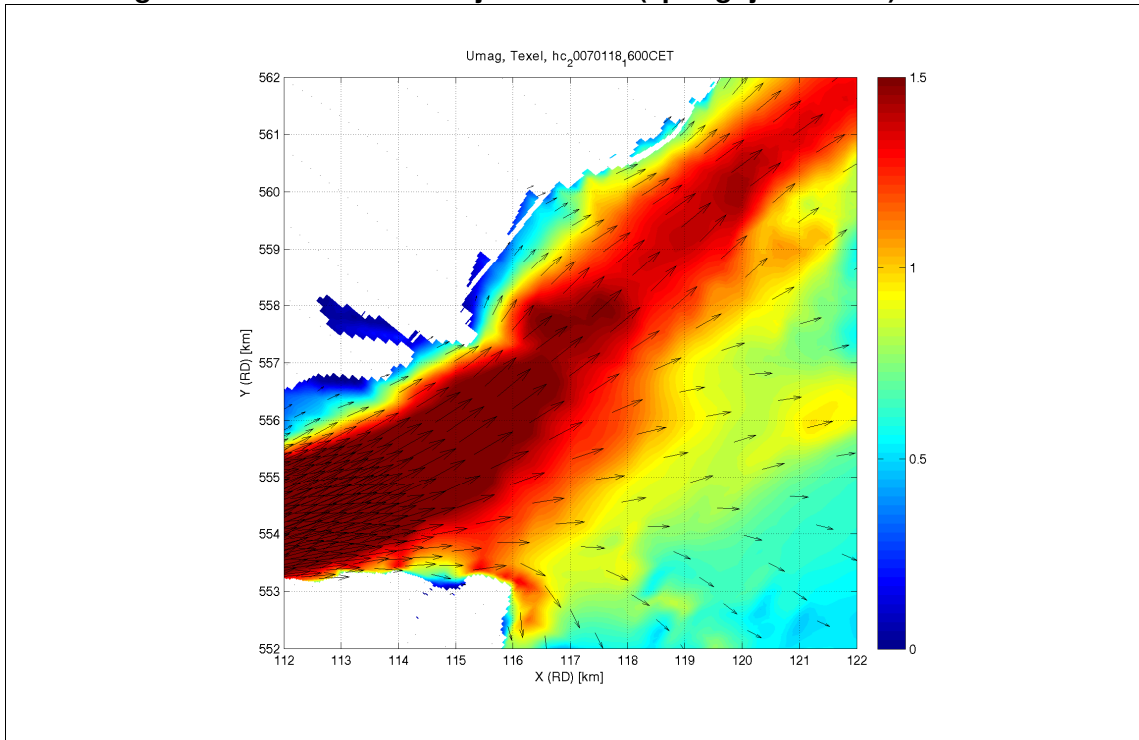
We geven hier allereerst een korte beschrijving van de hydraulische processen die ten grondslag liggen aan het sedimenttransport op het plateau. Vervolgens geven we een kwantitatieve analyse van het sedimenttransport zelf. Tot slot beschrijven we de conclusies die uit deze analyse volgen.

### **4.2. Beschrijving hydraulische processen**

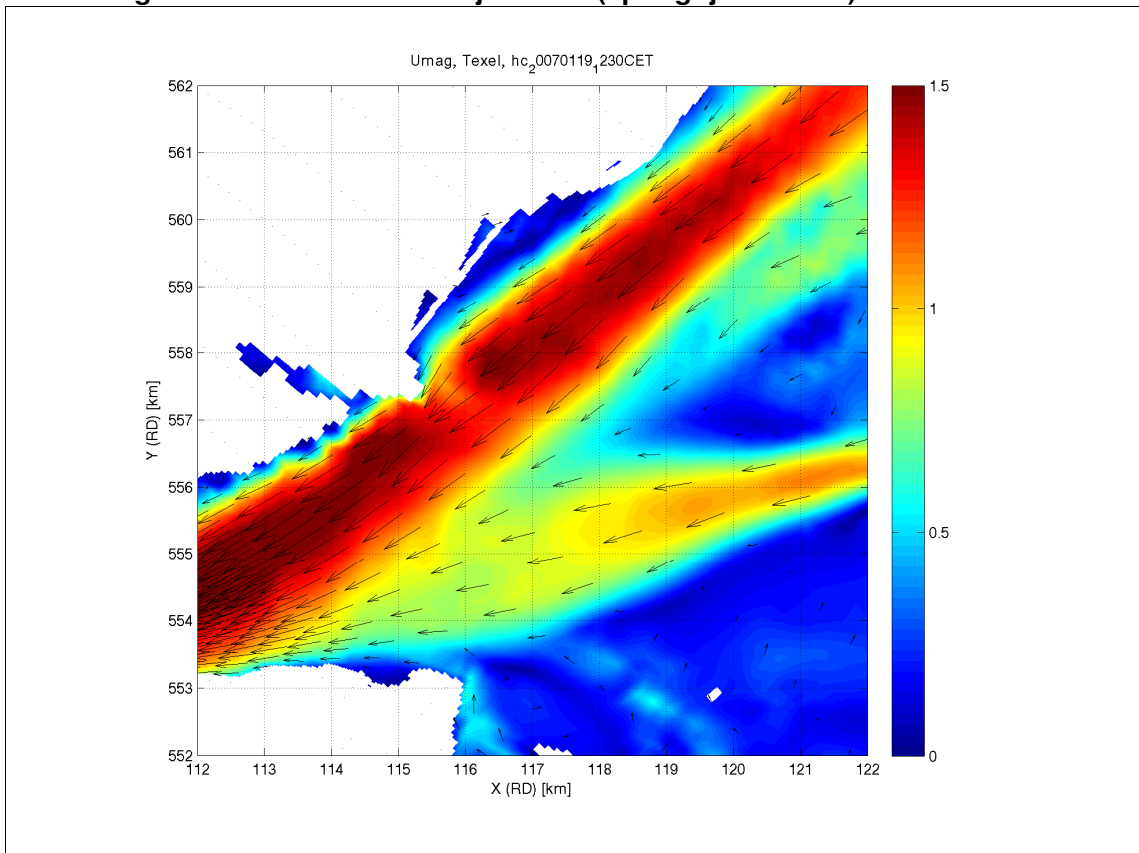
#### **4.2.1. Getijgedreven stroming**

In afbeeldingen 4.1 en 4.2 zijn een karakteristieke vloed en eb situatie gepresenteerd voor springtij condities. Dit is nog zonder zandige oplossing.

**Afbeelding 4.1. Stroomsnelheden tijdens vloed (springtij condities)**



**Afbeelding 4.2. Stroomsnelheden tijdens eb (springtij condities)**





In de afbeeldingen is te zien dat de voornaamste stroming plaatsvindt in de diepe geul. Op het plateau zijn de stroomsnelheden significant lager en zijn maximaal circa 0,5-0,6 m/s. Nabij de kustlijn zijn de stroomsnelheden verder afgenomen. Hier is tijdens vloed echter wel een duidelijke toename in langsrichting te zien.

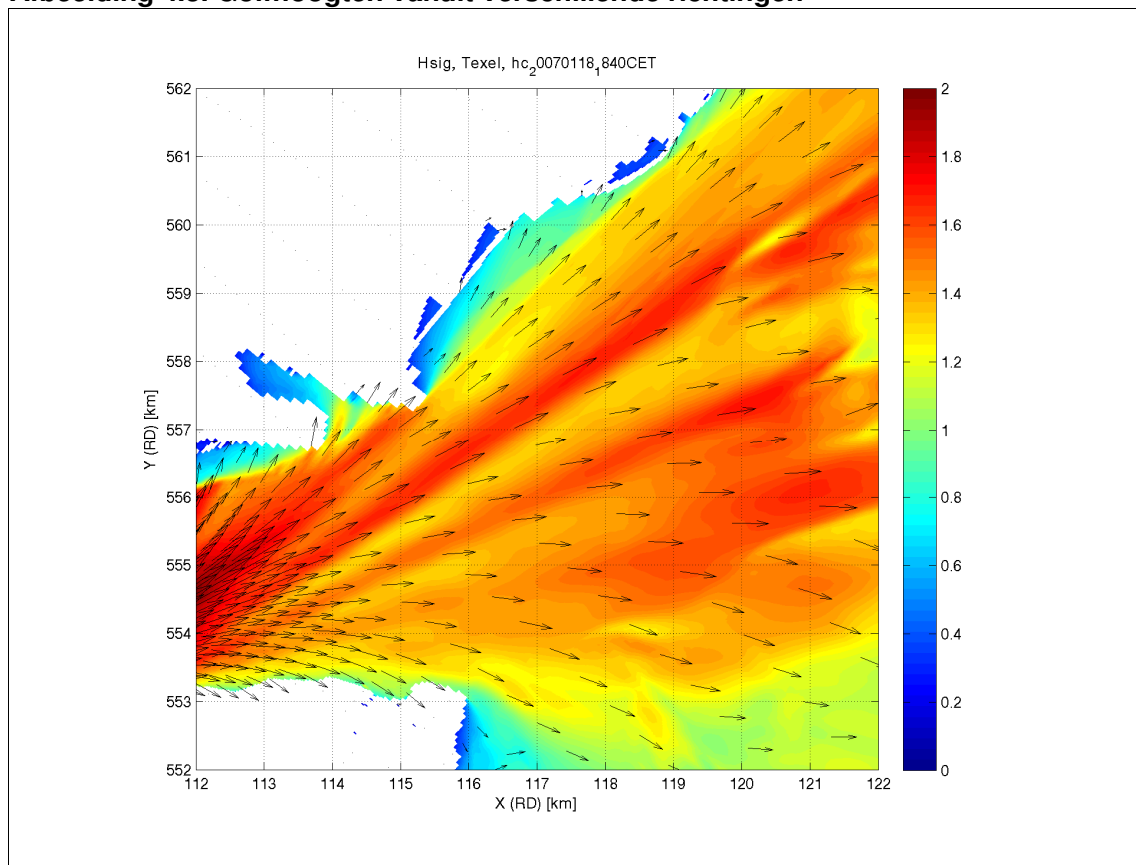
Stroming zal zorgen voor extra transport van sediment in langsrichting, sediment aanvoeren en afvoeren naar en van het gebied. Gezien de huidige morfologische ontwikkeling (zie hoofdstuk 3) zal het om kleine hoeveelheden gaan die netto in of uit het gebied getransporteerd worden. Om de onzekerheid hierover mee te nemen in de voorspelling zal een extra bandbreedte gehanteerd worden.

#### 4.2.2. Golven

In afbeelding 4.3 zijn golfhoogten en richtingen gepresenteerd voor 1/1 jaar<sup>-1</sup> stormcondities. Golven vanuit het noordoosten tot het zuiden worden vanwege de ligging van het plateau lokaal opgewekt in de westelijke Waddenzee. Door de aanwezigheid van platen in de Waddenzee is de lokale golfgroei beperkt.

Vanuit het zuiden tot het zuidwesten dringen golven vanaf de Noordzee door het Marsdiep naar binnen. Deze golven kunnen als gevolg van diffractie en refractie de zandige oplossing bereiken echter wel onder vrij grote hoek van inval.

**Afbeelding 4.3. Golfhoogten vanuit verschillende richtingen**



### **4.3. Sedimenttransport**

#### **4.3.1. Wind: sedimenttransport boven de waterspiegel**

Boven de waterspiegel vindt voornamelijk transport plaats door wind (eolisch transport). Dit zorgt voor langstransport en transport over de dijk, en in de toekomst het duin.

Eolisch transport is te verdelen in langstransport en dwarstransport.

We verwachten niet dat er door eolisch langstransport zand verloren zal gaan. Gezien de geïsoleerde ligging van het gebied verwachten we dat het zand in het beschouwde gebied zal blijven.

Door eolisch dwarstransport zal zand over de dijk waaien en verdwijnt het uit het beschouwde gebied. Dit dwarstransport vindt met name plaats bij laag water (met zuidelijke en oostelijke wind) wanneer een groot gedeelte van het strand en duin onder invloed van eolisch transport is. Het eolische transport zal flink gereduceerd worden door aanplant van helmgras.

Literatuurstudie zal moeten uitwijzen hoeveel verlies er is als gevolg van eolisch transport.

#### **4.3.2. Golven: sedimenttransport in de brekerzone op het plateau**

De ligging van de brekerzone wordt bepaald door de golfhoogte en ligt tussen waterdiepte tussen 0,7 en 0,5 keer de golfhoogte, het is de zone waar de golven breken. Dit is op het plateau globaal de zone tussen NAP - 1,0 m en NAP + 1,5 m (afhankelijk van de waterstand).

We verwachten dat de golven beperkt van grootte zijn vanwege het voorland dat op NAP - 1,5 m tot NAP - 2,0 m ligt. Bij een waterstand van NAP + 1 m zal dit maximaal  $H_{m0} = 1,5$  m zijn in het middenstuk (vanwege het diepere voorland) en aan noord en zuidzijde zal het maximaal  $H_{m0} = 1,0$  m zijn (omdat de bodemligging hier orde NAP - 1 m is). Tevens zullen de golven een kleine periode hebben omdat ze veelal lokaal opgewekt worden.

De golven vanuit het zuidwesten hebben waarschijnlijk grotere perioden maar vallen onder een grotere hoek in en moeten daarmee verder diffracteren en refracteren.

Dwarstransport zal waarschijnlijk tot weinig verlies leiden. Zolang het sediment niet voorbij de 'closure depth' wordt gebracht (nabij de rand van het plateau) zal dit sediment op het plateau blijven en weer onder invloed van golven en wind richting duin getransporteerd worden. Wel kan het sediment in diepere gedeeltes door stroming getransporteerd worden (zie paragraaf 4.3.3).

Langstransport zal waarschijnlijk wel tot lokaal verlies leiden omdat hierdoor zand verplaatst wordt in zuidelijke en noordelijke richting. Mogelijk kan door ophoping van zand aan de noordelijke en zuidelijke begrenzing van het duin, zand verdwijnen in de Texelstroom.

#### **4.3.3. Stroming: sedimenttransport op relatief dieper water op het plateau**

Golven zorgen op relatief dieper water (onder NAP - 1,0 m) boven het plateau voornamelijk voor opwoeling van sediment. Onder invloed van stroming kan dit sediment verplaatst worden. We verwachten niet dat de stroomsnelheden boven 0,6 m/s komen op het plateau. Het transport is dus waarschijnlijk niet groot, maar kan wel leiden tot een permanent verlies

van sediment. Gezien de circulatiecel ter hoogte van het plateau (uitsluitend stroming in noordelijke richting) is het aannemelijk dat een deel van het sedimenttransport aan de noordzijde in de Texelstroom zal verdwijnen. Waarschijnlijk kan het geleidelijk verlies van sediment (zie hoofdstuk 3) op het plateau toegeschreven worden aan dit transport.

#### **4.3.4. Stroming: sedimenttransport vanuit de Waddenzee (import van sediment)**

Tot nu toe is alleen gesproken over mogelijke verliezen van sediment. Verwacht mag worden dat er (behalve door suppleties) weinig import is van sediment. De stroming over het plateau is redelijk constant en in de afgelopen 20 jaar is er weinig netto sedimentatie in het gebied geweest. Bovendien erodeert de voorliggende geul (de Texelstroom).

De sedimentimport zou misschien kunnen toenemen als door bijvoorbeeld harde constructies (zoals dwarsdammen) meer luwte op het plateau gecreëerd kan worden. Dit ligt echter buiten de scope van het onderzoek.


#### **4.4. Conclusies**

Transport van sediment zal plaatsvinden onder invloed van wind, golven en stroming. We verwachten niet dat deze transporten groot zullen zijn. Wel verwachten we een netto verlies van sediment als gevolg van een combinatie van windtransport over het duin en transport van sediment op het plateau onder invloed van golven en stroming. Er is waarschijnlijk geen natuurlijke bron voor aanvoer van sediment aanwezig.

## BIJLAGE IV SLIJTLAAG DUIN



Witteveen+Bos  
Van Twickelostraat 2  
Postbus 233  
7400 AE Deventer  
telefoon 0570 69 79 11  
telefax 0570 69 73 44  
www.witteveenbos.nl

onderwerp slijtlaag duin  
project planstudie dijkversterking Waddenzeedijk Texel  
zandige oplossing Prins Hendrikpolder  
opdrachtgever hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK)  
projectcode EDM70-5  
referentie EDM70-5/rijm3/013  
opgemaakt door ir. B van Veen/ir. D.W. Dusseljee  
goedgekeurd door ir. M.H.P. Jansen paraaf   
status definitief  
datum opmaak 23 augustus 2011  
bijlagen I overzicht randvoorwaarden SWAN model  
II golfspectrum tijdens stormcondities  
III resultaten SWAN model per raai  
IV resultaten UNIBEST CL+ analyse Deltares

---

aan hoogheemraadschap Hollands  
Noorderkwartier  
kopie Witteveen+Bos

ir. R. Bouw  
ir. S.T. Pwa  
mw. M. Krol MSc

---

## 1. INLEIDING

### 1.1. Achtergrond

De kustverdediging langs de Waddenzeekust van Texel voldoet op veel plaatsen niet meer aan de eisen die aan een primaire waterkering worden gesteld. Verbetering is dus noodzakelijk. Voor sectie 9, de zeewering van de Prins Hendrikpolder, is een alternatieve zandige zeewaartse oplossing voorgesteld als mogelijke oplossing. De zandige zeewaartse oplossing bestaat in het aanbrengen van een duinlichaam over de bestaande harde zeewering.

Diverse ontwerpstappen moeten samen leiden tot een integraal ontwerp van het duin. Eén van de stappen is het bepalen van de zogenoemde 'slijtlaag'. Dit is de laag die mag eroderen totdat er een ontwerpstorm komt. De slijtlaag wordt aangebracht om stabiliteit en veiligheid te garanderen en niet elk jaar te hoeven suppleren. De slijtlaag is de hoeveelheid extra zand dat initieel wordt aangebracht om in de loop van een voorafgestelde onderhoudsperiode te eroderen.

Initiële berekeningen hebben aangetoond dat er een klein langtransport te verwachten is. Uit de 'quick-scan' blijkt daarnaast dat de resultaten gevoelig zijn voor kleine wijzigingen in zowel golfcondities als in kustoriëntatie. Een nauwkeuriger onderzoek is daarom gewenst.

In deze notitie beschrijven wij de resultaten van het onderzoek naar het bepalen van de omvang van de slijtlaag.

## **1.2. Aanpak**

Om de dikte van de slijtlaag van het duin ter plaatse van de Prins Hendrikpolder te bepalen zijn de volgende stappen uitgevoerd:

- bepalen golfcondities met behulp van SWAN;
- bepalen sedimenttransporten met UNIBEST CL+;
- genereren tijdreeksen transporten;
- bepalen dikte slijtlaag.

## **1.3. Leeswijzer**

In hoofdstuk 2 beschrijven we de basisgegevens met betrekking tot wind en waterstanden; deze gegevens vormen de basis voor de berekeningen. De modellen van SWAN en UNIBEST CL+ beschrijven we in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 worden de resultaten in detail beschreven. Tenslotte geven we in hoofdstuk 5 de conclusies van de quick-scan en kijken we nog eens met een kritische blik naar de resultaten.

## **2. BESCHIKBARE GEGEVENS**

### **2.1. Wind**

Windgegevens zijn beschikbaar voor station De Hors. De locatie ten opzichte van het onderzoeksgebied is weergegeven in afbeelding 3.1. Het betreft hier een meetstation op land en ruwe meetgegevens moeten eerst worden vertaald naar openwater condities alvorens de gegevens kunnen worden gebruikt voor invoer voor de bepaling van golfcondities.

**Afbeelding 2.1. Locatie station De Hors ten opzichte van de zandige oplossing**



Windgegevens zijn beschikbaar voor de periode 1981 - 2011 met uitzondering van de periode april 1999 tot januari 2001. De gegevens zijn lineair geïnterpoleerd om een jaar-dekkende tijdreeks te krijgen.

## **2.2. Waterstanden**

Waterstanden nabij het gebied worden bijgehouden in het station Den Helder. Voor de analyse wordt gebruik gemaakt van gegevens met een temporale resolutie van 10 minuten voor de periode 1981 - 2011 (30 jaar).

## **2.3. Bodemligging**

De bodemligging van het SWAN-model en het Unibest CL+ model is gebaseerd op de volgende bronnen:

- vakloding uit 2009 van plateau en Texelstroom;
- basis ontwerp duin zoals weergegeven in Planstudie dijkversterking Waddenzeedijk Texel.



### 3. MODEL BESCHRIJVING

#### 3.1. SWAN

##### 3.1.1. Inleiding

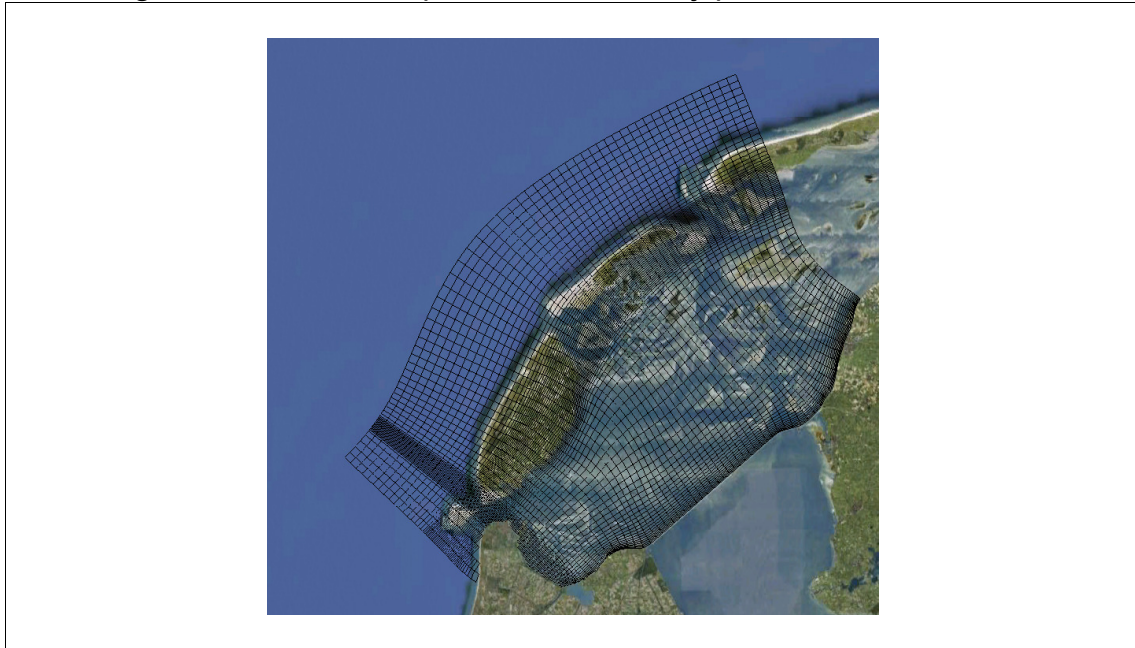
De golfcondities zijn bepaald met behulp van het spectrale golfenergiemodel SWAN<sup>1</sup>. Met SWAN worden vele, in de Waddenzee optredende, golfprocessen beschreven, waaronder lokale windgroei, golfbreking, 'whitecapping', refractie, golftransmissie en reflectie. Golven in de Waddenzee worden over het algemeen lokaal opgewekt en komen vrij snel tot verzaaging qua golfhoogte en -periode. Daarom voldoet een lokaal SWAN model van de regio voor deze studie. In paragraaf 4.1.3 wordt dit verder toegelicht.

Dit hoofdstuk beschrijft de modelopzet, de randvoorwaarden, de fysische en numerieke instellingen en de uitvoerlocaties.

##### 3.1.2. Grid en bodem

Voor het SWAN model is een curvi-lineair rekenrooster gegenereerd met  $m \cdot n = 846 \cdot 789$  roosterpunten uit het model zoals gebruikt in [ref. 1.]. Het grid is een uitsnede uit het WTI Waddenzee model dat wordt gebruikt bij het vaststellen van de Hydraulische Randvoorwaarden (HR2011). De resolutie van het rekenrooster varieert van ongeveer 100 - 180 m offshore tot 10 - 20 m bij de kustlijn. Het rekenrooster is grafisch weergegeven in Google Earth in afbeelding 3.1.

**Afbeelding 3.1. Rekenrooster (iedere 10<sup>de</sup> roosterlijn) SWAN model**

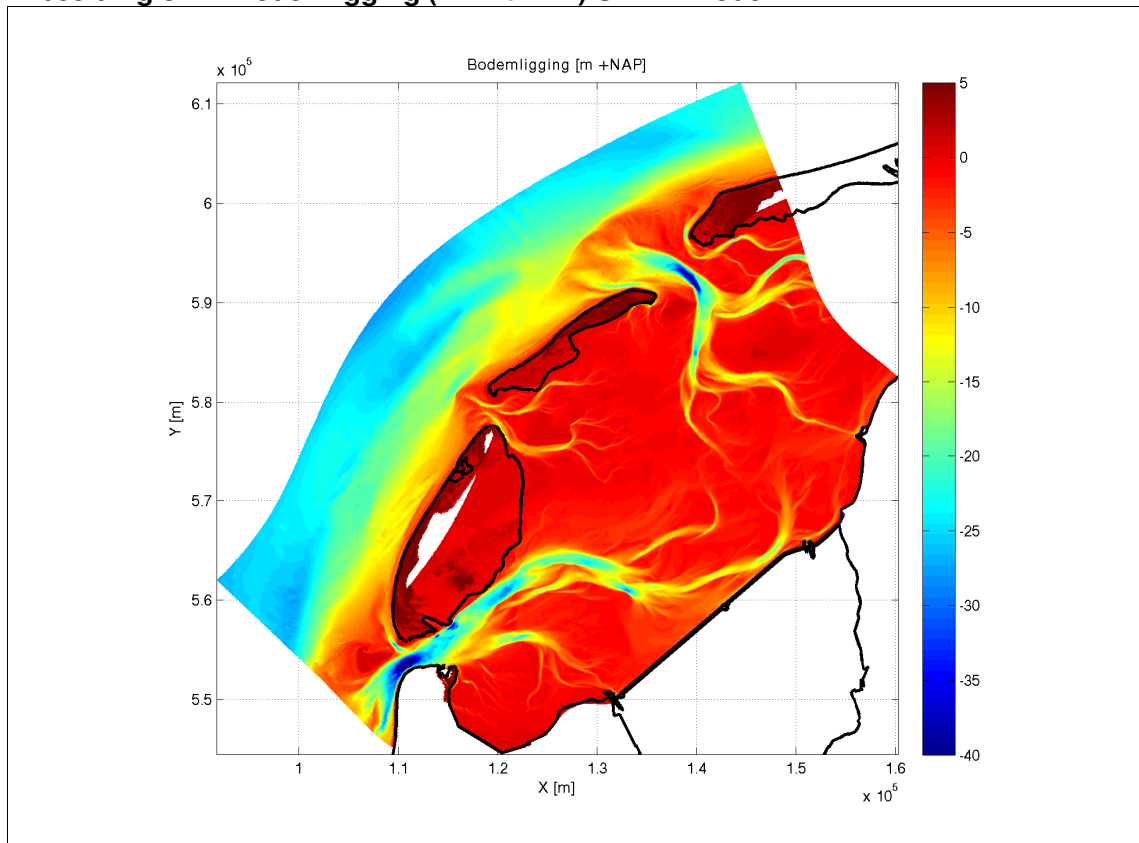


De bodemligging van het model is tevens gebaseerd op de bodem uit het WTI Waddenzee model, zie [ref. 1.] De bodemligging van het model is weergegeven in afbeelding 3.2. Daarnaast geeft afbeelding 4.3 de bodemligging van het projectgebied.

---

<sup>1</sup> SWAN (Simulating WAVes Nearshore). SWAN is een 2D, derdegeneratie spectraal golfmodel. Voor deze studie is de meest recente SWAN versie 40.81 gebruikt. Copyright © 2004 Delft University of Technology.

**Afbeelding 3.2. Bodemligging (in m +NAP) SWAN model**



### 3.1.3. Randvoorwaarden

Om de verandering in golfcondities te bepalen is een aantal stationaire sommen uitgevoerd. Deze sommen zijn gekozen op basis van waterstand, windsterkte en windrichting. Er zijn voor negen windrichtingen, drie windsnelheden en drie waterstanden berekeningen uitgevoerd. In totaal zijn dit 81 berekeningen. De invoercondities zijn weergegeven in tabel 3.1.

**Tabel 4.1. Invoercondities golfmodellering**

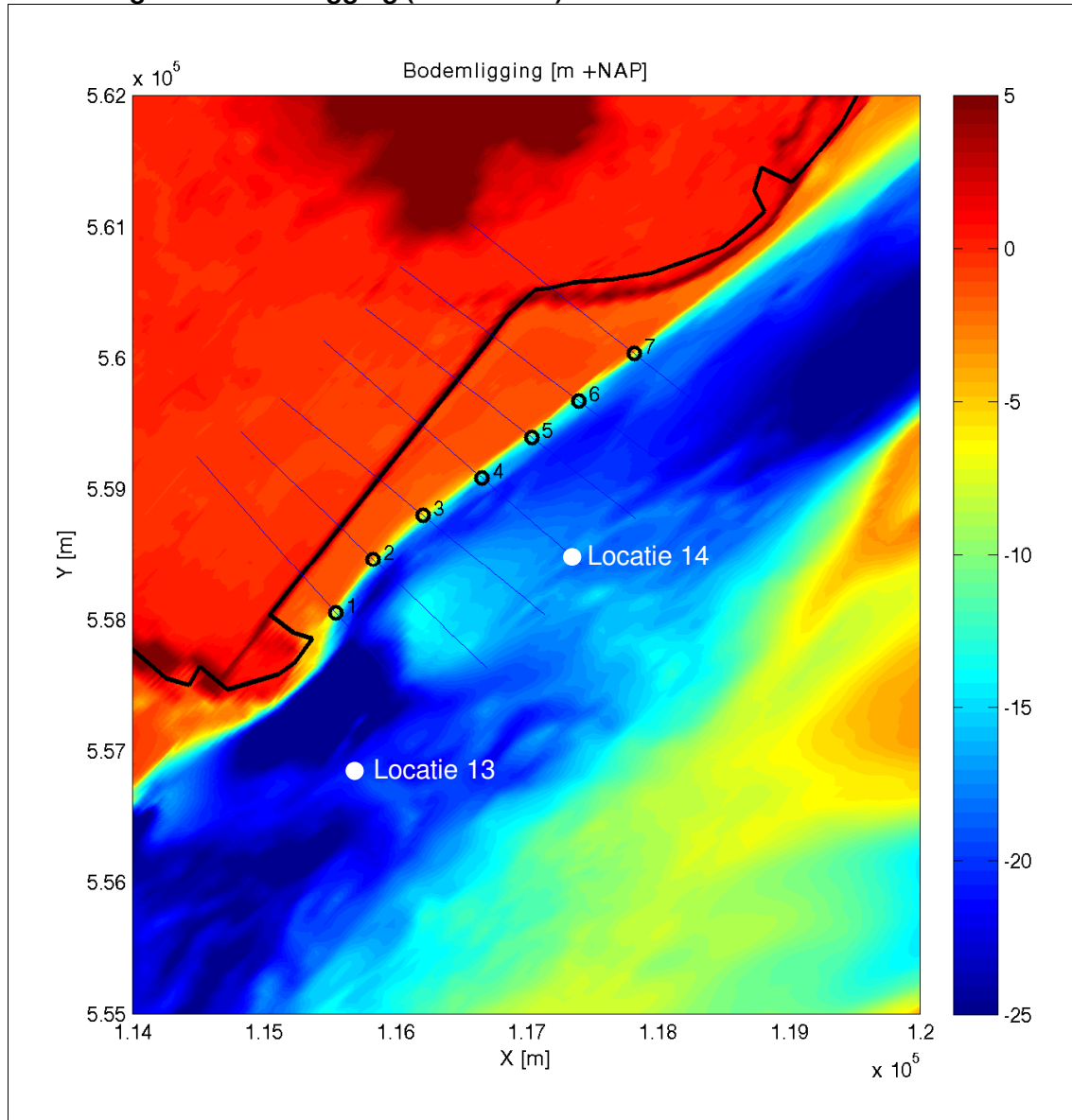
parameter	condities			aantal
waterstanden	NAP+ 0,0 m	NAP+ 1,5 m	NAP+ 3,0 m	3
windsnelheden	5 m/s	10 m/s	20 m/s	3
windrichtingen	30 - 270 graden in stappen van 30 graden			9

Bovenstaande hindcasts zijn stationair uitgevoerd per uniforme windrichting. De uitgevoerde sommen zijn samengevat in bijlage I.

Omdat het model relatief beperkte afmetingen heeft, kan het zo zijn dat de lokale golfgroei door wind vanaf de rand van het model relatief veel grid cellen in beslag neemt. Dit zou kunnen betekenen dat de golven ter plaatse van de project locatie nog niet volledig zijn ontwikkeld. Hierdoor is er op de rand een initieel golfspectrum opgelegd om geen randeffecten te hebben. Deze golfrandvoorwaarden zijn bepaald met behulp van de golfgroei formulering volgens Young and Verhagen [ref. 2.] op basis van de windsnelheid, een effectieve strijklengte en een gemiddelde waterdiepte. Voor iedere rand, en voor iedere wind-

richting en -snelheid zijn de golfrandvoorwaarden bepaald. Deze zijn tevens in bijlage I gegeven. Het golfspectrum aan de rand is parametrisch opgelegd als een JONSWAP spectrum met een 'peak-enhancement' parameter gamma van 3.3. Deze gehanteerde methode leidt ertoe dat randeffecten verwaarloosbaar zijn op de projectlocatie.

**Afbeelding 3.3. Bodemligging (in m + NAP) en locatie raaien**



Golven in dit deel van de Waddenzee worden over het algemeen lokaal opgewekt en komen vrij snel tot verzadiging qua golfhoogte en periode. Dat betekent dat golven die in de diepere delen van de Noordzee worden opgewekt niet van belang zijn voor de projectlocatie. In afbeelding 3.3 zijn twee locaties (locatie 13 en 14) aangegeven waarvoor golfspectra zijn bepaald tijdens eerdere golfstudies [ref. 1.].

Deze golfspectra zijn bepaald voor een storm hindcast op de Noordzee. De spectra zijn weergegeven in bijlage II.

De golfspectra beschrijven typische windzee condities (piek periode ongeveer 5 seconden; periodes hoger dan 6 seconden treden nauwelijks op). Hieruit kan geconcludeerd worden dat golven (ook tijdens stormcondities) lokaal worden opgewekt. Daarom voldoet een lokaal SWAN model van de regio voor deze studie.

### 3.1.4. Fysische en numerieke instellingen

De SWAN berekeningen zijn uitgevoerd met de volgende fysische en numerieke instellingen en zijn conform SBW.

```
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 cn14=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=0.1000000 cutfr=2.50000
NUM STOPC 0.00 0.01 0.001 99. STAT mxitst=60 alfa=0.001
```

### 3.1.5. Uitvoerlocaties

Uitvoer is gegenereerd als ruimtelijke variatie van de significante golfhoogte  $H_s$ , de gemiddelde golfperiode  $T_{m-1,0}$  en de golfrichting. Daarnaast zijn bovenstaande golfparameters ook uitgevoerd voor een 7-tal dwarsdoorsneden (raaien) loodrecht op de kustlijn (afbeelding 3.3). UNIBEST CL+ gebruikt de golfcondities ter hoogte van de plaatrand (de overgang tussen geul en plaat) als invoercondities. De coördinaten van deze locaties zijn gegeven in tabel 3.2 en weergegeven in afbeelding 3.3.

**Tabel 3.2. Coördinaten uitvoerlocaties per dwarsprofiel**

raai	x (m)	y (m)
1	115548	558053
2	115834	558465
3	116213	558802
4	116664	559084
5	117041	559395
6	117400	559675
7	117823	560034

### 3.2. Opzet UNIBEST CL+

Voor alle 81 golfcondities zijn sedimenttransporten bepaald met behulp van UNIBEST CL+. Hiervoor is voor iedere SWAN raai het toekomstig duinprofiel toegevoegd. Het duinprofiel is zeewaarts van de teen van de bestaande dijk gemodelleerd. De totale sedimenttransporten worden bepaald langs de 7 raaien voor alle golfcondities uit de SWAN modellering.

UNIBEST CL+ berekeningen zijn uitgevoerd door Deltares. De resultaten zijn bijgevoegd in bijlage IV.

## 4. RESULTATEN

### 4.1. Resultaten SWAN golfmodel

Uitvoer is gegenereerd langs 7 raaien dwars op de kust, lopend van diep water naar ondiep water (zie afbeelding 3.3). De raaien zijn genomen overeenkomstig met de eerder gekozen raaien (zie Planstudie dijkversterking Waddenzeedijk Texel). De golfcondities per berekening zijn voor iedere raai gegeven in bijlage III.

Gemeten condities zijn geklasseerd volgens de invoercondities voor SWAN als gegeven in tabel 3.1. Percentages van voorkomen van de condities kunnen hierdoor worden bepaald. Hierbij is aangenomen dat de gemeten data representatief is voor de totale periode. In tabel 4.1 is een overzicht gegeven van de voorgekomen condities en de percentages van voorkomen. De golfcondities zijn gegeven voor raai 4.

Het valt op dat in bijna 25 % van de tijd geen wind en/of afluende wind voorkomt.

Verder valt op dat in circa 50 % van de tijd golven binnenvallen met een golfrichting groter dan  $120^\circ$ , en in circa 25 % van de tijd met een golfrichting kleiner dan  $120^\circ$ . De kustoriëntatie van het gebied is circa  $40^\circ$  (kustnormaal circa  $130^\circ$ ).

**Tabel 4.1. Gemiddelde golfhoogte bij de verschillende invoercondities en percentage van voorkomen van deze conditieklasse<sup>1</sup>**

waterstand [m]	windsnelheid [m/s]	windrichting [°N]	gemiddelde van H <sub>s</sub> [m]	% van voorkomen [%]	
0,0	5	30	0,22	4,5 %	
		60	0,26	4,4 %	
		90	0,27	4,9 %	
		120	0,26	3,6 %	
		150	0,24	3,2 %	
		180	0,22	3,9 %	
		210	0,20	4,4 %	
		240	0,18	4,2 %	
		270	0,13	4,2 %	
	<b>gemiddelde van H<sub>s</sub> (m) ws 5 m/s</b>			<b>0,22</b>	<b>37,4 %</b>
	10	30	0,53	1,1 %	
		60	0,61	2,7 %	
		90	0,65	2,3 %	
		120	0,62	1,3 %	
		150	0,56	1,7 %	
180		0,52	2,3 %		
210		0,49	6,5 %		
240		0,46	6,6 %		
270	0,35	4,3 %			
<b>gemiddelde van H<sub>s</sub> (m) ws 10 m/s</b>			<b>0,53</b>	<b>28,7 %</b>	
20	210	1,14	0,9 %		
	240	1,07	0,6 %		
<b>gemiddelde van H<sub>s</sub> (m) ws 20 m/s</b>			<b>1,17</b>	<b>2,1 %</b>	
<b>gemiddelde van H<sub>s</sub> (m) bij NAP+ 0 m</b>			<b>0,64</b>	<b>68,2 %</b>	
1,5	5	240	0,18	0,6 %	
		270	0,14	0,7 %	
	<b>gemiddelde van H<sub>s</sub> (m) ws 5 m/s</b>			<b>0,24</b>	<b>3,4 %</b>
	10	210	0,53	1,0 %	
		240	0,47	1,7 %	
		270	0,35	1,4 %	
<b>gemiddelde van H<sub>s</sub> (m) 10 m/s</b>			<b>0,61</b>	<b>4,8 %</b>	
<b>gemiddelde van H<sub>s</sub> (m) 20 m/s</b>			<b>1,33</b>	<b>0,8 %</b>	
<b>gemiddelde van H<sub>s</sub> (m) bij NAP+ 1,5 m</b>			<b>0,72</b>	<b>9,0 %</b>	
<b>eindtotaal %</b>			<b>0,68</b>	<b>77,2 %</b>	

Onder een waterstand van NAP + 0m kunnen geen grote golven voorkomen vanwege het ondiepe voorland (plateau). Deze golven zijn daarom niet meegenomen in de analyse. Een waterstand van NAP + 3m komt alleen voor in combinatie met westelijke golfrichtingen, die niet van invloed zijn op de transporten (transport is nul).

## 4.2. Sediment balans

Op basis van de gemeten tijdreeks van waterstanden (Den Helder) en windcondities (Texel Hors) zijn de transportcapaciteiten bepaald langs de 7 raaien per jaar, dit is weergegeven

<sup>1</sup> Conditie klassen die niet voorkomen zijn niet weergegeven in de tabel.

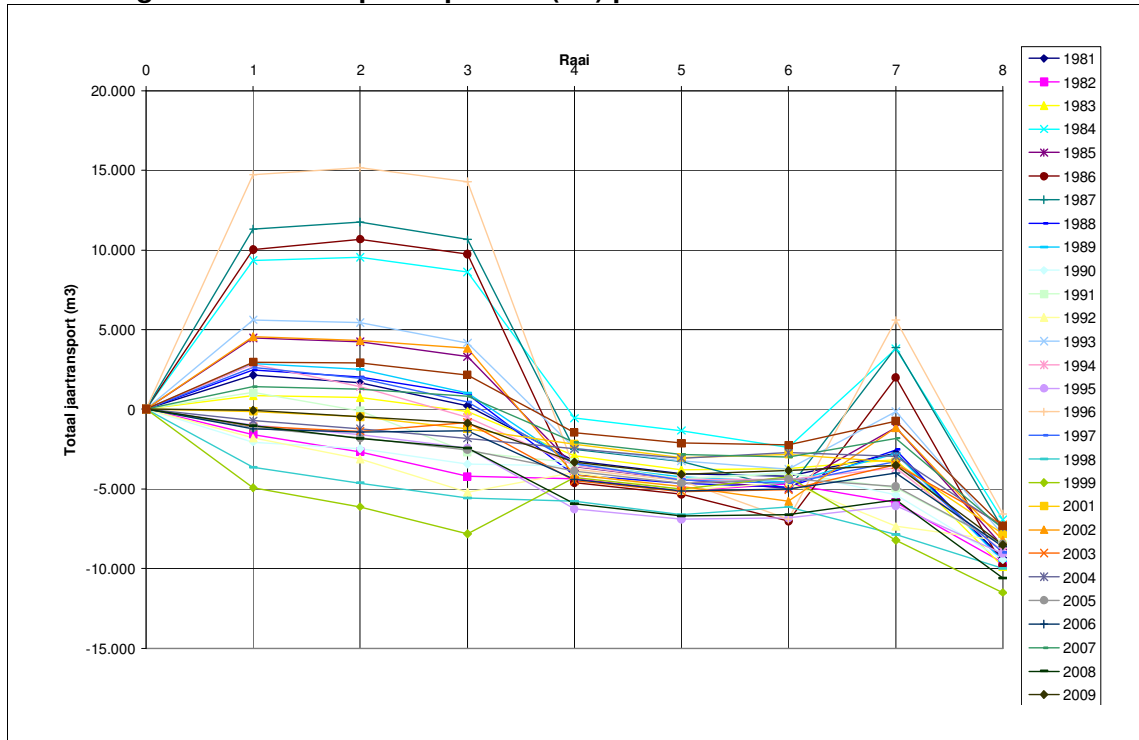
in tabel 4.2. Een negatieve transport capaciteit duidt op een transport in noordoostelijke richting (richting Oudeschild (OS)) terwijl een positieve transport capaciteit duidt op een transport in zuidwestelijke richting (richting De Hors (NIOZ)).

**Tabel 4.2. Netto sedimenttransportcapaciteit per raai (m<sup>3</sup>/jaar)**

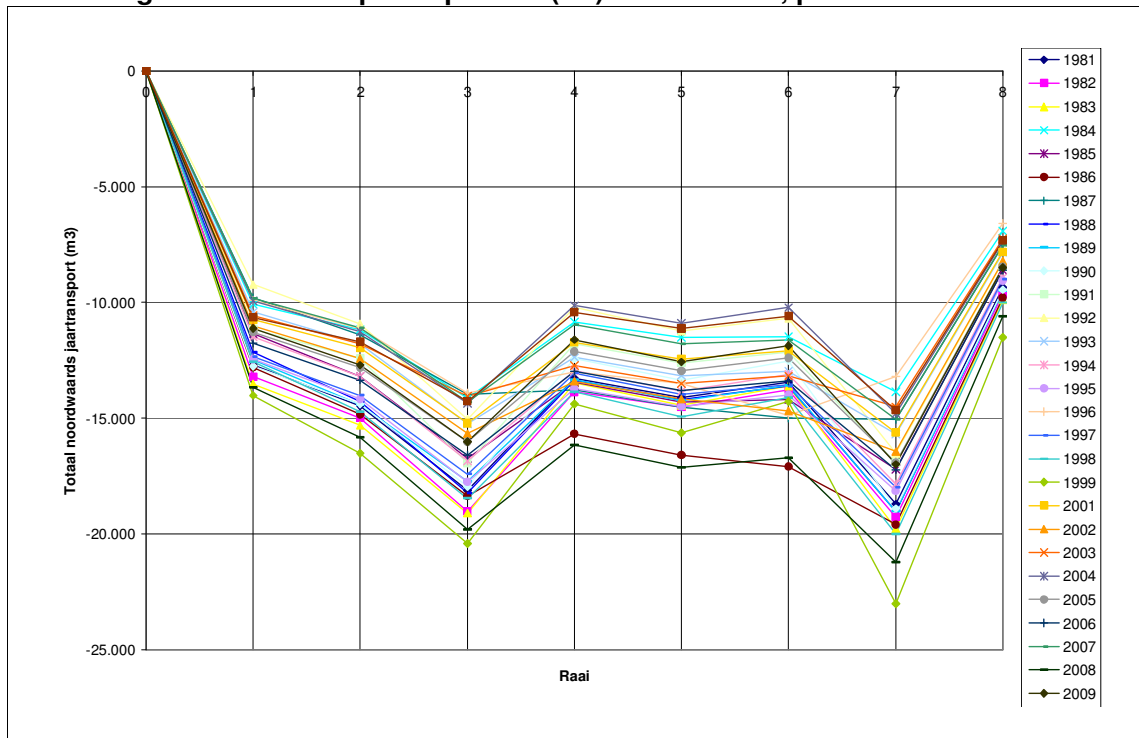
jaar	raai							waar- nemingen
	1	2	3	4	5	6	7	
1981	2.142	- 466	- 1.458	- 3.439	- 811	- 172	1.456	7.697
1982	- 1.582	- 1.087	- 1.551	- 132	- 778	442	- 1.160	8.433
1983	853	- 117	- 873	- 2.765	- 903	76	551	8.218
1984	9.337	198	- 937	- 9.161	- 777	- 1.073	6.222	8.140
1985	4.464	- 244	- 930	- 6.918	- 767	- 578	3.817	8.556
1986	10.015	<b>650</b>	- 933	- 14.349	- 721	- 1.704	9.033	8.655
1987	11.310	434	- 1.099	- 13.176	- 758	- 1.710	8.883	8.352
1988	2.443	- 419	- 1.101	- 5.060	<b>- 521</b>	- 236	2.354	8.766
1989	2.849	- 359	- 1.471	- 4.528	- 735	- 330	1.764	8.684
1990	- 2.064	- 424	- 960	- 100	- 844	421	- 1.426	8.386
1991	1.042	- 1.152	<b>- 2.590</b>	- 644	- 1.047	356	- 917	8.505
1992	- 1.809	- 1.323	- 2.076	1.249	<b>- 1.131</b>	486	- 2.751	2.741
1993	5.619	- 185	- 1.263	- 6.622	- 786	- 519	3.614	7.551
1994	2.805	<b>- 1.379</b>	- 1.918	- 3.036	- 887	8	710	8.671
1995	- 983	- 619	- 834	- 3.841	- 639	84	766	8.712
1996	<b>14.714</b>	439	- 871	<b>- 18.061</b>	- 703	<b>- 2.425</b>	<b>12.494</b>	8.662
1997	2.638	- 683	- 1.501	- 3.851	- 1.032	- 204	1.361	8.698
1998	- 3.654	- 972	- 948	- 222	- 821	497	- 1.742	8.724
1999	<b>- 4.933</b>	- 1.190	- 1.705	<b>3.524</b>	- 723	<b>773</b>	<b>- 3.976</b>	2.199
2000	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0
2001	- 146	- 332	- 747	- 964	- 833	194	- 486	8.205
2002	4.547	- 234	- 502	- 7.956	- 700	- 930	4.624	8.454
2003	- 1.097	- 281	<b>534</b>	- 3.639	- 680	113	1.562	8.081
2004	- 733	- 494	- 600	- 672	- 573	333	- 227	8.641
2005	- 1.164	- 648	- 734	- 1.336	- 761	254	- 465	8.703
2006	- 1.212	- 211	76	- 3.066	- 711	109	1.008	8.692
2007	1.427	- 155	- 470	- 2.866	- 770	- 178	1.195	8.317
2008	- 1.026	- 813	- 593	- 3.486	- 782	81	901	8.447
2009	- 80	- 380	- 423	- 2.435	- 764	232	317	7.334
2010	2.961	- 50	- 750	- 3.630	- 668	- 116	1.503	7.192

In afbeelding 4.1 zijn de (netto) getallen uit tabel 4.2 nog eens grafisch weergegeven. In afbeeldingen 4.2 en 4.3 zijn de cumulatieve noordwaarts en zuidwaarts gerichte transporten weergegeven.

**Afbeelding 4.1. Jaartransportcapaciteit (m<sup>3</sup>) per raai**

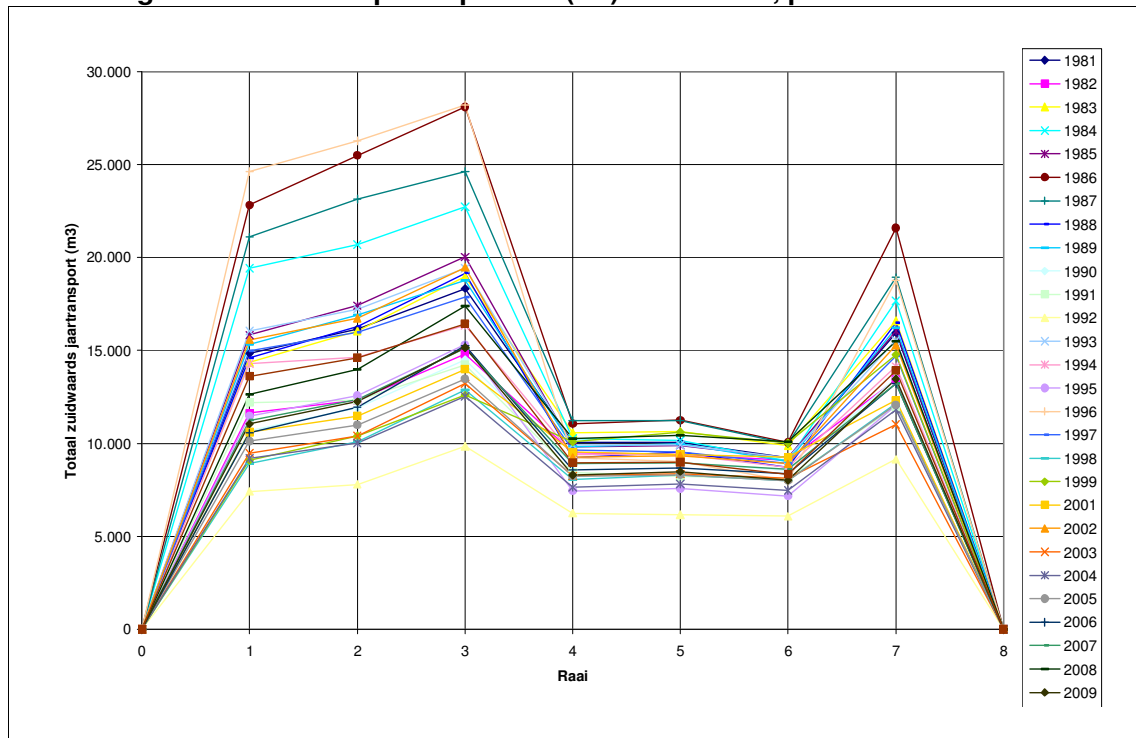


**Afbeelding 4.2. Jaartransportcapaciteit (m<sup>3</sup>) noordwaarts, per raai**





**Afbeelding 4.3. Jaartransportcapaciteit (m<sup>3</sup>) zuidwaarts, per raai**



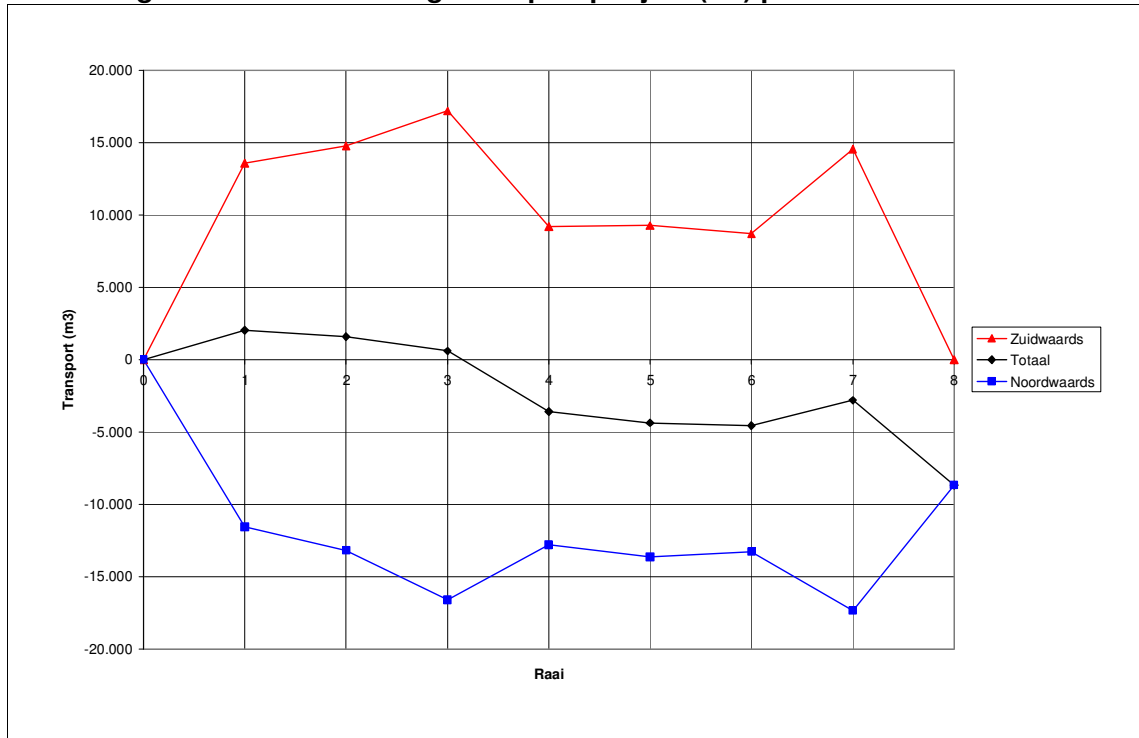
In afbeelding 4.1 is te zien dat het netto jaartransport varieert tussen - 10.000 m<sup>3</sup>/jaar en + 15.000 m<sup>3</sup>/jaar. De maximale cumulatieve noord- en zuidwaarts gerichte transport zijn respectievelijk - 23.000 m<sup>3</sup>/jaar en + 28.000 m<sup>3</sup>/jaar. In de afbeeldingen is te zien dat het transport in raai 4 t/m 6 kleiner is dan in de overige raaien. Dit komt omdat de bodemligging in deze raaien hoger ligt dan in de rest.

In de berekeningen is er vanuit gegaan dat er geen sediment door de zuidelijke rand verdwijnt. De golfbreker van de haven van het NIOZ ligt zodanig dat het onwaarschijnlijk is dat het sedimenttransport hier uit het systeem verdwijnt.

Aan de noordelijke rand houden we rekening met een verlies van 50 % van het noordwaarts gerichte transport. Door de oriëntatie van de haven van Oudeschild is het niet waarschijnlijk dat al het transport zal verdwijnen in de Texelstroom. Op basis van de Unibest berekeningen is gebleken dat de evenwichtsoriëntatie van de kust circa 10 - 20 graden (met de klok mee) verschilt van de huidige oriëntatie. De kust oriëntatie nabij Oudeschild verschilt meer dan 20 graden met de huidige Prins Hendrikdijk. Het is dan ook aannemelijk dat golfgedreven langtransport naar Oudeschild toe minder wordt. Een verlies van circa 50 % lijkt aannemelijk en conservatief.

In afbeelding 4.4 is het gemiddelde langtransport per raai gepresenteerd.

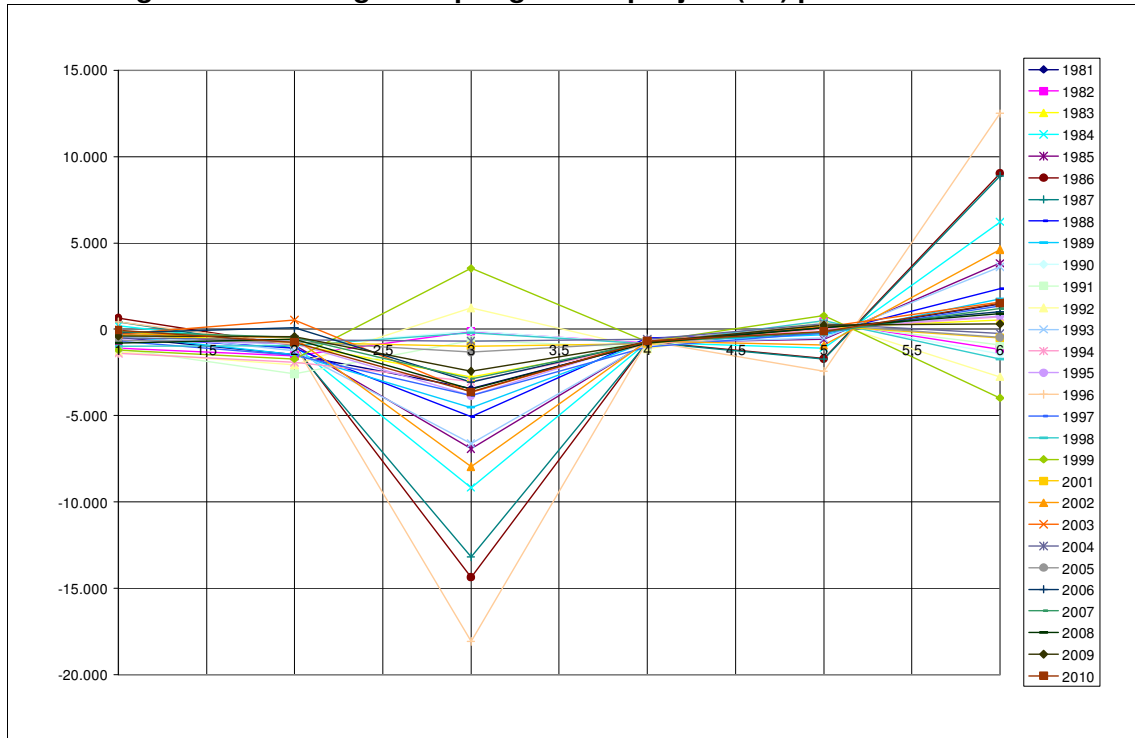
**Afbeelding 4.4. Gemiddeld langstransport per jaar (m<sup>3</sup>) per raai**



In afbeelding 4.4 is ook te zien dat de transporten in raai 4 t/m 6 kleiner zijn dan in de overige raaien (met uitzondering van raai 0 en raai 8).

In afbeelding 4.5 is de netto langstransportgradiënt gepresenteerd. De gradiënt is het verschil tussen wat er per sectie in en uit gaat. Sectie 1 ligt tussen raai 1 en 2, sectie 2 tussen raai 2 en 3, enz.

**Afbeelding 4.5. Netto langtransportgradiënt per jaar (m<sup>3</sup>) per sectie**



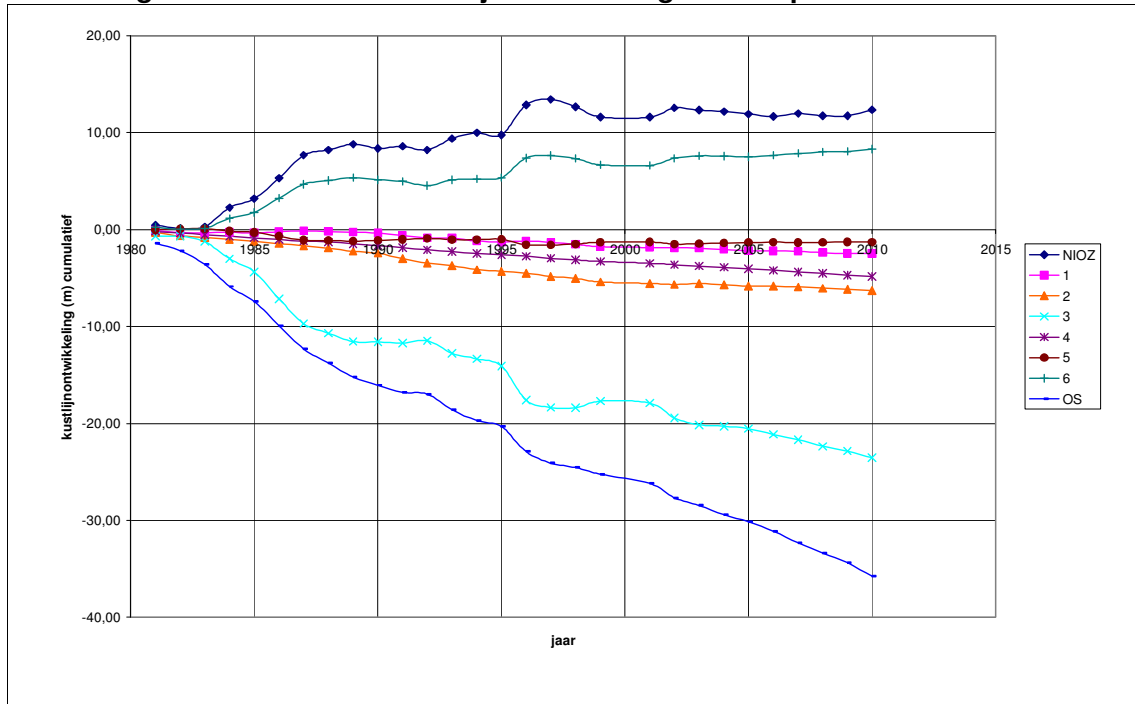
De gradiënten tussen de raaien geven een indicatie van de te verwachten kustlijnontwikkeling. De gradiënten zijn bepaald voor de secties tussen twee raaien. Een negatieve gradiënt is een indicatie voor een sediment tekort. Dit leidt in de praktijk tot erosie. Een positieve gradiënt is een indicatie voor kustaanwas (sedimentatie). De resulterende verwachte kustlijnontwikkeling is weergegeven in tabel 4.3 en in afbeelding 4.6.

**Tabel 4.3. Verwachte kustlijnontwikkeling per sectie in m per jaar**

jaar	sectie							
	NIOZ <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6	OS <sup>1</sup>
1981	0,45	- 0,09	- 0,31	- 0,67	- 0,17	- 0,04	0,24	- 1,39
1982	- 0,33	- 0,21	- 0,33	- 0,03	- 0,17	0,10	- 0,19	- 0,80
1983	0,18	- 0,02	- 0,19	- 0,54	- 0,19	0,02	0,09	- 1,41
1984	1,97	0,04	- 0,20	- 1,78	- 0,17	- 0,24	1,01	- 2,26
1985	0,94	- 0,05	- 0,20	- 1,34	- 0,16	- 0,13	0,62	- 1,57
1986	2,11	0,13	- 0,20	- 2,79	- 0,15	- 0,39	1,47	- 2,48
1987	2,38	0,09	- 0,24	- 2,56	- 0,16	- 0,39	1,45	- 2,40
1988	0,51	- 0,08	- 0,24	- 0,98	- 0,11	- 0,05	0,38	- 1,47
1989	0,60	- 0,07	- 0,32	- 0,88	- 0,16	- 0,07	0,29	- 1,41
1990	- 0,43	- 0,08	- 0,21	- 0,02	- 0,18	0,10	- 0,23	- 0,85
1991	0,22	- 0,23	- 0,56	- 0,13	- 0,22	0,08	- 0,15	- 0,74
1992	- 0,38	- 0,26	- 0,45	0,24	- 0,24	0,11	- 0,45	- 0,19
1993	1,18	- 0,04	- 0,27	- 1,29	- 0,17	- 0,12	0,59	- 1,62
1994	0,59	- 0,27	- 0,41	- 0,59	- 0,19	0,00	0,12	- 1,10
1995	- 0,21	- 0,12	- 0,18	- 0,75	- 0,14	0,02	0,12	- 0,63
1996	3,10	0,09	- 0,19	- 3,51	- 0,15	- 0,55	2,04	- 2,56
1997	0,56	- 0,14	- 0,32	- 0,75	- 0,22	- 0,05	0,22	- 1,20
1998	- 0,77	- 0,19	- 0,20	- 0,04	- 0,18	0,11	- 0,28	- 0,45
1999	- 1,04	- 0,24	- 0,37	0,68	- 0,15	0,18	- 0,65	- 0,69
2000	-	-	-	-	-	-	-	-
2001	- 0,03	- 0,07	- 0,16	- 0,19	- 0,18	0,04	- 0,08	- 0,95
2002	0,96	- 0,05	- 0,11	- 1,55	- 0,15	- 0,21	0,75	- 1,49
2003	- 0,23	- 0,06	0,12	- 0,71	- 0,15	0,03	0,25	- 0,79
2004	- 0,15	- 0,10	- 0,13	- 0,13	- 0,12	0,08	- 0,04	- 0,93
2005	- 0,25	- 0,13	- 0,16	- 0,26	- 0,16	0,06	- 0,08	- 0,76
2006	- 0,26	- 0,04	0,02	- 0,60	- 0,15	0,02	0,16	- 0,97
2007	0,30	- 0,03	- 0,10	- 0,56	- 0,16	- 0,04	0,19	- 1,20
2008	- 0,22	- 0,16	- 0,13	- 0,68	- 0,17	0,02	0,15	- 1,03
2009	- 0,02	- 0,08	- 0,09	- 0,47	- 0,16	0,05	0,05	- 1,05
2010	0,62	- 0,01	- 0,16	- 0,71	- 0,14	- 0,03	0,24	- 1,39
<b>totaal (in 30 jaar)</b>	<b>12,4</b>	<b>- 2,5</b>	<b>- 6,3</b>	<b>- 23,5</b>	<b>- 4,8</b>	<b>- 1,3</b>	<b>8,3</b>	<b>- 35,8</b>
<b>gemiddeld per jaar</b>	<b>0,43</b>	<b>- 0,09</b>	<b>- 0,22</b>	<b>- 0,81</b>	<b>- 0,17</b>	<b>- 0,04</b>	<b>0,29</b>	<b>- 1,23</b>

<sup>1</sup> Breedte van de eerste en laatste sectie is als 250m genomen.

**Afbeelding 4.6. Cumulatieve kustlijnontwikkeling over de periode 1981-2010**



Voor de bepaling van de slijtlaag moet veiligheid gegarandeerd worden. Hiervoor stellen we kustaanwas op 0 in de verdere analyse. Op deze manier wordt de maximaal te verwachten erosie en onderhoudsbehoefte in de onderhoudsperiodes bepaald. Deze laag moet minimaal aanwezig zijn als slijtlaag.

In tabel 4.4 is de maximale kustachteruitgang gepresenteerd voor een onderhoudsperiode van 5 jaar. Hierbij is dus alle achteruitgang (uit tabel 4.3) gedurende 5 jaar bij elkaar opgeteld. (bijvoorbeeld raai 5 periode 1981 - 1985:  $-0.04 + 0 + 0 + -0.24 - 0.13 = -0.41$ ).

In tabel 4.5 is de kustachteruitgang voor een onderhoudsperiode van 10 jaar berekend.

**Tabel 4.4. Verwachte kustlijnontwikkeling per sectie in meter voor 5 jaar periode**

van	jaar		NIOZ	sectie						OS
	tot			1	2	3	4	5	6	
1981	1986		- 0,33	- 0,38	- 1,24	- 4,35	- 0,86	- 0,41	- 0,19	- 7,43
1982	1987		- 0,33	- 0,29	- 1,13	- 6,47	- 0,84	- 0,76	- 0,19	- 8,52
1983	1988		0,00	- 0,07	- 1,03	- 9,01	- 0,84	- 1,15	0,00	- 10,12
1984	1989		0,00	- 0,13	- 1,08	- 9,45	- 0,76	- 1,20	0,00	- 10,18
1985	1990		0,00	- 0,20	- 1,19	- 8,55	- 0,75	- 1,03	0,00	- 9,33
1986	1991		- 0,43	- 0,24	- 1,20	- 7,23	- 0,76	- 0,90	- 0,23	- 8,61
1987	1992		- 0,43	- 0,47	- 1,56	- 4,57	- 0,83	- 0,52	- 0,38	- 6,87
1988	1993		- 0,82	- 0,73	- 1,77	- 2,01	- 0,91	- 0,13	- 0,83	- 4,66
1989	1994		- 0,82	- 0,68	- 1,80	- 2,31	- 0,97	- 0,19	- 0,83	- 4,81
1990	1995		- 0,82	- 0,88	- 1,90	- 2,02	- 1,00	- 0,12	- 0,83	- 4,50
1991	1996		- 0,59	- 0,92	- 1,87	- 2,75	- 0,96	- 0,12	- 0,60	- 4,28
1992	1997		- 0,59	- 0,69	- 1,50	- 6,13	- 0,89	- 0,67	- 0,45	- 6,10
1993	1998		- 0,21	- 0,57	- 1,38	- 6,88	- 0,86	- 0,71	0,00	- 7,12
1994	1999		- 0,98	- 0,72	- 1,31	- 5,63	- 0,87	- 0,60	- 0,28	- 5,95
1995	2001		- 2,01	- 0,69	- 1,26	- 5,04	- 0,84	- 0,60	- 0,93	- 5,54
1996	2002		- 1,84	- 0,63	- 1,25	- 4,49	- 0,88	- 0,60	- 1,01	- 5,85
1997	2003		- 1,84	- 0,68	- 1,17	- 2,52	- 0,88	- 0,26	- 1,01	- 4,78
1998	2004		- 2,07	- 0,60	- 0,84	- 2,48	- 0,80	- 0,21	- 1,01	- 4,37
1999	2005		- 1,45	- 0,50	- 0,77	- 2,57	- 0,75	- 0,21	- 0,76	- 4,85
2001	2006		- 0,66	- 0,39	- 0,56	- 2,83	- 0,76	- 0,21	- 0,19	- 4,92
2002	2007		- 0,89	- 0,37	- 0,40	- 3,24	- 0,73	- 0,21	- 0,11	- 4,94
2003	2008		- 0,89	- 0,35	- 0,39	- 2,25	- 0,75	- 0,04	- 0,11	- 4,66
2004	2009		- 0,87	- 0,46	- 0,52	- 2,22	- 0,77	- 0,04	- 0,11	- 4,89
2005	2010		- 0,73	- 0,44	- 0,48	- 2,56	- 0,81	- 0,04	- 0,08	- 5,00
2006	2011		- 0,49	- 0,32	- 0,48	- 3,01	- 0,79	- 0,07	0,00	- 5,63
<b>gemiddeld per 5 jaar</b>			- 0,80	- 0,50	- 1,12	- 4,42	- 0,83	- 0,44	- 0,41	- 6,16
max. erosie 5 jaar periode			- 2,07	- 0,92	- 1,90	- 9,45	- 1,00	- 1,20	- 1,01	- 10,18

**Tabel 4.5. Verwachte kustlijnontwikkeling per sectie in meter voor 10 jaar periode**

van	jaar tot	sectie							
		NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS
1981	1991	- 0,77	- 0,62	- 2,44	- 11,58	- 1,63	- 1,31	- 0,42	- 16,04
1982	1992	- 0,77	- 0,75	- 2,68	- 11,04	- 1,68	- 1,27	- 0,57	- 15,39
1983	1993	- 0,82	- 0,80	- 2,80	- 11,01	- 1,75	- 1,27	- 0,83	- 14,78
1984	1994	- 0,82	- 0,81	- 2,88	- 11,76	- 1,73	- 1,39	- 0,83	- 14,99
1985	1995	- 0,82	- 1,09	- 3,09	- 10,57	- 1,75	- 1,15	- 0,83	- 13,83
1986	1996	- 1,02	- 1,16	- 3,07	- 9,97	- 1,72	- 1,02	- 0,83	- 12,89
1987	1997	- 1,02	- 1,16	- 3,06	- 10,69	- 1,72	- 1,18	- 0,83	- 12,97
1988	1998	- 1,02	- 1,29	- 3,15	- 8,88	- 1,78	- 0,84	- 0,83	- 11,78
1989	1999	- 1,79	- 1,40	- 3,11	- 7,94	- 1,84	- 0,79	- 1,11	- 10,76
1990	2001	- 2,83	- 1,57	- 3,16	- 7,06	- 1,84	- 0,71	- 1,76	- 10,04
1991	2002	- 2,43	- 1,55	- 3,12	- 7,23	- 1,84	- 0,71	- 1,61	- 10,13
1992	2003	- 2,43	- 1,37	- 2,67	- 8,65	- 1,76	- 0,92	- 1,46	- 10,88
1993	2004	- 2,28	- 1,16	- 2,22	- 9,36	- 1,67	- 0,92	- 1,01	- 11,49
1994	2005	- 2,43	- 1,22	- 2,08	- 8,20	- 1,62	- 0,81	- 1,05	- 10,80
1995	2006	- 2,68	- 1,08	- 1,82	- 7,87	- 1,59	- 0,81	- 1,12	- 10,46
1996	2007	- 2,72	- 1,00	- 1,64	- 7,72	- 1,61	- 0,81	- 1,12	- 10,80
1997	2008	- 2,72	- 1,03	- 1,55	- 4,77	- 1,62	- 0,30	- 1,12	- 9,43
1998	2009	- 2,94	- 1,05	- 1,36	- 4,70	- 1,57	- 0,25	- 1,12	- 9,26
1999	2010	- 2,19	- 0,94	- 1,25	- 5,13	- 1,56	- 0,25	- 0,84	- 9,85
2000	2011	- 1,15	- 0,71	- 1,04	- 5,84	- 1,55	- 0,28	- 0,19	- 10,55
<b>gemiddeld 10 jaar periode</b>		- 1,78	- 1,09	- 2,41	- 8,50	- 1,69	- 0,85	- 0,98	- 11,86
max. erosie 10 jaar periode		- 2,94	- 1,57	- 3,16	- 11,76	- 1,84	- 1,39	- 1,76	- 16,04

De benodigde dikte van de slijtlaag en onderhoudsbehoefte volgt uit de gekozen minimale onderhoudsvrije periode. Door de verdeling zoals gegeven in tabellen 4.3 tot en met 4.5 aan te nemen als kansverdeling, kan een inschatting gemaakt worden van de te verwachten kustontwikkeling voor verschillende periodes voor de verschillende secties. Op basis hiervan kan de dikte van de slijtlaag worden bepaald.

**Tabel 4.6. Verwachte maximale erosie (in m) voor verschillende onderhoudsvrije periodes**

periode	sectie							
	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS
1 jaar	- 1,0	- 0,3	- 0,6	- 3,5	- 0,2	- 0,5	- 0,6	- 2,6
5 jaar	- 2,1	- 0,9	- 1,9	- 9,5	- 1,0	- 1,2	- 1,0	- 10,2
10 jaar	- 2,9	- 1,6	- 3,2	- 11,8	- 1,8	- 1,4	- 1,8	- 16,0

De meeste erosie treedt dus op in sectie 3, sectie Oudeschild en sectie NIOZ.

#### 4.2.1. Onzekerheid

In de gevolgde methodiek zit een aantal onzekerheden die een gevolg kunnen hebben op het langtransport. In deze paragraaf behandelen we deze onzekerheden en trekken we een conclusie met betrekking tot een veiligheidsrange ten aanzien van de resultaten.

#### Golven

In tabel 4.7 is een overzicht gegeven van de minimale, gemiddelde en maximale totale golfgedreven sedimenttransportcapaciteiten op basis van de jaarreeks van wind- en water-

standcondities. De getoonde resultaten zijn voor de verschillende raaien. Duidelijk te zien is de grote spreiding van de transportcapaciteiten.

**Tabel 4.7. Gevoeligheid sedimenttransportcapaciteiten per raai**

	NIOZ	2	3	4	5	6	7	8	OS
minimaal	0	- 4.933	- 6.123	- 7.829	- 6.277	- 6.916	- 7.042	- 8.230	- 11.502
gemiddeld	0	2.203	1.786	811	- 3.606	- 4.380	- 4.613	- 2.685	- 8.563
maximaal	0	14.714	15.154	14.283	-564	- 1.340	- 2.253	5.587	- 6.590

Het blijkt dat de huidige kustoriëntatie dicht tegen de evenwichtsoriëntatie aan ligt. De evenwichtsoriëntatie is circa 140 - 150°, de huidige kustoriëntatie is circa 130°. Hierdoor zijn langstransporten erg gevoelig voor kleine veranderingen van gemiddelde golfrichting en golfhoogte. Dit blijkt ook uit de sedimenttransportcapaciteiten zoals is weergegeven in tabel 4.7.

Het blijkt dat gedurende de meetperiode (1981 - 2011) de windcondities systematisch in sterkte zijn afgenomen. Het lijkt erop dat de laatste jaren de windcondities milder zijn dan in de jaren 80. Dit effect is niet meegenomen in de analyse voor de langstransporten. In de analyse wordt uitgegaan van maximale erosie.

### Waterstand

Zeespiegelstijging (0,30 m in 50 jaar) is niet meegenomen in de analyse. Verwacht mag worden dat een zeespiegelstijging als gevolg van klimaatverandering ook een absolute stijging van de waterspiegel tot gevolg zal hebben op het plateau. Immers is het niet te verwachten dat er sediment toevoer zal zijn vanuit de geul.

Een hogere waterstand zal leiden tot hogere golven in zowel de Waddenzee als op het plateau. Daarnaast is het te verwachten dat de hoek van golfval veranderen. Gezien de relatief kleine transporten en de grote jaarlijkse schommelingen, is te verwachten dat de effecten van een zeespiegelstijging zich over het gebied zullen spreiden. Een snelle vergelijking op basis van de resultaten laten dit ook zien.

### Stroming

Stroming over het plateau is niet meegenomen in de beschouwing. Zoals is beschreven in de historische analyse is deze stroming klein en nabij de kust zelfs gering. De verwachte stroming is netto geïjg gemiddeld en dus niet continue aanwezig.

Verwacht mag worden dat deze stroming alleen een mogelijk effect zal hebben nabij de randen van het gebied. Hier zou de stroming tot gevolg kunnen hebben dat sediment over de randen uit het systeem wordt getransporteerd.

Dit is nu meegenomen als een netto verlies van 50 % van het noordwaarts transport. Gezien de vorm van de transportcapaciteitkromme (afbeelding 5.5 en 5.6) lijkt dit een overschatting. Dit lijkt ook te worden onderschreven door de lange termijn ontwikkeling op basis van de vaklodingen (afbeelding 5.3) die een stabiele kust bij Oudeschild laten zien.

### Kustontwikkeling

Bij het bepalen van de kustontwikkeling wordt mogelijke kustaanwas (sedimentatie) niet meegenomen in de analyse. Er is wordt dus uitgegaan van uitsluitend netto kusterosie. Dit is een conservatieve aanpak, zeker gezien de grote jaarlijkse fluctuaties in transportcapaciteiten zoals in tabel 5.5 te zien is.



### **Korrelgrootte**

Het huidige materiaal is fijn siltige klei. Voorgesteld is om het duin te creëren met materiaal met een  $D_{50}$  van 300  $\mu\text{m}$ . Bij kleinere korrelgroottes is het aannemelijk dat sedimenttransporten toenemen.

De kwantitatieve analyse laat een conservatievere kustontwikkeling zien dan op basis van de historische analyse kan worden verwacht. Het is dan ook aannemelijk dat de sedimenttransporten zoals berekend zijn in de kwantitatieve analyse op basis van een  $D_{50}$  van 300  $\mu\text{m}$  conservatief zijn.

### **Kustvorm**

Voorgesteld is om op de plateaurand aan de zuidzijde (bij NIOZ) een ondiepe berm aan te leggen. In de kwantitatieve analyse is hiermee geen rekening gehouden. Het gevolg van de ondiepe berm is waarschijnlijk dat golven lager zullen worden nabij de duin. Het golfgedreven transport wordt dan ook kleiner.

### **Eolisch transport**

Eolisch transport is in de analyse niet meegenomen. Onbeschermd zand boven de waterlijn in het duin kan door eolisch transport uit het systeem verdwijnen. Korrels worden door zuiden- en oostenwind landwaarts getransporteerd en verdwijnen dan in de Prins Hendrikpolder. Door noorden- en westenwind wordt sediment zeewaarts getransporteerd, er is dan weinig golfgedreven transport te verwachten waardoor het aannemelijk is dat sediment in de geul verdwijnt.

Verwacht mag worden dat het eolisch transport gering is door de aanplant van helmgras op het duin.

### **Poldergemaal**

De invloed van het gemaal is niet meegenomen in de kwantitatieve analyse. Verwacht kan worden dat tijdens spuien een stroming wordt gecreëerd die sediment weg zou kunnen spoelen richting de Texelstroom. Een duidelijke erosietrend in de vorm van een geul ter hoogte van het gemaal mag dan in de huidige situatie worden verwacht. Deze is echter niet zichtbaar. Het lijkt dan ook aannemelijk dat de erosieve werking van het gemaal gering is.

### **Dwarstransport**

Golfcondities zijn gering en het is te verwachten dat golven breken op korte afstand van het aan te leggen duin. Dwarstransport vindt plaats in de brekerzone. De brekerzone bevindt zich volledig op het plateau. Dwarstransport van sediment richting de rand van het plateau is dan ook niet te verwachten.

### **Conclusie**

Gezien het voorgaande mag worden verwacht dat de langstransporten zoals berekend zijn in paragraaf 5.3 realistisch zijn.

## **4.3. Discussie resultaten**

De historische analyse heeft aangetoond dat het middendeel een langzame kustachteruitgang laat zien. Dit blijkt ook uit de kwantitatieve sedimenttransportanalyse. Rond sectie 3 lijkt het erop dat gemiddeld de kustlijn achteruit gaat. Er is een grote jaarlijkse spreiding van de erosiesnelheid.

De overige secties laten ook een gemiddelde achteruitgang zien. De verschillen per jaar zijn hier echter kleiner en de gemiddelde achteruitgang is met enkele decimeters (horizon-

taal) per jaar klein. De historische analyse laat een vergelijkbare erosiesnelheid zien (0,5 m verticaal in 18 jaar komt overeen met circa 0,5 m horizontaal per jaar).

Rond de uiteinden laat de historische analyse een stabiele kust zien. De transportberekeningen wijzen echter op kustachteruitgang aan de noordrand. Bij Oudeschild zou dit verklaard kunnen worden doordat we in de transportberekeningen uitgaan van verlies van sediment.

Aan de zuidkant bij het NIOZ verwachten we op basis van de transportberekeningen een kleine kustaanwas. Hier worden geen verliezen meegenomen in de berekening. We concluderen daarom dat er aan de zuidkant een verlies zou kunnen optreden.

Gemiddeld lijken de berekende resultaten redelijk goed overeen te komen met de historische analyse. Er is echter geen kalibratie gedaan van de modellen. Tevens wordt er in de nieuwe situatie een ander materiaal ( $D_{50}$  van 300  $\mu\text{m}$ ) aangebracht dan dat er op dit moment aanwezig is (siltige klei). Een veiligheidsfactor is daarom aan te bevelen.

We adviseren een veiligheidsfactor 2 te gebruiken op de verwachte kustontwikkeling en een minimale laagdikte aan te houden van 1,0 m (verticaal). Op deze manier wordt een egaal duinprofiel gecreëerd met voldoende veiligheid.

#### 4.4. Onderhoudsbehoefte

##### 4.4.1. Verwachte maximale onderhoudsbehoefte

Op basis van de verwachte maximale erosie is de onderhoudsbehoefte bepaald. Wij adviseren om de onderhoudsbehoefte zoals volgen uit tabel 4.6 met een factor 2 te vergroten. In tabel 4.7 zijn de te verwachte onderhoudsbehoeften gepresenteerd voor een onderhoudsperiode van 10 jaar.

**Tabel 4.7. Verwachte totale onderhoudsbehoefte (in  $\text{m}^3$ ) voor een onderhoudsvrije periode van 10 jaar**

sectie	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS	totaal
verwachte max erosie (m)	- 2,9	- 1,6	- 3,2	- 11,8	- 1,8	- 1,4	- 1,8	- 16,0	
slijtlaag (m)	6,0	3,0	6,5	23,5	3,5	3,0	3,5	32,0	
breedte sectie (m)	250	532	488	542	493	465	646	250	
hoogte duinprofiel (m)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	
hoeveelheid ( $\text{m}^3$ )	14.250	15.162	30.134	121.002	16.392	13.253	21.480	76.000	307.672

De totale onderhoudsbehoefte voor een periode van 10 jaar is circa 310.000  $\text{m}^3$ . In tabel 4.8 zijn de verwachte onderhoudsbehoeftes weergegeven voor andere onderhoudsvrije periodes.

**Tabel 4.8. Verwachte totale onderhoudsbehoefte (in  $\text{m}^3$ ) voor verschillende onderhoudsvrije periodes**

	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS	totaal
1 jaar	4.750	2.527	4.636	36.043	2.342	4.418	9.206	11.875	75.796
5 jaar	9.500	10.108	18.544	97.831	9.367	11.044	12.274	48.688	217.355
10 jaar	14.250	15.162	30.134	121.002	16.392	13.253	21.480	76.000	307.672

#### 4.4.2. Bandbreedte onderhoudsbehoefte

In deze paragraaf wordt de bandbreedte van de onderhoudsbehoefte in kaart gebracht. In het kort zullen we ingaan op de volgende aspecten:

- suppletiebehoefte bij het voorgestelde onderhoud;
- minimale onderhoudsbehoefte;
- maximale onderhoudsbehoefte;
- effect van transport over de randen;
- effect van onderhoudsperiode.

##### Minimale onderhoudsbehoefte

In de analyse wordt ervan uitgegaan dat er aan de noordrand 50 % verlies van sediment optreedt. De historische analyse laat zien dat de kustlijn hier stabiel is. Bij het vaststellen van de minimale onderhoudsbehoefte is er van uitgegaan dat er geen verlies over de randen plaatsvindt en dat de jaarlijkse teruggang op basis van gemiddelde erosie plaatsvindt (in plaats van maximale erosie over 10 jaar).

In tabel 5.7 is uitgegaan dat er van geen verlies over de randen optreedt. De onderhoudsbehoefte zou minimaal circa 130.000 m<sup>3</sup> per 10 jaar zijn.

**Tabel 4.9. Verwachte minimale onderhoudsbehoefte voor een onderhoudsperiode van 10 jaar**

sectie	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS	totaal
verwachte gem erosie (m)	0,0	- 0,9	- 2,2	- 8,1	- 1,7	- 0,4	0,0	0,0	
slijtlaag (m)	0,0	1,5	4,5	16,0	3,5	1,0	0,0	0,0	
breedte sectie (m)	250	532	488	542	493	465	646	250	
hoogte duinprofiel (m)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	
hoeveelheid (m3)	0	7.581	20.862	82.384	16.392	4.418	0	0	131.637

##### Maximale onderhoudsbehoefte

Vervolgens laten we nog zien wat de kustlijnontwikkeling zou zijn als we uitgaan van 100 % verlies aan de randen, zowel aan de noordrand (Oudeschild) als aan de zuidrand (NIOZ). We gaan hier tevens uit van een veiligheidsfactor 3 ten aanzien van de berekende verwachte maximale erosie. Goed te zien is ook nu de relatief grote suppleties bij Oudeschild en het NIOZ.

De maximale onderhoudsbehoefte zou circa 760.000 m<sup>3</sup> per 10 jaar zijn als al het sediment over de randen verdwijnt en een veiligheidsfactor van 3 wordt gebruikt met betrekking tot de verwachte maximale erosie. Het gaat hier dan ook om een 'worst-case' die niet bevestigd wordt door historische gegevens.

**Tabel 4.10. Verwachte maximale onderhoudsbehoefte voor een onderhoudsperiode van 10 jaar**

sectie	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS	totaal
verwachte max erosie (m)	- 25,4	- 1,6	- 3,2	- 11,8	- 1,8	- 1,4	- 1,8	- 35,0	
slijtlaag (m)	76,5	4,5	9,5	35,5	5,5	4,0	5,5	105,0	
breedte sectie (m)	250	532	488	542	493	465	646	250	
hoogte duinprofiel (m)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	
hoeveelheid (m3)	181.688	22.743	44.042	182.790	25.759	17.670	33.754	249.375	757.820

## Conclusie en samenvattende tabel

In tabel 5.10 is de bandbreedte ten aanzien van de totale onderhoudsbehoefte aangegeven. Goed te zien is het grote verschil tussen de minimale behoefte en maximale behoefte.

**Tabel 4.11. Bandbreedte totale onderhoudsbehoefte in 50 jaar**

	voorgesteld	minimaal	maximaal
behoefte per 10 jaar	307.672	131.637	757.820

Opgemerkt moet worden dat de maximale onderhoudsbehoefte een extreme 'worst-case' is die niet wordt ondersteund door historische data. Verwacht mag worden dat de voorgestelde hoeveelheden dan ook realistisch zijn.

## 5. CONCLUSIE EN DISCUSSIE VAN DE QUICK SCAN

De resultaten uit de 'quick-scan' lieten zien dat een zuidwaarts transport waarschijnlijk was. Dit was gebaseerd op de dominante Noordoostelijke wind- en golfrichting. Echter, de invloed van de hogere golven uit het Zuidwesten is groter op het sediment transport, wat er toe leidt dat er een klein netto noordwaarts transport te verwachten is.

Locale golfcondities zijn bepaald langs 7 raaien met behulp van het spectrale golfmodel SWAN. Het gebuikte golfmodel is gebaseerd op het 'Westelijke Waddenzee model' dat is geprepareerd voor eerdere studies. Uit [ref. 1.] is gebleken dat de prestaties van dit model zeer goed zijn, met name voor de integrale golfparameters in de Westelijke Waddenzee.

Langstransporten zijn bepaald door de 7 raaien op basis van de locale golfcondities met behulp van UNIBEST CL+. Deze berekeningen zijn uitgevoerd door Deltares. De resultaten leiden tot een database waarin locale sedimenttransporten zijn gerelateerd aan windcondities en waterstanden.

Jaargemiddelde langstransporten zijn vervolgens bepaald voor alle raaien. Door te interpoleren tussen de resultaten op basis van de strategische invoer condities, is voor elke conditie het sedimenttransport bepaald. Een historische tijdreeks van 30 jaar is hiervoor als input gediend. De historische tijdreeks is beschikbaar voor De Hors, op korte afstand van het interesse gebied.

Per jaar is een sedimentbalans opgesteld. Een statistische analyse op deze jaarbalansen heeft een kansverdeling voor de te verwachten kustontwikkeling opgeleverd. Op basis van deze statistische analyse is de minimale dikte van de slijtlaag bepaald.

We komen tot de conclusie dat de totale onderhoudsbehoefte voor een periode van 10 jaar circa 310.000 m<sup>3</sup> is om gedurende een periode van 10 jaar onderhoudsvrij te zijn. Voor andere onderhoudsvrije periodes zijn de gegevens weergegeven in hoofdstuk 4.

Initieel zal dit volume bij aanleg moeten worden aangebracht om te zorgen voor een minimale veiligheid gedurende een onderhoudsvrije periode van 10 jaar na aanleg. Echter vinden wij de dikte van de aangebrachte laag initieel gering. Wij adviseren daarom om initieel bij aanleg van het duin een extra buffer aan te leggen die het duin meer 'body' moet geven. Deze buffer zou een minimale laag dikte van 1 meter over het hele profiel moeten garanderen.

**Tabel 5.1. Verwachte initiële zandbehoefte voor een onderhoudsvrije periode van 10 jaar**

	NIOZ	1	2	3	4	5	6	OS	totaal
10 jaar (m <sup>3</sup> )	14.250	15.162	30.134	121.002	16.392	13.253	21.480	76.000	307.672
minimaal volume (m <sup>3</sup> )	37.500	79.800	73.200	81.300	73.950	69.750	96.900	37.500	
extra aan te brengen (m <sup>3</sup> )	23.250	64.638	43.066	0	57.558	56.498	75.421	0	320.430
extra breedte duin (m)	9,8	12,8	9,3	0,0	12,3	12,8	12,3	0,0	
totaal aan te brengen (m <sup>3</sup> )	37.500	79.800	73.200	121.002	73.950	69.750	96.900	76.000	628.102
totale kruinbreedte initieel	15,8	15,8	15,8	23,5	15,8	15,8	15,8	32,0	

Het totale volume dat initieel aangebracht wordt bij aanleg is dan circa 630.000 m<sup>3</sup>.

## 6. REFERENTIES

1. Witteveen+Bos (2010), Verification of SWAN in western Wadden Sea. Hindcast January and November storms. Rapport DT329-1, 31 August, 2010.
2. Young, I.R. en Verhagen, L.A. (1996), 'The growth of fetch-limited waves in water of finite depth. Part I: total energy and peak frequency'. Coastal Engineering, volume 28, pp 47-48.

## **BIJLAGE V KOSTENRAMING**



**Samenvatting raming**

0

Kostengroepen Kostencategorieën	Directe kosten			Voorziene kosten	Risicoreservering	Totaal
	Benoemd	Nader te detailleren	Indirecte kosten			
<b>Investeringskosten (indeling naar categorie):</b>						
Bouwkosten zandige oplossing sectie 9	€ 47.863.565	€ 2.393.178	€ 9.900.578	€ 60.157.322	€ -	€ 60.157.322
Bouwkosten	€ 47.863.565	€ 2.393.178	€ 9.900.578	€ 60.157.322	€ -	€ 60.157.322
Vastgoedkosten zandige oplossing sectie 9	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Vastgoedkosten	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Engineeringkosten zandige oplossing sectie 9	€ -	€ -	€ 3.609.439	€ 3.609.439	€ -	€ 3.609.439
Engineeringkosten	€ -	€ -	€ 3.609.439	€ 3.609.439	€ -	€ 3.609.439
Overige bijkomende kosten zandige oplossing sectie 9	€ 1.503.933	€ -	€ -	€ 1.503.933	€ -	€ 1.503.933
Overige bijkomende kosten	€ 1.503.933	€ -	€ -	€ 1.503.933	€ -	€ 1.503.933
<b>Subtotaal investeringskosten</b>	<b>€ 49.367.498</b>	<b>€ 2.393.178</b>	<b>€ 13.510.018</b>	<b>€ 65.270.694</b>	<b>€ -</b>	<b>€ 65.270.694</b>
Objectoverstijgende risico's					€ 6.527.069	€ 6.527.069
<b>Investeringskosten deterministisch</b>	<b>€ 49.367.498</b>	<b>€ 2.393.178</b>	<b>€ 13.510.018</b>	<b>€ 65.270.694</b>	<b>€ 6.527.069</b>	<b>€ 71.797.764</b>
Scheefte					€ 4.223.264	€ 4.223.264
<b>Investeringskosten exclusief BTW</b>				<b>€ 65.270.694</b>	<b>€ 10.750.334</b>	<b>€ 76.021.028</b>
BTW				€ 11.857.151	€ 2.586.844	€ 14.443.995
<b>Investeringskosten inclusief BTW</b>				<b>€ 77.127.845</b>	<b>€ 13.337.178</b>	<b>€ 90.465.023</b>
<i>Bandbreedte : met 70% zekerheid liggen de investeringskosten inclusief BTW tussen</i>				€ 65.431.067	en	€ 116.044.808
<i>Variatiecoëfficiënt</i>					26%	
<b>Levensduurkosten:</b>						
<b>Subtotaal levensduurkosten</b>	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Objectoverstijgende risico's					€ -	€ -
<b>Levensduurkosten deterministisch</b>	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Scheefte					€ -	€ -
<b>Levensduurkosten exclusief BTW</b>				€ -	€ -	€ -
BTW				€ -	€ -	€ -
<b>Levensduurkosten inclusief BTW</b>				€ -	€ -	€ -
<i>Bandbreedte : met 70% zekerheid liggen de levensduurkosten inclusief BTW tussen</i>				€ -	en	€ -
<i>Variatiecoëfficiënt</i>					#GETAL!	
<b>Projectkosten inclusief BTW</b>				<b>€ 77.127.845</b>	<b>€ 13.337.178</b>	<b>€ 90.465.023</b>
				85%	15%	100%



<b>Samenvatting raming</b>							0
Kostengroepen	Kostencategorieën			Voorziene kosten	Risicoreservering	Totaal	
	Directe kosten Benoemd	Directe kosten Nader te detaileren	Indirecte kosten				
Budgetvaststelling investeringskosten:							
Investeringskosten inclusief BTW				€ 77.127.845	€ 13.337.178	€ 90.465.023	
Onzekerheidsreserve (in te vullen door financier)					€ -	€ -	
Reservering scope wijzigingen (in te vullen door financier)					€ -	€ -	
<b>Aan te houden risicoreservering en totaal budget investeringskosten</b>				<b>€ 77.127.845</b>	<b>€ 13.337.178</b>	<b>€ 90.465.023</b>	
Budgetvaststelling levensduurkosten:							
Levensduurkosten inclusief BTW				€ -	€ -	€ -	
Onzekerheidsreserve (in te vullen door financier)					€ -	€ -	
Reservering scope wijzigingen (in te vullen door financier)					€ -	€ -	
<b>Aan te houden risicoreservering en totaal budget levensduurkosten</b>				<b>€ -</b>	<b>€ -</b>	<b>€ -</b>	

**Probabilistische resultaten**

SSK-Rekenmodel, versie 2.1 (29-04-2011)

Probabilistische parameters

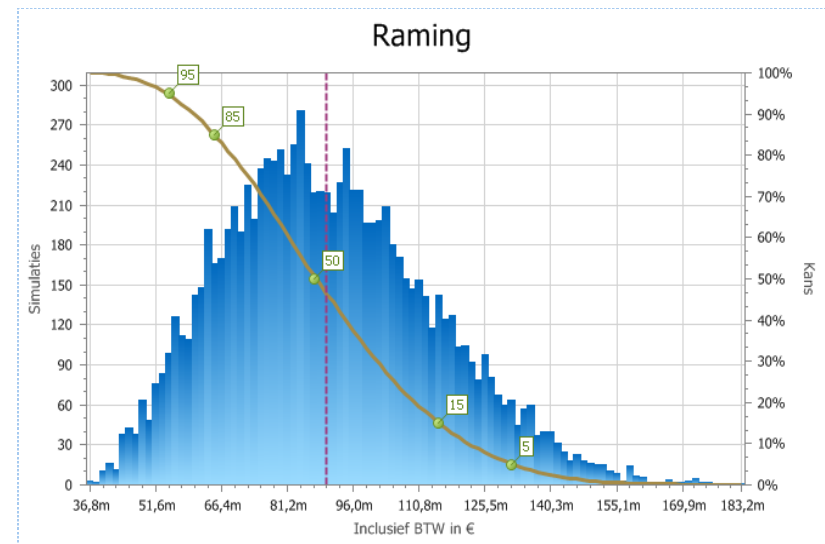
Simulatie datum	2 september 2011
Simulatie aantal	€ 10.000
Afhankelijkheid	Afhankelijk
Verdeling	Driehoek
Over- en onderschrijdingskans	5%

Probabilistische resultaten investeringskosten

Deterministische investeringskosten inclusief BTW = modus (T_waarde)	€ 85.439.339
Scheefte investeringskosten inclusief BTW	€ 5.025.685
<b>Probabilistische investeringskosten inclusief BTW = gemiddelde (Mu_waarde)</b>	<b>€ 90.465.023</b>
<b>Variatiecoëfficiënt investeringskosten</b>	<b>26%</b>
Standaardafwijking investeringskosten	€ 23.697.987
Scheefheid	0,41
Minimum waarde	€ 36.078.524
Maximum waarde	€ 183.945.222
P5 (investeringskosten met 95% kans op overschrijding)	€ 54.821.535
<b>P15 (investeringskosten met 85% kans op overschrijding)</b>	<b>€ 65.431.067</b>
P50 (investeringskosten met 50% kans op overschrijding) = mediaan	€ 88.372.024
<b>P85 (investeringskosten met 15% kans op overschrijding)</b>	<b>€ 116.044.808</b>
P95 (investeringskosten met 5% kans op overschrijding)	€ 132.591.858

Suppletie zand t.b.v. slijtlaag, onderhoud, (object: 1, oorzaak: hoeveelheid)	32,52%
Suppletie zand in duin, (object: 1, oorzaak: hoeveelheid)	15,04%
Suppletie zand in duin, (object: 1, oorzaak: prijs)	14,76%
Suppletie zand t.b.v. gevarieerde duin, (object: 1, oorzaak: hoeveelheid)	7,24%
Suppletie zand t.b.v. gevarieerde duin, (object: 1, oorzaak: prijs)	6,12%
Suppletie zand t.b.v. slijtlaag, onderhoud, (object: 1, oorzaak: prijs)	5,68%
Domeinafdracht zand, (object: 1, oorzaak: hoeveelheid)	3,80%
Suppletie zand in vloedhaak en eiland, (object: 1, oorzaak: hoeveelheid)	3,57%
Overig	11,26%
Totaal	100,00%

Risicobijdragen investeringskosten (kostenposten die de grootte van de standaardafwijking bepalen)



Afbeelding 1. Kansdichtheidsfunctie en/of kansverdelingfunctie van de investeringskosten

Zandige oplossing sectie 9												0					
Code	Omschrijving post	Hoeveelheid	Eenheid	Prijs	Totaal	BTW %	BTW bedrag	Spreidingen hoeveelheden absoluut			Spreidingen hvd %		Spreidingen prijzen absoluut		Spreidingen prijzen %		
								Hoeveelheid L_waarde	Hoeveelheid T_waarde	Hoeveelheid U_waarde	Hvd L (%)	Hvd U (%)	Prijs L_waarde	Prijs U_waarde	Prijs L (%)	Prijs U (%)	
<b>Investeringskosten:</b>																	
1B	GRONDWERK	#	-	€ -	€ -	19%	€ -	-	-	-	0%	0%	€ -	€ -	0%	0%	
1B13	Leveren en verwerken zand t.b.v. verbreding duin	10.000	m3	€ 16,00	€ 160.000	19%	€ 30.400	7.500,00	10.000,00	12.500,00	25%	25%	€ 12,80	€ 17,60	20%	10%	
1B14	Suppletie zand in duin	2.240.000	m3	€ 5,59	€ 12.521.600	19%	€ 2.379.104	1.680.000,00	2.240.000,00	2.800.000,00	25%	25%	€ 4,47	€ 7,27	20%	30%	
1B15a	Suppletie zand t.b.v. slijtlaag	630.000	m3	€ 5,59	€ 3.521.700	19%	€ 669.123	472.500,00	630.000,00	787.500,00	25%	25%	€ 4,47	€ 7,27	20%	30%	
1B15b	Suppletie zand t.b.v. slijtlaag, onderhoud	1.240.000	m3	€ 6,11	€ 7.571.440	19%	€ 1.438.574	520.800,00	1.240.000,00	2.008.800,00	58%	62%	€ 4,88	€ 7,94	20%	30%	
1B16	Suppletie zand in vloedhaak en eiland	1.083.125	m3	€ 5,59	€ 6.054.669	19%	€ 1.150.387	812.343,75	1.083.125,00	1.353.906,25	25%	25%	€ 4,47	€ 7,27	20%	30%	
1B17	Suppletie zand t.b.v. gevarieerde duin	1.520.000	m3	€ 5,59	€ 8.496.800	19%	€ 1.614.392	1.140.000,00	1.520.000,00	1.900.000,00	25%	25%	€ 4,47	€ 7,27	20%	30%	
1B18	Domeinafdracht zand	6.713.125	m3	€ 0,84	€ 5.639.025	19%	€ 1.071.415	4.699.187,50	6.713.125,00	8.727.062,50	30%	30%	€ 0,84	€ 0,84	0%	0%	
-	-	-	-	€ -	€ -	19%	€ -	-	-	-	0%	0%	€ -	€ -	0%	0%	
1D	HARDE BEKLEDINGEN	-	-	€ -	€ -	19%	€ -	-	-	-	0%	0%	€ -	€ -	0%	0%	
1D11	Schanskorven met oesters	100.000	m2	€ 25,00	€ 2.500.000	19%	€ 475.000	75.000,00	100.000,00	125.000,00	25%	25%	€ 22,50	€ 37,50	10%	50%	
-	-	-	-	€ -	€ -	19%	€ -	-	-	-	0%	0%	€ -	€ -	0%	0%	
1E	CONSTRUCTIES EN KUNSTWERKEN	-	-	€ -	€ -	19%	€ -	-	-	-	0%	0%	€ -	€ -	0%	0%	
1E9	Leveren en aanbrengen damwand AZ26	260	m2	€ 185,00	€ 48.100	19%	€ 9.139	195,00	260,00	325,00	25%	25%	€ 148,00	€ 240,50	20%	30%	
-	-	-	-	€ -	€ -	19%	€ -	-	-	-	0%	0%	€ -	€ -	0%	0%	
1F	GEMAAL	-	-	€ -	€ -	19%	€ -	-	-	-	0%	0%	€ -	€ -	0%	0%	
1F1	Aanbrengen stalen leiding van ø1000x20 mm	700	m	€ 1.100,00	€ 770.000	19%	€ 146.300	525,00	700,00	875,00	25%	25%	€ 825,00	€ 1.375,00	25%	25%	
1F2	Versterken waterleiding	100	m	€ 500,00	€ 50.000	19%	€ 9.500	75,00	100,00	125,00	25%	25%	€ 300,00	€ 700,00	40%	40%	
1F3	Terugslagklep ø1000mm	2	st	€ 2.700,00	€ 5.400	19%	€ 1.026	2,00	2,00	2,00	0%	0%	€ 2.160,00	€ 3.375,00	20%	25%	
1F4	Schuifafsluiter ø1000mm	2	st	€ 9.000,00	€ 18.000	19%	€ 3.420	2,00	2,00	2,00	0%	0%	€ 7.200,00	€ 11.250,00	20%	25%	
1F5	Schuifafsluiter ø1000mm in betonschacht 1500x1500mm hg 5 m	2	st	€ 18.000,00	€ 36.000	19%	€ 6.840	2,00	2,00	2,00	0%	0%	€ 14.400,00	€ 22.500,00	20%	25%	
1F6	Betonnen uitstroombak	2	st	€ 4.500,00	€ 9.000	19%	€ 1.710	2,00	2,00	2,00	0%	0%	€ 3.600,00	€ 5.400,00	20%	20%	
-	-	-	-	€ -	€ -	19%	€ -	-	-	-	0%	0%	€ -	€ -	0%	0%	
1H	DIVERSEN	-	-	€ -	€ -	19%	€ -	-	-	-	0%	0%	€ -	€ -	0%	0%	
1H8	Planten helmgras	320.000	m2	€ 0,25	€ 80.000	19%	€ 15.200	240.000,00	320.000,00	400.000,00	25%	25%	€ 0,18	€ 0,30	30%	20%	
1H9	Overgangconstructie sectie E9 (DBK / lengte 9E)	100	m	€ 3.818,31	€ 381.831	19%	€ 72.548	75,00	100,00	125,00	25%	25%	€ 3.054,65	€ 4.581,98	20%	20%	
	<b>Benoemde directe bouwkosten</b>				€ 47.863.565		€ 9.094.077										
Code	Nader te detailleren bouwkosten	#	5,00%	-	€ 47.863.565,08	€ 2.393.178	€ 454.704	0,05	0,05	0,05	0%	0%					
	<b>Directe bouwkosten</b>				€ 50.256.743		€ 9.548.781										
Code	Algemene bouwplaatskosten	#	1,00%	-	€ 50.256.743,34	€ 502.567	€ 95.488	0,01	0,01	0,01	30%	30%					
Code	Uitvoeringskosten	#	3,00%	-	€ 50.256.743,34	€ 1.507.702	€ 286.463	0,02	0,03	0,04	30%	30%					
Code	Algemene kosten	#	7,00%	-	€ 50.256.743,34	€ 3.517.972	€ 668.415	0,05	0,07	0,09	30%	30%					
Code	Winst en/of risico	#	3,00%	-	€ 50.256.743,34	€ 1.507.702	€ 286.463	0,02	0,03	0,04	30%	30%					
	<b>Indirecte bouwkosten</b>		14,00%	t.o.v. directe bouwkosten	€ 7.035.944		€ 1.336.829										
	<b>Voorziede bouwkosten</b>				€ 57.292.687		€ 10.885.611										
Code	Niet benoemd objectrisico bouwkosten	#	5,00%	-	€ 57.292.687,40	€ 2.864.634	€ 544.281	0,05	0,05	0,07	10%	30%					
	<b>Risico's bouwkosten</b>		5,00%	t.o.v. voorziede bouwkosten	€ 2.864.634		€ 544.281										
<b>BK01</b>	<b>Bouwkosten zandige oplossing sectie 9</b>				€ 60.157.322	19,00%	€ 11.429.891										
<b>VK01</b>	<b>Vastgoedkosten zandige oplossing sectie 9</b>				€ -	0,00%	€ -										
Code	Engineeringskosten aannemer(s), % over de bouwkosten	#	0,00%	-	€ 60.157.321,77	€ -	€ -	-	-	-	0%	0%					
Code	Engineeringskosten adviesbureau(s), % over de bouwkosten	#	6,00%	-	€ 60.157.321,77	€ 3.609.439	€ 685.793	0,05	0,06	0,08	10%	40%					
Code	Engineeringskosten opdrachtgever, % over de bouwkosten	#	0,00%	-	€ 60.157.321,77	€ -	€ -	-	-	-	0%	0%					
	<b>Benoemde directe engineeringkosten</b>				€ 3.609.439		€ 685.793										
<b>EK01</b>	<b>Engineeringkosten zandige oplossing sectie 9</b>				€ 3.609.439	19,00%	€ 685.793										
Code	Heffingen en leges vergunningen, % over de bouwkosten	#	0,00%	-	€ 55.784.985,10	€ -	€ -	-	-	-	0%	0%					
Code	Verzekeringskosten, % over de bouwkosten	#	0,00%	-	€ 55.784.985,10	€ -	€ -	-	-	-	0%	0%					
Code	Procentuele post overige bijkomende kosten, % over de bouwkosten	#	2,50%	-	€ 60.157.321,77	€ 1.503.933	€ 285.747	0,02	0,03	0,04	20%	40%					
	<b>Risico's overige bijkomende kosten</b>		0,00%	t.o.v. voorz. overige bijk. kosten	€ -		€ -										
<b>OBK01</b>	<b>Overige bijkomende kosten zandige oplossing sectie 9</b>				€ 1.503.933	19,00%	€ 285.747										
<b>INV01</b>	<b>Investeringskosten zandige oplossing sectie 9</b>				€ 65.270.694	19,00%	€ 12.401.432										

## BIJLAGE VI TEKENING ONTWERP ZOP



