

# MARKER WADDEN - ONTWERP EN VERIFICATIE

**Object: RA2 - zachte randen (module D)**

15 MEI 2017

**MW-UO-WP-OW04-D**

*Status: definitief*



## Contactpersonen



**Advisor Coastal Projects**



Arcadis Nederland B.V.  
Postbus 137  
8000 AC Zwolle  
Nederland

# INHOUDSOPGAVE

<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>5</b>
1.1	Achtergrond	5
1.2	Doel	6
1.3	Objecten en functie	7
1.4	Leeswijzer	7
<b>2</b>	<b>EISENOVERZICHT</b>	<b>8</b>
2.1	Vraagspecificatie Eisen (VSE)	8
2.2	Vraagspecificatie Proces (VSP)	9
2.3	Afgeleide eisen en EMVI-beloften	10
<b>3</b>	<b>ONTWERPBESCHRIJVING</b>	<b>12</b>
3.1	Algemene beschrijving	12
3.2	Zachte randen: Modules A, B en C	13
3.3	Zachte randen: Module D	15
3.4	Raakvlakken met andere objecten	20
<b>4</b>	<b>ONTWERPUITGANGSPUNTEN</b>	<b>21</b>
4.1	Te verifiëren ontwerptekeningen	21
4.2	Hydraulische condities	21
4.2.1	Wind	21
4.2.2	Waterstanden	23
4.2.3	Golven	23
4.2.4	Stroming	25
4.3	Sediment karakteristieken	25
4.4	Geotechnische randvoorwaarden	26
<b>5</b>	<b>ONTWERPBESCHOUWINGEN (MODULE D)</b>	<b>27</b>
5.1	Ontwerp zanddammen module D	27
5.1.1	Dimensionering van de zanddammen	28
5.1.2	Morfologische stabiliteit van westelijke luwtedammen	33
5.1.3	Morfologische stabiliteit van oostelijke buitenrand	34

5.1.4	Onderhoudsbehoefte oostelijke buitenrand	39
5.1.5	Positionering van palenrijen	43
5.1.6	Geotechnische aspecten	43
<b>5.2</b>	<b>Ontwerpdetail: zandbuffers langs oostelijke buitenrand</b>	<b>44</b>
5.2.1	Onderhoudsbehoefte van oostelijke buitenrand	44
5.2.2	Risico: functieverlies van zandrand ter plaatse van de knikpunten	45
5.2.3	Ontwerpoplossing: zandbuffers ter plaatse van knikpunten	45
<b>5.3</b>	<b>Ontwerpdetail: zuidpunt van moeraseiland D3</b>	<b>46</b>
5.3.1	Bescherming van de zuidpunt van module D	46
5.3.2	Risico: functieverlies van zandrand ter plaatse van zuidelijke punt eiland D3	47
5.3.3	Ontwerpoplossing: aansluiting op zuidwestelijke strandrand	47
<b>5.4</b>	<b>Ontwerpdetail: overige aandachtspunten</b>	<b>50</b>
5.4.1	Zandrand tussen 'plas-dras' en 'diep water' (eiland D2)	50
5.4.2	Relatief groot gebied 'beschut ondiep water' (eiland D3)	51
<b>5.5</b>	<b>Monitoring van zandige buitenrand (oostzijde)</b>	<b>52</b>
5.5.1	Bevindingen o.b.v. bodemmetingen oostelijke buitenrand module A+B	52
5.5.2	Aandachtspunten t.a.v. toekomstige monitoring	54
<b>6</b>	<b>VERIFICATIE EN VALIDATIE</b>	<b>55</b>
6.1	Verificatie	55
6.2	Validatie	61
<b>7</b>	<b>UITVOERINGSASPECTEN</b>	<b>62</b>
7.1	Uitvoeringsfasering	62
7.2	Uitvoeringseisen	62
<b>8</b>	<b>RISICO'S</b>	<b>64</b>
8.1	Ontwerprisico's	64
8.2	Uitvoeringsrisico's	65
	<b>REFERENTIES</b>	<b>66</b>



# 1 INLEIDING

## 1.1 Achtergrond

Natuurmonumenten en Rijkswaterstaat beogen in het Markermeer een archipel van natuureilanden te realiseren: de Marker Wadden (zie Figuur 1). Voorliggende nota heeft betrekking op het ontwerp van module D van de Marker Wadden; zijnde een uitbreiding op een eerder opgestelde ontwerp voor modules A, B en C.

In september 2015 hebben Natuurmonumenten en Rijkswaterstaat opdracht verleend tot de realisatie van modules A en B, met als doel om een belangrijke bijdrage te leveren aan herstel en ontwikkeling van het ecosysteem van het Markermeer. Het voornemen is om dit te doen door een combinatie van maatregelen gericht op vermindering van de slibproblematiek van het Markermeer, het vergroten van de biodiversiteit door het ontwikkelen van moeras en overgangszones tussen water en land, waarin een vogelparadijs kan ontstaan. Modules A en B worden toegankelijk gemaakt voor recreatie door middel van een buitenhaven. Er wordt voorzien in zandstranden, wandelpaden, een uitkijktoren, vogelkijkhutten en een speelvallei.

Momenteel is reeds de basis van de eerste twee modules (A en B) gerealiseerd<sup>1</sup>. De aanleg van modules C en D is inmiddels voorzien als een vervolgfase; de realisatie hiervan start in het voorjaar van 2017.

Het ontwerp van de zandige objecten van modules A, B en C is reeds beschouwd in een voorgaande ontwerpnota met het documentkenmerk *MW-UO-WP-OW04*. De voorliggende ontwerpnota gaat specifiek in op het ontwerp en de verificatie van de zandige buitenranden van module D.



Figuur 1 Overzichtswaarschuwing van de Marker Wadden, met aanduiding van de verschillende modules.

<sup>1</sup> Stand van zaken in februari 2017: de basis van modules A en B (zandranden en initiële opvulling compartimenten) is gerealiseerd.

## 1.2 Doel

### Doelstelling van het Project

#### Doelen en kader voor Eerste fase Marker Wadden

Het plan is om het Markermeer een eerste kwaliteitsimpuls te geven door het realiseren van het plan Marker Wadden. Op hoofdlijnen houdt het plan in dat een stelsel van natuureilanden boven water en ondieptes, slibvangende geulen en zandwinputten onder water wordt gerealiseerd, om zodoende de matige kwaliteit van het ecologische systeem van het Markermeer toekomstbestendig te verbeteren. In het ideale plaatje bestaat Marker Wadden op termijn uit een weergaloos vogelparadijs in de vorm van wetlands verspreid over een oppervlakte van ongeveer tienduizend hectare met daar tussen gelegen rijke visgronden, mosselgebieden en waterplantenvegetaties. Een dergelijk plan is financieel gezien niet in één keer te realiseren. Daarom is het voornemen om het plan gefaseerd te realiseren; te beginnen met een zo groot mogelijke eerste fase bestaande uit een (of meerdere) natuureiland(en) gecombineerd met een slibvangend systeem en een aanzet tot rijke onderwaternatuur.

Het projectdoel van de eerste fase is om de ecologische toestand van het Markermeer te verbeteren door middel van het deels vastleggen en deels invangen van slib en het met slib en ander bodemmateriaal realiseren van een moerasgebied in de vorm van een natuureiland, met een na te streven areaal van circa 500 hectare, ter bevordering van de habitatdiversiteit. Daarnaast is het doel het ontwikkelen van nieuwe methoden om met slib of ander zacht materiaal efficiënt natuurgebieden aan te leggen.

**Bron: "Eerste fase Marker Wadden – Vraagspecificatie Eisen (VSE)"**

### Doel van voorliggend document

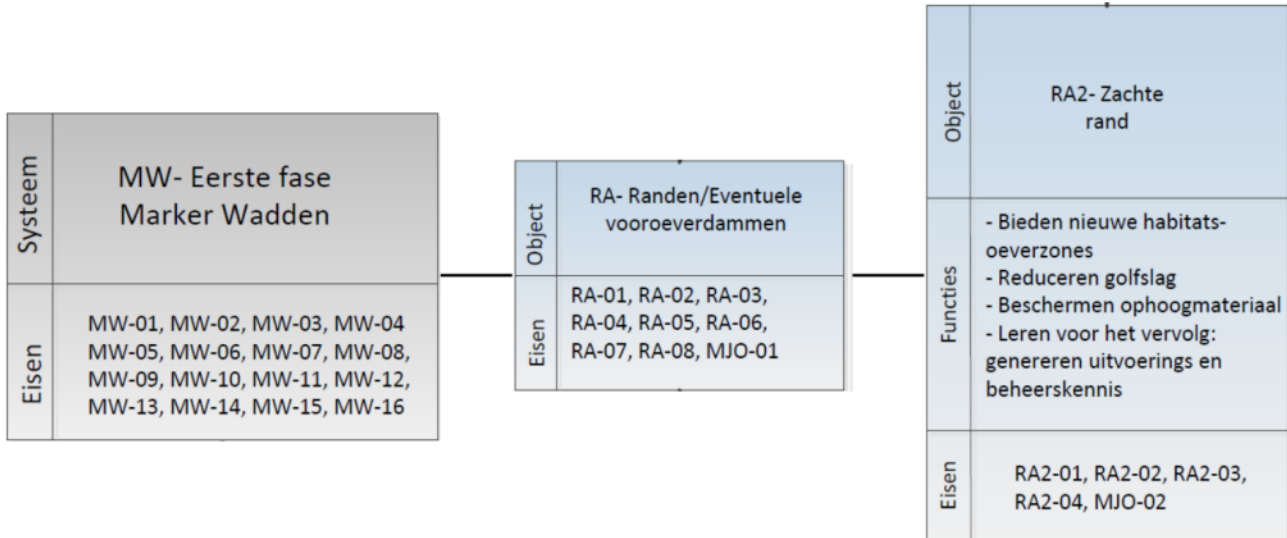
Voorliggend document betreft een rapportage waarin het uitvoeringsontwerp (UO) voor **de zandige delen van module D van de Marker Wadden** is beschreven, en waarin alle relevante verificaties zijn beschreven om aan te tonen dat het ontwerp voldoet aan de gestelde (functionele) eisen. Hierbij komen o.a. de volgende punten aan bod:

- Vastlegging van de technische onderbouwing van het ontwerp;
- Vastlegging van de eisen en verificaties voor de betreffende (deel-)objecten;
- Vastlegging van raakvlakken en risico's;
- Doorkijk naar de uitvoeringsfase (fasering, uitvoeringseisen, toleranties).

### 1.3 Objecten en functie

In voorliggende nota wordt specifiek aandacht besteed aan één object binnen het systeem Marker Wadden:

- RA2 – Zachte rand



Figuur 2 Uitsnede van de objectenboom voor het project Marker Wadden: object RA2 (zachte rand).

### 1.4 Leeswijzer

Voorliggend document heeft betrekking op het ontwerp van de zandige buitenranden van module D van de Marker Wadden. Na het inleidende hoofdstuk (H1) is in Hoofdstuk 2 allereerst een overzicht gegeven van alle – voor object RA2 (zachte rand) – relevante eisen die volgen uit de Vraagspecificaties, de EMVI-documenten en de nadere eisenanalyses. In Hoofdstuk 3 is een beschrijving gegeven van het ontwerp, per (deel-) object, en zijn de raakvlakken met overige objecten benoemd.

Hoofdstuk 4 en Hoofdstuk 5 gaan specifiek in op de inhoudelijke ontwerpzaken. Het eerstgenoemde hoofdstuk geeft een overzicht van de gehanteerde ontwerpuitgangspunten en het volgende hoofdstuk bevat een uitgebreide beschrijving van alle ontwerpberoevingen en analyses die relevant zijn voor de verificatie van het ontwerp. In Hoofdstuk 5 zijn de ontwerpberoevingen geclusterd per deelgebied en/of specifiek onderwerp.

De daadwerkelijke conclusies met betrekking tot de verificatie en de validatie van het ontwerp zijn gepresenteerd in Hoofdstuk 6, waarbij per gestelde eis wordt aangegeven of het ontwerp hieraan voldoet en waar de relevante inhoudelijke analyses en uitwerkingen zijn terug te vinden.

Hoofdstuk 7 geeft een doorkijk naar de uitvoeringsfase. In dit hoofdstuk komen onder andere de uitvoeringsfasering en de – uit het ontwerp volgende – uitvoeringseisen aan bod.

Als afsluiting is in Hoofdstuk 8 een overzicht gegeven van de vastgestelde ontwerp- en/of uitvoeringsrisico's waar, voor zover mogelijk, rekening mee gehouden dient te worden in de volgende fasen van het project.

## 2 EISENOVERZICHT

In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van alle eisen die zijn gesteld aan het ontwerp van de zandige delen van de Marker Wadden. Achtereenvolgens komen hieronder de volgende punten aan bod:

- Vraagspecificatie Eisen (VSE)
- Vraagspecificatie Proces (VSP)
- Afgeleide eisen en EMVI-beloften

### 2.1 Vraagspecificatie Eisen (VSE)

In Tabel 1 is een overzicht gegeven van alle eisen uit de Vraagspecificatie Eisen (VSE) die relevant zijn voor object RA2 (zachte rand). De tabel bevat enkel de eiscoderingen, de eistitels en de eisteksten. Eventuele aanvullende informatie zoals 'toelichting OG' of 'bovenliggende/onderliggende eisen' is terug te vinden in het Verificatierapport Eisen (MW-VER-020, VR WP-OW04 Zachte Rand).

Tabel 1 Relevante eisen uit de Vraagspecificatie Eisen (VSE) t.b.v. object RA2.

Code	Eistitel	Eistekst
<b>1</b>	<b>MW – Marker Wadden</b>	
MW-16	Erosie ten gevolge van een storm 1:50 jaar.	In habitat plas-dras mag erosie, ten gevolge van een storm die eens in de 50 jaar voorkomt (met een duur van 10 uur, met een trapezium verloop van 3-4-3 uur), leiden tot het verloren gaan van maximaal 5% van het aangelegde oppervlakte plas-dras.
<b>1.1</b>	<b>RA – Randen</b>	
MJO-01	Onderhoud aan randen en vooroeverdam (indien aangeboden)	Harde en zachte randen en (indien aangeboden) vooroeverdammen dienen zodanig onderhouden te worden dat deze aan de eisen gesteld aan deze objecten voldoen.
RA-01	Beschermen tegen weersinvloeden	Randen/dammen dienen de te realiseren objecten te beschermen tegen erosieprocessen als gevolg van wind, golfoverslag en kruierend ijs.
RA-04	Verhouding harde-zachte rand	Verhouding harde-zachte rand is ter keuze Opdrachtnemer mits minimaal 500m zachte rand aanwezig is.
RA-05	Evenwichtsprofiel zachte rand van zand	Een zachte rand dient een zodanig groot volume zand te hebben dat er na een maatgevende storm van eens in de 50 jaar nog steeds een kruin op ontwerphoogte aanwezig is met een minimale breedte van 3,0 m.
RA-07	Levensduur houten constructie	Een houten beschermingsconstructie dient een ontwerplevensduur te hebben van minimaal 20 jaar.
<b>1.1.2</b>	<b>RA2 – Zachte rand</b>	
MJO-02	Onderhoud zachte randen	Eventuele erosie van een zachte rand waardoor niet meer voldaan is aan de eisen RA-02, RA-03 en RA-05 dient binnen 6 weken na constatering hersteld te zijn.
RA2-01	Onbeschermd ligging	De 500m zachte rand dient niet beschermd te zijn met een vooroever en/of golfbreker.
RA2-02	Ligging aan loefzijde	De 500 m zachte rand dient aan de loefzijde te liggen ten opzichte van de overheersende windrichting (zijnde zuidwest).
RA2-03	Zachte rand is van zand	De 500 m zachte rand dient gemaakt te zijn van uitsluitend zand.



RA2-04	Bieden kennis	"De 500 m zachte rand dient kennis te bieden over de maakbaarheid, toepasbaarheid, onderhoudbaarheid, beheerbaarheid en het functioneren van een zand-rand in het Markermeer.
--------	---------------	---

#### Overige relevante eisen

HT1.2-06	Waterbodem is beschermd tegen golf-erosie	Golfbewegingen in ondiep water dienen de ontwikkeling van bodemleven niet nadelig te beïnvloeden.
HT2-05	Golfhoogte (beschutte oeverzone)	In de beschutte oeverzone dient de golfhoogte bij een storm die eens per jaar (=1:1) kan voorkomen, zodanig gereduceerd te zijn dat de golfhoogte maximaal 0,30 m bedraagt.

## 2.2 Vraagspecificatie Proces (VSP)

In Tabel 2 is een overzicht gegeven van de eisen uit de Vraagspecificatie Proces (VSP) die specifiek relevant zijn voor het ontwerp van object RA2 (zachte rand). De tabel bevat de eiscodering, de eistitel en de eistekst. Deze proceseisen zijn verwerkt in de ontwerp- en verificatiemethoden voor de verschillende functionele eisen die zijn gesteld aan het ontwerp. Zie ook Verificatierapport Proces-Eisen (MW-VER-26, VR proceseisen WP-OW04 Zachte rand).

Tabel 2 Relevante eisen uit de Vraagspecificatie Proces (VSP) t.b.v. objecten RA2, IE1 en IE3.

Code	Proceseis
<b>5.1.3</b>	<b>OW – Ontwerpen (Genereren van oplossingen)</b>
OW310 (punt 12)	<p>De Opdrachtnemer dient voor (de onderdelen van) het Werk de gegenereerde oplossingen te beschrijven waarbij ten minste zijn vastgelegd:</p> <p>12. De wijze van onderhouden van zandige constructies, waarbij in elk geval middels een DUROSplus berekening aangevuld met een langtransportberekening danwel X-Beach berekening (of gelijkwaardig) aangegeven wordt hoeveel zand gemiddeld jaarlijks aangevuld moet worden om het profiel stabiel te houden over gedurende een periode van 10 jaar en in het geval van een storm met een herhalingsperiode van 50 jaar.</p> <p>Ga uit van het gemiddeld jaar (=2006) in bijlage 1 van de VSE en ga voor de 1/50 storm uit van een stormduur van 10 uur. Voer dezelfde berekening nogmaals uit waarbij de windrichting 15 graden naar het noorden gedraaid is en voer een berekening uit waarbij de windrichting 15 graden naar het zuiden gedraaid is.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ De onderbouwing van de keuze van de toegepaste transportformule voor langtransport.</li> <li>▪ De onderbouwing van de keuze van de toegepaste D50 in de (model)berekeningen.</li> <li>▪ De werkwijze hoe tijdens de uitvoering wordt geborgd dat de beoogde D50 daadwerkelijk op de beoogde locatie wordt toegepast en bijbehorende bijstuuringsmaatregelen.</li> <li>▪ Hoe rekening is gehouden met verliezen van de fijne fractie zand als gevolg van stroming.</li> <li>▪ De onderbouwing van de verticale positie van slijt/onderhoudslagen in het ontwerp en de daaruit volgende totale volume dat nodig is op de onderhoudslaag in deze positie in het profiel te kunnen aanbrengen. Evenzo een onderbouwing voor de verticale positie en het volume voor een stormtoeslag behorende bij een 1/50 storm.</li> </ul>

## 2.3 Afgeleide eisen en EMVI-beloften

Tabel 3 toont een overzicht met alle aanvullende eisen die aan het ontwerp gesteld zijn. Het betreft een combinatie van afgeleide (onderliggende) eisen die volgen uit of relateren aan de eisen in de VSE en serie eisen/beloften die volgen uit de EMVI-documenten die zijn ingediend in de aanbestedingsfase. De tabel bevat enkel de eiscoderingen, de eistitels en de eisteksten. Eventuele aanvullende informatie zoals 'toelichting OG' of 'bovenliggende/onderliggende eisen' is terug te vinden in het complete eisenoverzicht in Verificatierapport Eisen (MW-VER-020, VR WP-OW04 Zachte Rand).

Tabel 3 Overzicht met afgeleide eisen en EMVI-beloften die voortkomen uit de eisen-analyse.

Code	Eistitel	Eistekst
<b>1</b>	<b>MW – Marker Wadden</b>	
<b>1.1</b>	<b>RA – Randen</b>	
<b>1.1.2</b>	<b>RA2 – Zachte rand</b>	
RA2-A-05	Beschermen tegen weersinvloeden >> zachte rand	De zachte randen dienen de achterliggende objecten te beschermen tegen erosie t.g.v. wind en golfslag.
RA2-A-06	Bescherming tegen golven (loefzijde)	De zachte (strand)randen langs de ZW en NW randen van de Marker Wadden, worden dusdanig gepositioneerd en vormgegeven dat directe golfaanval op het achtergelegen gebied wordt voorkomen.
RA2-A-07	Bescherming tegen golven (luwtezijde)	De zachte randen langs het moeras, aan de luwtezijde (NO), worden dusdanig gedimensioneerd dat voldaan wordt aan MW-16, HT1.2-06, en HT2-05.
RA2-A-08	Stabiliteit van zachte (onderwater)dammen (met/zonder palenrijen)	De stabiliteit van de zachte (onderwater)dammen langs de buitenranden van het moeras (met/zonder houten palenrijen erop) moeten voldoende bestand zijn tegen hydraulische belasting, zodat zowel de dammen als de eventuele palenrijen er bovenop hun (golffremmende) functie niet zullen verliezen.
RA2-A-10	Vaststellen minimale omvang zachte randen	Er dient een minimaal benodigd profiel te worden gedefinieerd om in de B&O-fase eenvoudig te kunnen toetsen of de zachte randen nog voldoen aan de eisen MW-16 en RA-05.
RA2-A-11	Periodieke controle omvang zachte randen	Er dient een periodieke controle te worden uitgevoerd om te toetsen of de aanwezige zachte randen (nog) voldoen aan eisen MW-16 en RA-05.
RA2-A-12	Secundaire bouwstoffen	De zachte randen dienen vrij te zijn van secundaire bouwstoffen.
RA2-E-01	Oriëntatie en omvang van strandranden	De uiteindelijke oriëntatie en omvang van de strandranden (ZW- en NW-randen) dient in grote mate overeenkomstig te zijn met het ontwerp en de bijbehorende principeprofielen in het EMVI-document.
RA2-E-02	Zandbuffer zachte randen	Ter compensatie van structurele zandverliezen bij de 'zachte' uiteinden van de zanddammen worden zandbuffers aangelegd. Aan de zuidkant van het zuidweststrand heeft de buffer een volume

van 220.000 m<sup>3</sup> (modules A, B, C en D);  
aan de noordzijde van het noordweststrand  
is dit 100.000 m<sup>3</sup>.

RA2-E-03	Wash-overs in zachte ZW-rand	Om extra morfodynamiek en interactie tussen Markermeer en Marker Wadden mogelijk te maken worden twee wash-overs gecreëerd in de zuidwestelijke zanddam (voor modules A+B+C).
RA2-E-04	Taludhelling strandranden	De uiteindelijke taludhellingen van de strandranden (ZW- en NW-randen) dienen in grote mate overeenkomstig te zijn met het ontwerp en de bijbehorende principeprofielen in het EMVI-document.
RA2-E-05	Taludhelling zachte randen (luwtezijde)	De randen in de luwte van de eilandengroep (NO-zijde) worden dusdanig ontworpen dat deze qua taludhellingen overeenkomen met de principeprofielen in het EMVI-document.
RA2-E-07	Palenrijen dwars op het strand	Om het negatieve effect van bruto langtransport (zandverlies) langs de strandranden te beperken worden dwars op het strand/vooroever - waar nodig/nuttig - palenrijen geplaatst.

### 3 ONTWERPBESCHRIJVING

In dit hoofdstuk is, als startpunt voor verdere uitwerkingen en analyses, een beschrijving gegeven van het ontwerp van de Marker Wadden. Hierbij is specifiek aandacht besteed aan de zandige delen van het ontwerp. Het hoofdstuk focust op het **beschrijven van het ontwerp**; nadere onderbouwingen en toelichting op de gemaakte ontwerpkeuzes en inhoudelijke afwegingen komen aan bod in hoofdstuk 5.

De volgende onderwerpen komen hieronder aan bod:

- Algemene ontwerpbeschrijving Marker Wadden;
- Beschrijving zachte randen 'Modules A, B, C';
- Beschrijving zachte randen 'Module D';
- Raakvlakken met overige objecten.

#### 3.1 Algemene beschrijving

Een overzichtstekening van het ontwerp van de Marker Wadden is weergegeven in Figuur 3. Het figuur toont een moerasgebied bestaande uit meerdere moeraszones (plas-dras en ondiep water) op enkele eilanden, die allen beschermd worden door luwtedammen en/of compartimenteringsdammen. Aan de westzijde is een harde rand aanwezig die aan weerszijden aansluit op (afwijkend georiënteerde) zachte randen. Achter deze buitenranden ligt het beschutte moerasgebied. De achterzijde (oostzijde) van de Marker Wadden wordt beschermd door zanddammen waarvan de kruin afhankelijk van de locatie boven water of onder water ligt.

Om de Marker Wadden toegankelijk te maken voor bezoekers en beheerders is ter plaatse van de zuidwestelijke rand een haveningang aanwezig, zodat boten kunnen afmeren aan de stijgers bij de recreatiezone (zandplateau en recreatiestrand) achter de zachte rand.

Het ontwerp van modules A, B en C van de Marker Wadden is reeds uitgebreid beschreven in eerder opgeleverde ontwerpnota's; zoals bijvoorbeeld de nota over de zandige objecten: *MW-UO-WP-OW04*.

In voorliggende rapportage wordt specifiek gekeken naar een verdere uitbreiding van de Marker Wadden: **module D**. Deze module bestaat uit een drietal nieuwe moeras-eilanden in de luwe zone aan de achterzijde van modules A, B en C. Net als bij het ontwerp van het eiland binnen module C, bestaan de verschillende eilanden van module D ook uit compartimenten die zijn opgebouwd met zandige buitenranden en vervolgens binnenin zijn opgevuld met holoceen materiaal (klei / slib).

Momenteel wordt ook nagedacht over een (nog) verdere uitbreiding: module E. Module E wordt in voorliggende rapportage niet nader beschouwd, omdat er nog geen duidelijkheid is over de haalbaarheid van dit plan (o.a. qua financiering).





Figuur 3 Overzichtstekening van het ontwerp van de Marker Wadden; inclusief aanduiding van de relevante zandige onderdelen van modules A, B en C van de Marker Wadden (objecten RA2, IE1 en IE3).

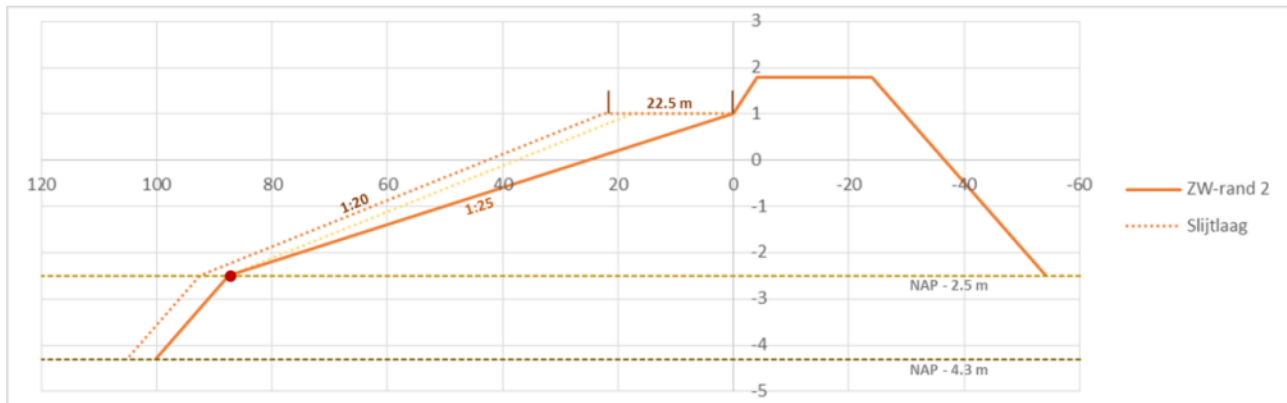
### 3.2 Zachte randen: Modules A, B en C

In de voorgaande ontwerpnota met documentkenmerk *MW-UO-WP-OW04* is reeds uitgebreid aandacht besteed aan het ontwerp en de verificatie/validatie van het ontwerp van de verschillende zandige objecten van de eerste drie modules (A, B en C) van de Marker Wadden. Hieronder volgt een kort overzicht van de belangrijkste ontwerp onderdelen binnen deze modules.

De Marker Wadden wordt aan de westkant beschermd door een harde rand die aan weerszijden aansluit op (afwijkend georiënteerde) zachte randen; een zuidwestelijk georiënteerde strandrand (ZW-rand) en een noordwestelijk georiënteerde strandrand (NW-rand). De zuidwestelijke rand wordt daarbij wel onderbroken door een tweetal havendammen die de ingang vormen tot een achterliggende haven. De strandranden (ZW en NW) hebben als belangrijkste doel om alle golven uit de dominante zuidwestelijke richting op te vangen zodat er geen erosie kan optreden in het achterliggende moerasgebied. Ook zorgt de zachte rand ervoor dat het holoceen ophoogmateriaal binnen de gecompartmenteerde moerasgebieden aanwezig blijft.

In Figuur 4 is een voorbeeld gegeven van het theoretisch ontwerp profiel van de zuidwestelijke strandrand, ten zuidoosten van de havendammen. Het dwarsprofiel ten noordwesten van de havendammen is onderwater hetzelfde, maar heeft nog een iets robuuster vormgegeven duinregel (hoger en breder) boven NAP +1 m.

Het profiel van de NW-rand is eveneens vergelijkbaar, maar vanwege de afwijkende oriëntatie is op deze locatie een iets steiler profiel aangelegd met een smallere achterliggende duinregel. De NW-rand wordt normaal gesproken door minder zware stormen belast, waardoor de dimensionering kon worden geoptimaliseerd.



Figuur 4 Theoretisch ontwerpprofiel voor de ZW-rand (ten zuidoosten van de haven), plus slijtlaag.

De belangrijkste kenmerken van het ontwerpprofiel langs de ZW-rand (ten zuidoosten van de haven):

- Taludhelling strand en ondiepe vooroever: 1 op 25;
- Taludhelling diepe vooroever (onder NAP -2,5 m): 1 op 7;
- Taludhelling duinfront: 1 op 5;
- Taludhelling achterzijde zanddam: 1 op 7;
- Kruinniveau zanddam: vanaf NAP +1,8 m;
- Kruinbreedte: tussen 20 en 30 m;
- Strandbreedte (excl. buffer): ca. 30 m;
- Korrel diameter strand (NAP -2 m tot NAP +1 m): ca. 350  $\mu$  ( $\pm$  110  $\mu$ );
- Slijtlaag (onderhoudsbuffer): ca. 90.000 m<sup>3</sup>;
- Zandbuffer kop (onderhoudsbuffer): ca. 110.000 m<sup>3</sup>.

De oostkant van de Marker Wadden ligt in relatieve zin in de luwte. De golfaanval met de meeste impact op de zandige oevers komt gemiddeld genomen voornamelijk uit (zuid)westelijke richtingen; dit geldt zowel voor de zwaarste stormcondities als voor de meer frequent voorkomende (laag-energetische) golven. De oostkant van het gebied is daarom beschermd door een iets minder robuust vormgegeven zandige buitenrand.

De belangrijkste verschillen tussen de oostelijke randen van modules A, B en C (zie Figuur 7) en de zuid- en noordwestelijk georiënteerde strandranden:

- De beoogde eindhoogte van de zanddammen ligt aan de luwtezijde lager om zoveel mogelijk een open verbinding met het Markermeer te creëren;
- De gemiddelde helling van het onderwatertalud is aan de luwtezijde steiler, vanwege de relatief beschutte ligging. Dit is een ontwerpoptimalisatie die na aanleg dient te worden gemonitord met het oog op de morfologische stabiliteit.

Bij het ontwerp van de zandige delen van modules A, B en C (zoals beschreven in ontwerpnota *MW-UO-WP-OW04*) is de oostelijke zandrand van het eiland van module C beschouwd als zijnde de (oostelijke) buitenrand van de Marker Wadden. Na realisatie van de geplande vervolgfase (de aanleg van een drietal extra eilanden in module D) verandert de functie van de oorspronkelijk beschouwde buitenrand van module C.

De zandige delen van de Marker Wadden die in de voorgaande ontwerpfase (A+B+C) zijn beschouwd, zijn aangeduid met de rode markeringen in Figuur 5.



Figuur 5 Overzichtstekening van het ontwerp van de Marker Wadden; inclusief aanduiding van de relevante zandige onderdelen van modules A, B en C van de Marker Wadden (objecten RA2, IE1 en IE3).

### 3.3 Zachte randen: Module D

Module D van de Marker Wadden bestaat uit een drietal (extra) moeras-eilanden aan de luwtezijde (lees: oostzijde) van de eerder beschouwde modules A, B en C. De drie eilanden liggen ongeveer in elkaars verlengde, en de omvang van de eilanden neemt toe van noord naar zuid. Gemakshalve zijn de eilanden opvolgend genummerd: D1, D2 en D3; zie Figuur 6.

Net als in het ontwerp van de voorgaande modules bestaan de eilanden uit diverse compartimenten met verschillende abiotische eigenschappen voor habitatontwikkeling. Op hoofdlijnen kan onderscheid gemaakt worden tussen 'plas-dras' (gemiddeld bodemniveau rond de waterlijn) en 'beschut ondiep' (bodemniveau tussen NAP -2 m en het winterpeil). Voor eiland D1 geldt dat de verhouding tussen beide zones (qua oppervlakte) vergelijkbaar is met die van eiland C. Voor eiland D2 geldt dat er verhoudingsgewijs veel plas-dras aanwezig is (en bijna geen beschut ondiep water). Voor de compartimentering rondom eiland D3 geldt daarentegen juist dat er verhoudingsgewijs veel ruimte is gereserveerd voor beschut ondiep water. Het uitgangspunt hierbij is dat eiland D2 ook in directe verbinding komt te staan met dit gebied.

Door de positionering van de D-eilanden ontstaat er een nieuwe buitenrand aan de oostkant van de Marker Wadden; dit is duidelijk te zien in Figuur 6. De oostelijke zandranden van deze eilanden nemen de functie 'buitenrand' over van de oostelijke rand van module C. De oorspronkelijke buitenrand langs het C-eiland krijgt bovendien een nieuwe functie: deze fungeert in dit vernieuwde ontwerp als de secundaire luwtedam (westkant) van de D-eilanden.





Figuur 6 Overzichtstekening van het ontwerp van de Marker Wadden; inclusief aanduiding van de relevante zandige onderdelen van module D van de Marker Wadden (object RA2 – zachte rand).

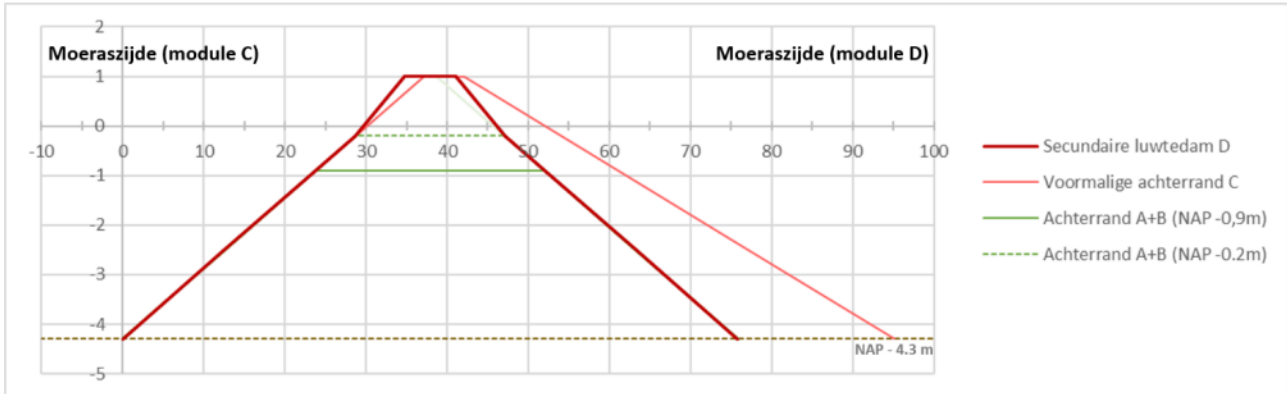
### Ontwerpprofielen module D

Het ontwerp van de zandige randen van module D is in grote lijnen gebaseerd op de ontwerpfilosofie voor de zandige randen van de eerdere modules. De zanddammen hebben als functie om het holoceen materiaal in het moerasgebied op de plaats te houden (compartimentering) en om de golfhoogten in de ondiepe waterzones te beperken (luwte).

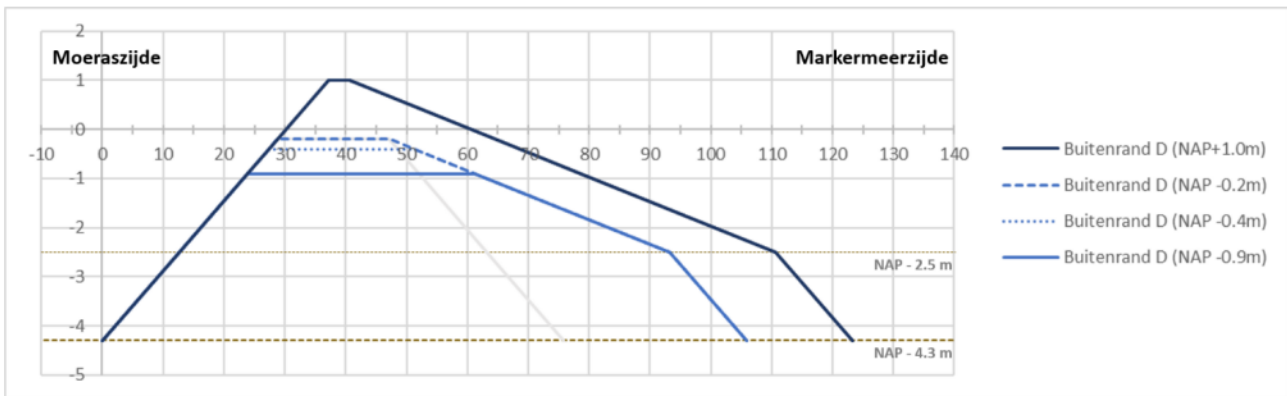
De vormgeving en dimensionering van de secundaire luwtedammen (westkant) van de eilanden is in de basis gelijk aan die van module C. De randen aan de westkant van de eilanden liggen in de luwte achter de primaire luwtedammen (strandranden) en het moerasgebied van modules A en B, en worden daarom gezien als *secundaire* luwtedammen voor de moeras-eilanden.

Voor het ontwerp van de zandige buitenranden aan de oostkant is een slankere vormgeving gehanteerd dan voor de primaire luwtedammen aan de westkant. Er is hier een eindbeeld beoogd dat sterke overeenkomsten heeft met de achterzijde van modules A en B. Het kruinniveau ligt hierbij afwisselend hoger (rond de waterlijn) en lager (onder water), en bovenop de kruin zijn lokaal palenrijen voorzien.

Een belangrijk verschil tussen de buitenrand bij module D en de oostelijke randen van de overige modules is echter de helling van het onderwatertalud. Langs de buitenrand van de D-eilanden is een flauw onderwatertalud voorzien. Dit is om de morfologische stabiliteit op de langere termijn zoveel mogelijk te waarborgen. In sectie 5.1 wordt nader ingegaan op de ontwerpafwegingen voor dit aspect van het ontwerp.



Figuur 7 Theoretische ontwerpprofielen voor de zachte randen aan de oostkant van modules A, B en C, en de secundaire luwtedam (westkant) van module D. *Benadrukt wordt dat de (voormalige) achterrand van modules C in het vernieuwde ontwerp wordt vervangen door de secundaire luwtedam langs de westkant van module D.*



Figuur 8 Theoretische ontwerpprofielen voor de nieuwe zachte randen aan de luwtezijde (oostzijde) van module D. De exacte locatie van de verschillende onderdelen van de randen is aangeduid in de overzichtstekening (**1523-MAR DO D – Overzichtstekening; 8 maart 2017**).

Figuur 7 toont de theoretische ontwerpprofielen voor de oostelijke randen van modules A, B en C die reeds zijn beschouwd in de ontwerpnota met kenmerk *MW-UO-WP-OW04*. Hetzelfde figuur toont ook het ontwerp van de westelijke luwterand van module D. De westelijke dam van module D vervangt de (voormalige) oostelijke buitenrand van module C, omdat beide modules direct naast elkaar gepositioneerd zijn. Deze dam is derhalve ook steiler opgezet, omdat direct tegen de dam een plas-dras gebied van holoceen materiaal wordt gerealiseerd.

In Figuur 8 zijn de belangrijkste ontwerpprofielen voor de oostelijke buitenrand van module D gepresenteerd. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen een viertal type zandranden, met verschillende kruinniveaus. Langs de achterzijde van moeraseiland D1 en D3 is een zandrand ontworpen met een afwisselend kruinniveau op NAP -0,2 m en NAP -0,9 m. De achterzijde van moeraseiland D2 wijkt (vanwege het gemiddeld hogere niveau van het achterliggende moeras) afwisselend op NAP +0,5 m en NAP -0,4 m. De zuidoostelijk georiënteerde rand aan de zuidkant van eiland D3 krijgt een robuustere vormgeving, met een kruinniveau rond NAP +1 m.

De belangrijkste kenmerken van de ontwerpprofielen (= beoogde eindbeeld exclusief zettingscompensatie) van de randen aan de oostzijde van module D:

#### Zandrand boven water

- Taludhelling buitenzijde (boven NAP -2,5 m): ca. 1 op 20;
- Taludhelling binnenzijde: ca. 1 op 7;
- Kruinniveau: NAP +1,0 m;
- Kruinbreedte: min. 5 m (**voorstel ontwerpaanpassing: ca. 15 m**).

#### Zandrand onder water

- Taludhelling buitenzijde (boven NAP -2,5 m): ca. 1 op 20;
- Taludhelling binnenzijde: ca. 1 op 7;
- Kruinniveau:
  - Buitenrand D1 en D3: NAP -0,2 m en NAP -0,9 m (afwisselend);
  - Buitenrand D2: NAP +0,5 m en NAP -0,4 m (afwisselend);<sup>2</sup>
- Kruinbreedte:
  - Bij kruin op NAP -0,2 m: ca. 20 m;
  - Bij kruin op NAP -0,9 m: ca. 38 m;
- *Inclusief houten palenrijen*

Ten aanzien van de ontwerpprofielen worden de volgende (overige) punten uitgelicht:

- Helling van het buitentalud van de oostelijke rand is flauwer dan bij modules A, B en C (zie sectie 5.1.1).
- Het zandige talud onder NAP -2,5 m is steiler opgezet (ca. 1 op 7) vanwege de beperkte morfologische activiteit die onder dit niveau zal optreden. In de voorgaande ontwerpnota is dit nader toegelicht.
- Het kruinniveau nabij de zuidelijke punt van module D (eiland D3) ligt rond NAP +1 m. Het – in verhouding tot de rest van de oostelijke buitenrand – relatief hoge kruinniveau zorgt voor een robuuster ontwerp van de zandrand op het meest kwetsbare deel van de buitenrand (zie sectie 5.1.4).
- Ter plaatse van eiland D2 zijn de beoogde lokale verlagingen in de buitenrand minder diep dan op de overige locaties. Dit is ter voorkoming van het wegspoelen van holoceen materiaal, aangezien het moerasgebied direct achter de buitenrand van eiland D2 een (gemiddeld hoger gelegen) 'plas-dras' gebied betreft, in plaats van een 'beschut ondiep water' gebied (zie sectie 5.4.1).

#### Zandbuffers langs oostelijke buitenrand van module D

De oostelijke buitenrand van module D wordt gekarakteriseerd door een aantal vrij abrupte overgangen in oriëntatie van de dam. Bij de noordoostelijke punten van elk van de drie moerasedeilanden (D1, D2, D3) zijn door de geschakelde ligging van de eilanden, bijna haakse knikken voorzien in de zandige buitenrand. Vanuit morfologisch oogpunt zijn dergelijke knikpunten in een zandig systeem zeer erosiegevoelig door de te verwachten transportgradiënten. Dit kan leiden tot een lokale doorbraak in deze buitenrand.

In het voorliggende ontwerp van module D zijn de drie belangrijkste knikpunten in de oostelijke buitenrand versterkt middels zandbuffers. Deze zandbuffers, en de naastgelegen delen van de zandrand krijgen een hogere ligging dan de overige delen van de buitenrand. De naastgelegen damsecties komen boven water te liggen (rond NAP +0,5 m) en de buffers zelf krijgen een kruinniveau boven NAP +1 m. Door het relatief grote zandvolume in de buffers wordt de kans op een doorbraak van de buitenrand op deze meest kwetsbare punten gereduceerd. Het ontwerp van één van deze zandbuffers is getoond in het rechter paneel van Figuur 9.

<sup>2</sup> Voor de oostrand van eiland D2 wordt een afwijkend ontwerp gehanteerd ter bescherming van het plas-dras gebied; zie sectie 5.4.1. Het kruinniveau NAP+0,5 m wijkt bovendien af van de in deze rapportage beschouwde DO-tekeningen.



De zandbuffers dienen dan ook te worden beschouwd als noodzakelijke *onderhoudsbuffers* om het beoogde ontwerp in stand te houden. Net als voor de primaire strandranden (ZW- en NW-rand) zal voor deze zandbuffers aan de oostzijde rekening gehouden moeten worden met een zekere onderhoudsinspanning in de periode na realisatie van de Marker Wadden. De omvang van de onderhoudsbehoefte is op voorhand lastig in te schatten, en daarom wordt aanbevolen om een actief monitoringsprogramma op te stellen op basis waarvan een adequate inschatting van de onderhoudsbehoefte kan worden gemaakt.

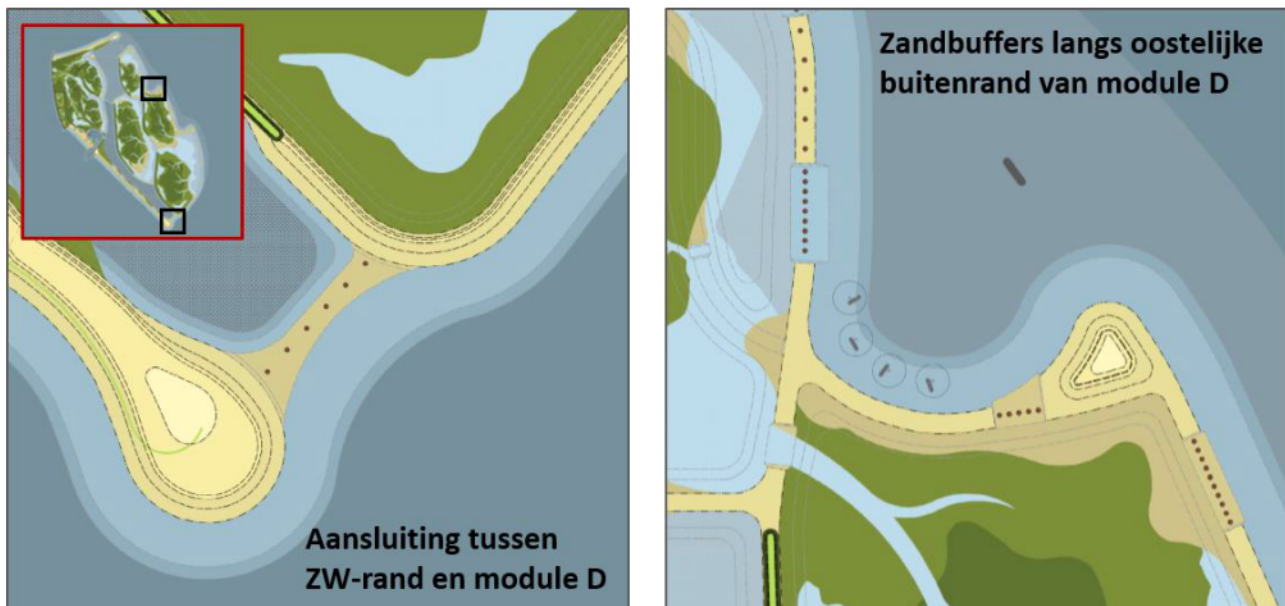
### Verlenging van de ZW-strandrand bij module D

Tot slot wordt nog één ander ontwerponderdeel van module D uitgelicht. Ten opzichte van het ontwerp van modules A, B en C is er nog een belangrijke ontwerpaanpassing gedaan om de inpassing van module D mogelijk te maken: de zuidwestelijk georiënteerde strandrand (ZW-rand) is met ca. 600 m verlengd. De onderhoudsbuffer die is voorzien aan het uiteinde van de ZW-strandrand wordt hiermee ook opgeschoven; de rand wordt feitelijk verder 'uitgeschoven'.

De verlenging van deze primaire luwtedam zorgt ervoor dat eiland D3 voldoende in de luwte ligt. Met name de zware (zuid)westelijke stormen worden door deze verlengde ZW-rand dusdanig opgevangen dat deze de zuidpunt van eiland D3 niet bereiken, waardoor de stabiliteit van het achterliggende moerasgebied naar verwachting op orde zal blijven.

Om de morfologische stabiliteit van de zuidpunt van module D te optimaliseren is ervoor gekozen om de ZW-rand en de oostrand van module D op elkaar te laten aansluiten. Concreet betekent dit dat het *onderwatertalud* van de buitenrand van eiland D3 samensmelt met de onderhoudsbuffer op het uiteinde van de strandrand.

Het ontwerp van de meest zuidelijke punt van module D van de Marker Wadden is getoond in het linker paneel van Figuur 9. Dit betreft het ontwerpdetail van de aansluiting tussen de ZW-strandrand en moeraseiland D3.



Figuur 9 Ontwerpdetails van de zandige buitenrand van module D. Links: de aansluiting tussen de ZW-strandrand en het moeraseiland D3 bij de zuidpunt van module D (eiland D3). Rechts: één van de drie (lokale) zandbuffers langs de oostelijke buitenrand ter plaatse van de knikpunten in de luwterand.

### 3.4 Raakvlakken met andere objecten

Voor het ontwerp van **module D** zijn in relatie tot het – in deze rapportage beschouwde – object (*RA2, zachte rand*) de volgende raakvlakken voorzien met overige objecten binnen het systeem 'Marker Wadden':

- **Effect van zettingen en consolidatie (hoogtebestendigheid – geotechniek)**  
*Objecten: RA2 (zachte rand), IE1 (zandplateau), geotechniek*
- **Geotechnische stabiliteit van zachte randen**  
*Objecten: RA2 (zachte rand), geotechniek*
- **Luwtefunctie zachte randen aan (relatief luwe) achterzijde van eilanden**  
*Objecten: RA2 (zachte rand), HT1 (moeras)*
- **Opsluitfunctie zachte randen voor holoceen materiaal (compartimentering)**  
*Objecten: RA2 (zachte rand), HT1 (moeras)*
- **Invaarbaarheid van de (ondiepe) watergebieden tussen de moeras-eilanden**  
*Objecten: RA2 (zachte rand), HT1 (moeras)*

In het aparte Raakvlakkendossier is uitgebreider aandacht besteed aan de risicovolle raakvlakken en de beheersmaatregelen die zijn aangemerkt om te borgen dat deze raakvlakken zowel in de ontwerpfase als in de uitvoeringsfase niet 'tussen wal en schip' belanden.



## 4 ONTWERPUITGANGSPUNTEN

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van alle relevante uitgangspunten die zijn gebruikt voor de berekeningen en analyses die ten grondslag liggen aan het ontwerp en voor de verificatie/validatie van dit ontwerp. In de hierop volgende secties komen de volgende punten in meer detail aan bod:

- Te verifiëren ontwerptekeningen
- Hydraulische condities
- Sediment karakteristieken
- Geotechnische randvoorwaarden

### 4.1 Te verifiëren ontwerptekeningen

De ontwerpberoeeningen en de verificaties van het ontwerp in voorliggende rapportage zijn gebaseerd op het technisch ontwerp dat ten grondslag ligt aan het DO Ruimtelijke Inrichting, met de volgende documentkenmerken:

- Overzichtstekening: **1523-MAR DO D – Overzichtstekening** (versie: 8 maart 2017)
- Dwarsdoorsneden: **1523-MAR DO D – Profielen D** (versie: 8 maart 2017)

In Figuur 1 is als voorbeeld de overzichtstekening gepresenteerd van de Marker Wadden (modules A t/m D), behorende bij de bovengenoemde versies van het DO Ruimtelijke Inrichting.

Na elke eventuele ontwerpwijziging die volgt op de bovengenoemde versies van het DO zal een controleslag moeten worden uitgevoerd om vast te stellen of de uitgevoerde verificaties nog steeds van toepassing zijn, of dat er nadere analyses nodig zijn vanwege de wijzigingen in het ontwerp.

### 4.2 Hydraulische condities

Ten behoeve van de ontwerpberoeeningen en analyses waarmee aangetoond dient te worden dat het voorliggende ontwerp van de Marker Wadden voldoet aan de gestelde eisen is inzicht nodig in de hydraulische condities die kunnen optreden op de projectlocatie. Hierover wordt een overzicht gegeven van de beschikbare gegevens en de gehanteerde uitgangspunten met betrekking tot de volgende punten:

- Wind
- Waterstanden
- Golven
- Stroming

De in de hierop volgende secties beschreven uitgangspunten voor de hydraulische randvoorwaarden zijn identiek aan de uitgangspunten die zijn gehanteerd in de ontwerpnota voor modules A, B en C (documentkenmerk: *MW-UO-WP-OW04*).

#### 4.2.1 Wind

Ondanks het feit dat wind geen *hydraulische* conditie is, is het in het Markermeer wel de belangrijkste aandrijver voor alle hydraulische processen: waterstand, golven, stroming. In het kader van de uitgevoerde analyses is primair gebruik gemaakt van de windcondities die zijn voorgeschreven in Bijlage 1 van de Vraagspecificatie Eisen.

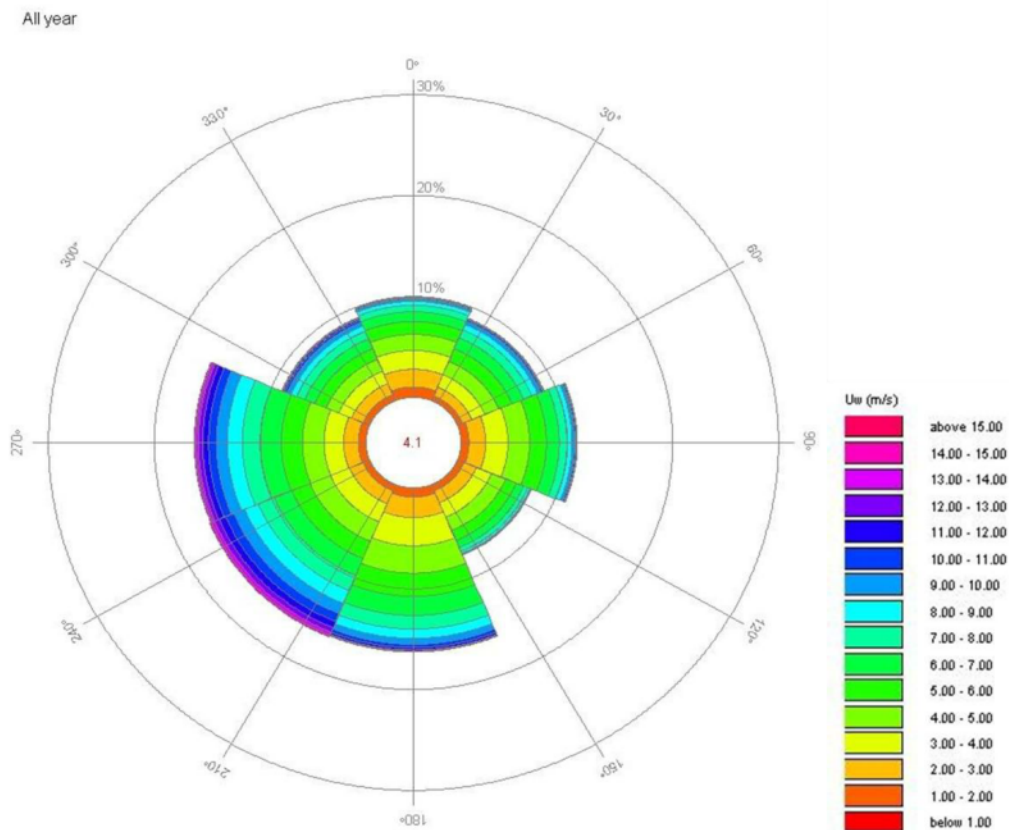
In Tabel 4 zijn de randvoorwaarden gepresenteerd uit de Vraagspecificatie. Het betreft een overzicht met strijklengten en windsnelheden voor verschillende windrichtingen en voor verschillende herhalingsstijden. Figuur 10 toont aanvullend een representatief windklimaat voor het Markermeer.

Tabel 4 Randvoorwaarden conform Tabel 1 in Bijlage 1 van Vraagspecificatie Eisen (VSE): strijklengte en windsnelheid.

Windrichting	Strijklengte		Windsnelheid		
	[m]		[m/s]		
	Loefzijde	Lijzijde	1/10 per jaar *	1/50 per jaar **	1/100 per jaar *
NNO(30)	2200	16200	16,0	18,0	18,9
ONO(60)	1700	22500	16,7	18,8	19,7
O(90)	1900	21300	16,2	18,2	19,1
OZO(120)	2400	16000	15,3	17,2	18,0
ZZO (150)	3500	9700	16,4	18,4	19,3
Z(180)	7600	4900	19,2	21,4	22,3
ZZW (210)	16200	2200	22,4	25,1	26,3
WZW(240)	22500	1700	23,8	27,0	28,4
W (270)	21300	1900	24,1	27,5	29,0
WNW(300)	16000	2400	22,5	26,1	27,6
NNW(330)	9700	3500	19,9	22,8	24,0
N(360)	4900	7600	17,1	19,7	20,8

\*) Waarden uit [1].

\*\*) Geïnterpoleerde waarden op basis van 1/10 jaar<sup>-1</sup> en 1/100 jaar<sup>-1</sup> gegevens.



Figuur 10 Visualisatie van een representatief windklimaat voor het Markermeer. Bron: MER-rapport (RHDHV, 2013).

### 4.2.2 Waterstanden

Voor de ontwerpberekeningen en de analyses is het *huidige* peilbeheer voor het Markermeer gebruikt als uitgangspunt voor de gemiddelde waterstanden:

- Het zomerpeil: **NAP -0,2 m**
- Het winterpeil: **NAP -0,4 m**

Er wordt geen rekening gehouden met eventuele toekomstige wijzigingen in het peilbeheer en de daaraan gerelateerde wijzigingen in de waterstand.

### 4.2.3 Golven

Net als de windcondities zijn ook de golfcondities voorgeschreven in Bijlage 1 van de Vraagspecificatie Eisen. Het gaat hierbij specifiek om de golven tijdens stormen; voor verschillende terugkeerperioden en voor verschillende wind-/golfrichtingen. De betreffende gegevens zijn weergegeven in Tabel 5.

De golfgegevens zijn (door de opdrachtgever) vastgesteld op basis van de Brettschneider-methodiek. Hierbij wordt de golfhoogte ingeschat op basis van waterdiepte, strijklengte en windsnelheid. De golfrichting is per definitie gelijk aan de windrichting.

Tabel 5 Randvoorwaarden conform Tabel 1 in Bijlage 1 van Vraagspecificatie Eisen (VSE): hydraulische randvoorwaarden.

Windrichting	1/1 jaar <sup>-1</sup>			1/10 jaar <sup>-1</sup>			1/20 jaar <sup>-1</sup>			1/50 jaar <sup>-1</sup>			1/100 jaar <sup>-1</sup>		
	d*	H <sub>i</sub>	T <sub>p</sub> **	d*	H <sub>i</sub>	T <sub>p</sub> **	d*	H <sub>i</sub>	T <sub>p</sub> **	d*	H <sub>i</sub>	T <sub>p</sub> **	d*	H <sub>i</sub>	T <sub>p</sub> **
	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]	[s]
NNO(30)	-0,6	0,4	2,3	-0,8	0,5	2,6	-0,8	0,6	2,6	-0,9	0,6	2,7	-0,9	0,6	2,8
ONO(60)	-0,8	0,4	2,3	-1,0	0,5	2,5	-1,0	0,5	2,5	-1,1	0,6	2,6	-1,2	0,6	2,7
O(90)	-0,7	0,4	2,3	-0,9	0,5	2,5	-1,0	0,5	2,6	-1,0	0,6	2,6	-1,0	0,6	2,7
OZO(120)	-0,6	0,4	2,3	-0,7	0,5	2,6	-0,8	0,5	2,6	-0,8	0,6	2,7	-0,9	0,6	2,8
ZZO (150)	-0,5	0,5	2,6	-0,6	0,6	2,9	-0,6	0,7	2,9	-0,7	0,7	3,0	-0,7	0,8	3,1
Z(180)	-0,4	0,8	3,3	-0,4	0,9	3,6	-0,4	0,9	3,6	-0,4	1,0	3,7	-0,4	1,1	3,8
ZZW (210)	0,0	1,0	3,9	0,1	1,2	4,4	0,2	1,2	4,4	0,3	1,3	4,5	0,3	1,4	4,7
WZW(240)	0,2	1,1	4,2	0,5	1,3	4,7	0,7	1,4	4,8	0,8	1,5	4,9	0,9	1,7	5,2
W (270)	0,2	1,1	4,2	0,5	1,3	4,7	0,6	1,4	4,8	0,8	1,5	4,9	0,9	1,7	5,2
WNW(300)	-0,1	1,0	3,8	0,1	1,2	4,4	0,2	1,2	4,4	0,3	1,3	4,6	0,4	1,5	4,8
NNW(330)	-0,3	0,8	3,4	-0,3	1,0	3,8	-0,2	1,0	3,8	-0,2	1,1	4,0	-0,2	1,2	4,1
N(360)	-0,5	0,6	2,8	-0,5	0,7	3,1	-0,5	0,8	3,2	-0,6	0,8	3,3	-0,6	0,9	3,4
Omni	0,3	1,2	4,3	0,6	1,4	4,8	0,7	1,4	4,8	0,8	1,5	5,0	1,00	1,7	5,2

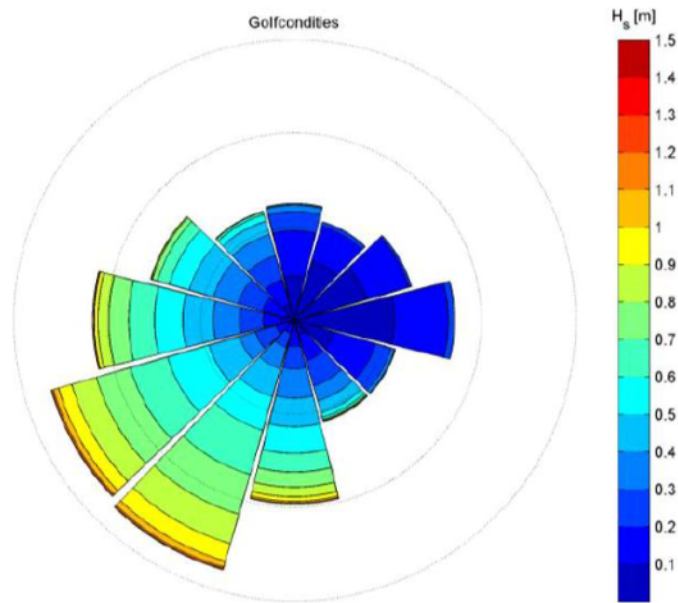
<sup>\*)</sup> Waterstand inclusief windopzet, stille water diepte is 4,6 m (uitgaande van 5m diepte -0,4 m winterpeil).

<sup>\*\*)</sup> Relatie tussen piek en gemiddelde golfperiode:  $T_m = T_p * 0,8$

De golfcondities tijdens stormen zijn niet bruikbaar om inschattingen te maken van de morfologische ontwikkeling van de zachte randen tijdens gemiddelde jaarrond condities. Daarom is in *Arcadis (2015)* op basis van een representatief windklimaat – conform dezelfde Brettschneider methodiek die is gehanteerd voor de gegevens in de VSA – ook een *golfklimaat* afgeleid. Voor een range aan golfklassen en golfrichtingssectoren (12 x 30°) is de voorkomenskans van de betreffende golfcondities berekend. Het resultaat is gevisualiseerd in Figuur 11 en de bijbehorende gegevens zijn opgenomen in Tabel 6.

Aanvullend op de gegevens in Tabel 6 is ook een alternatief golfklimaat beschouwd in het kader van de ontwerpberekeningen en analyses voor de Marker Wadden. In *Arcadis (2015)* is ook een golfklimaat gepresenteerd die is gebaseerd op een wat geavanceerdere methodiek waarbij een gekoppeld Delft3D-SWAN model van het Markermeer is gebruikt om een inschatting te maken van lokale golfcondities; onder andere rekening houdend met scheefstand van het waterpeil in het meer en met golfprocessen zoals refractie. Het hieruit resulterende golfklimaat is gepresenteerd in Tabel 7.

De verschillen tussen beide golfklimaten zijn reeds nader beschouwd in de ontwerphoofnotitie voor modules A, B en C, met document-kenmerk: *MW-UO-WP-OW04*.



Figuur 11 Golfroos o.b.v. Brettschneider methodiek. Bron: Arcadis, 2015.

Tabel 6 Golfklimaat o.b.v. Brettschneider methodiek (voorkomenskans in dagen). Bron: Arcadis, 2015.

Golfklimaat Marker Wadden (Brettschneider)														
Golfhoogte	Golfinvalshoek [°N]												Totaal	
	Hs [m]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300		330
< 0.2	0.2	12.8	12.8	12.8	18.4	11.0	11.0	9.1	6.3	6.3	6.3	7.1	8.1	122.0
0.2	0.4	9.4	9.4	9.4	9.4	7.5	5.7	4.7	4.7	4.7	10.4	9.4	9.4	94.1
0.4	0.6	0.9			1.9	1.9	3.6	11.3	12.3	14.1	11.3	8.5	4.7	70.5
0.6	0.8						0.9	6.6	17.0	15.1	8.2	2.8		50.6
0.8	1							2.8	9.4	7.5	2.8			22.5
1	1.2							0.5	1.9	1.9	0.2			4.5
1.2	1.4								0.3	0.3				0.6
1.4	>								0.1	0.1				0.2
	<b>Totaal</b>	23.1	22.2	22.2	29.7	20.4	21.2	35.0	52.0	50.0	39.2	27.8	22.2	<b>365 dagen</b>

Tabel 7 Golfklimaat o.b.v. Delft3D-SWAN model (voorkomenskans in dagen). Bron: Arcadis, 2015.

Golfklimaat Marker Wadden (Delft3D)														
Golfhoogte	Golfinvalshoek [°N]												Totaal	
	Hs [m]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300		330
< 0.2	0.2	11.1	6.4	7.9	7.3	9.1	7.6	7.1	7.0	11.7	9.6	9.7	7.2	101.6
0.2	0.4	10.3	8.9	10.8	8.3	9.8	8.3	9.4	10.2	18.9	13.5	9.0	4.9	122.3
0.4	0.6	3.6	3.6	5.2	4.3	5.3	7.8	9.8	12.9	21.2	4.0	2.3	1.0	80.9
0.6	0.8	0.6	0.6	1.1	1.1	1.8	3.4	6.5	9.6	13.3	1.2	0.3	0.0	39.4
0.8	1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.9	3.4	6.0	6.2	0.3	0.0	0.0	17.1
1	1.2				0.0	0.0	0.1	0.6	1.1	1.2	0.1			3.1
1.2	1.4						0.0	0.1	0.2	0.2	0.0			0.5
1.4	>													
	<b>Totaal</b>	25.5	19.5	25.0	21.2	26.3	28.0	36.7	47.0	72.7	28.5	21.3	13.2	<b>365 dagen</b>



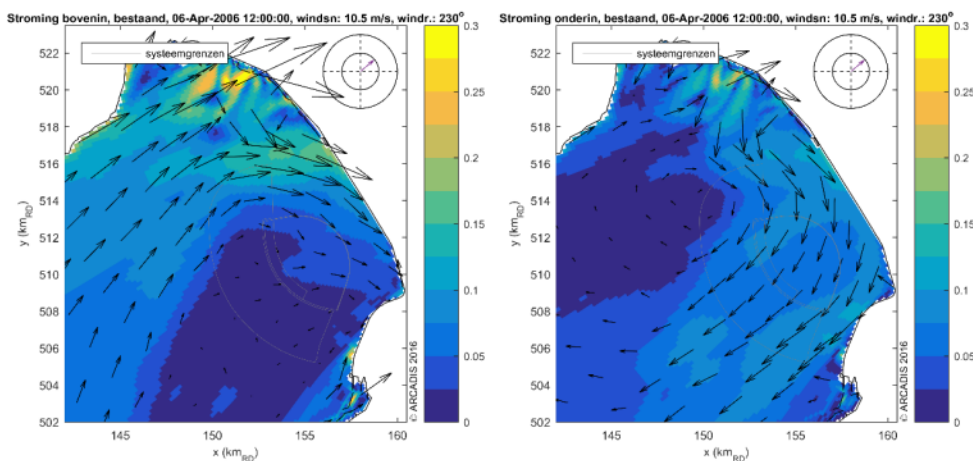
#### 4.2.4 Strooming

Naast de golven kan ook de wind-gedreven (circulatie)stroming in het Markermeer invloed hebben op de morfologische processen in en rondom de Marker Wadden. Afhankelijk van de windrichting en windsterkte komen er verschillende grootschalige circulatiestromen voor in het Markermeer. Bij wind uit de sector zuidwest tot west zal er opwaaiing optreden in de noordoostelijke hoek met verhoging van het waterpeil. In het bovenste deel van de waterkolom zal er water naar dit gebied stromen waardoor er een circulatie van west naar oost ontstaat (rechtsdraaiend). Bij de bodem zal er terugstroming optreden naar het zuidwesten (retourstroom) tegen de windrichting in.

Een voorbeeld van optredende strooming in het Markermeer is weergegeven in Figuur 12. In dit voorbeeld is het stromingspatroon te zien voor een zuidwesten wind met windkracht 5 á 6. Links is de stroomsnelheid en -richting te zien bij het wateroppervlak, en rechts is de strooming nabij de bodem te zien. Wat opvalt, is dat het water over de ondiepe delen (noordwestkant) richting de Houtribdijk stroomt en via de diepere delen (zuidoostkant) weer terug stroomt. De optredende snelheden in de buurt van de locatie voor de Marker Wadden zijn in dit voorbeeld ca. 10 cm/s.

Over het algemeen geldt dat de optredende diepte-gemiddelde stroomsnelheden in het Markermeer, ter plaatse van de Marker Wadden, zeer beperkt zijn. Maximaal te verwachten snelheden liggen in de buurt van 10 á 20 cm/s (in situatie *zonder* Marker Wadden). In een situatie *met* Marker Wadden kunnen de stromingen rondom constructies en randen toenemen ten gevolge van stromingscontractie.

In de meeste gevallen geldt dat de invloed van golven op de morfologische processen groter is dan de strooming. Beide processen kunnen elkaar in sommige gevallen wel versterken.



Figuur 12 Stroomsnelheden in het Markermeer bij zuidwesten wind (windkracht 5 – 6); in m/s. Links: snelheden bij het wateroppervlak. Rechts: snelheden bij de bodem. *Bron: memo positionering slibgeul Marker Waden (078776214-A).*

### 4.3 Sediment karakteristieken

Voor het realiseren van de Marker Wadden wordt zand gewonnen uit een zandwinput ten noordwesten van de projectlocatie. Bodemonsters (*Fugro, 2013*) laten zien dat er Pleistocene zandafzettingen aanwezig zijn in de bodemlagen beneden ca. NAP -10 m. Daarboven zijn lagen met Holocene materiaal aanwezig, dat gebruikt wordt voor het realiseren van de moeraszones. De toplagen van de Markermeer bodem bestaan uit slib en zavel. Een nadere analyse van de bodemsamenstelling is gegeven in het rapport *Ontwerpbasis Geotechnisch UO (13084-04-R01)*.

Op basis van laboratoriumtesten is vastgesteld dat het zand in de Pleistocene laag (tussen NAP -10 m en NAP -30 m) de volgende karakteristieken heeft:

- $D_{50} = 0,265$  mm (0,155 tot 0,585 mm);
- $D_{60}/D_{10} = 2.56$  (1.8-3.4);
- 2,5% < 0,063 mm (0.1-9.6 %) en 4,1% > 2 mm (0.0-28.3 %).

De korreldiameter blijkt bovendien toe te nemen met de diepte. De gemiddelde mediane korreldiameter van het zand uit de Pleistocene laag tussen NAP -18 m en NAP -30 m is ca. 0,35 mm  $\pm$  0,11 mm (gemiddelde  $\pm$  standaardafwijking).

Voor de realisatie van de zachte buitenranden van de Marker Wadden wordt voor de profieldelen tussen NAP -2 m en NAP +1 m (de zogenaamde morfologisch actieve zone) gebruikt gemaakt van het zand uit de Pleistocene laag tussen NAP -18 m en NAP -30 m. De te verwachten vak-gemiddelde  $D_{50}$  voor deze profieldelen is dus 0,35 mm ( $\pm$  0,11 mm).

Ten behoeve van de ontwerpberekeningen en analyses is in de meeste gevallen een conservatief uitgangspunt gehanteerd voor de korreldiameter:  $D_{50} = 0,20$  mm. In sommige berekeningen is (ook) gekeken naar een meer realistisch uitgangspunt, name de te verwachten vak-gemiddelde  $D_{50}$ : 350  $\mu$ m.

#### **4.4 Geotechnische randvoorwaarden**

Voor een overzicht van de gehanteerde randvoorwaarden met betrekking tot de geotechnische aspecten van het ontwerp, zoals bodemsamenstelling en materiaaleigenschappen, wordt verwezen naar de rapportages *Ontwerpbasis Geotechnisch UO (13084-04-R01)* en *Zettings- en stabiliteitsbeschouwing (13084-04-R02)*.

Ten behoeve van de verificaties voor de ontwerpaspecten die zijn beschreven in voorliggende notitie zijn alle relevante conclusies en bevindingen uit de geotechnische achtergrondrapporten direct overgenomen.

## 5 ONTWERPBESCHOUWINGEN (MODULE D)

In voorliggend hoofdstuk worden de berekeningen en analyses gepresenteerd die ten grondslag liggen aan het ontwerp van de zandige delen van module D van de Marker Wadden. De reken- en analysemethodiek die is gebruikt om aan te tonen dat het ontwerp van module D voldoet aan de gestelde eisen is in grote lijnen overeenkomstig met de aanpak die is gevolgd in de voorgaande ontwerpnota over modules A, B en C (MW-UO-WP-OW04). Dit hoofdstuk is opgedeeld in de volgende secties:

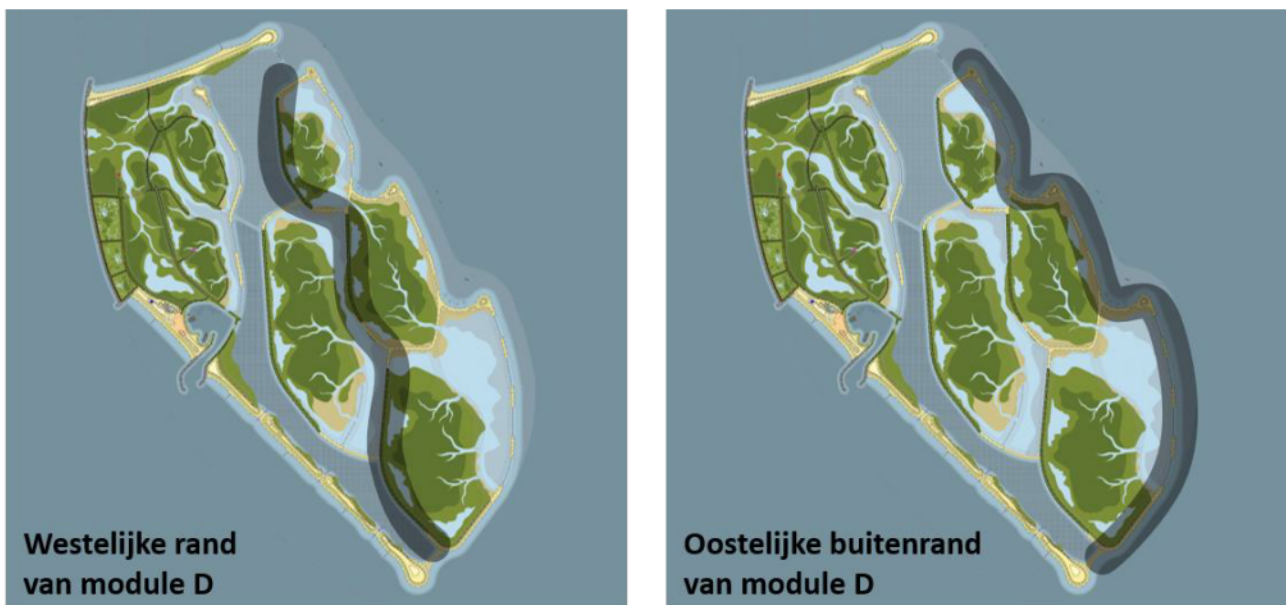
- Ontwerp van de zanddammen van module D;
- Ontwerpdetail: zandbuffers langs de oostelijke buitenrand;
- Ontwerpdetail: zuidpunt van moerasediland D3;
- Ontwerpdetail: overige aandachtspunten;
- Monitoring van zandige buitenrand (oostkant).

### 5.1 Ontwerp zanddammen module D

Het ontwerp van de zachte randen van module D is in sectie 3.3 reeds op hoofdlijnen gepresenteerd. Om aan te kunnen tonen dat het ontwerp van deze randen voldoet aan de hieraan gestelde (functionele) eisen zijn diverse ontwerpberekeningen en analyses uitgevoerd. De belangrijkste resultaten van deze uitwerkingen zijn hieronder nader toegelicht.

Achtereenvolgens komen de volgende onderwerpen aan bod:

- Dimensionering van de zandige (onderwater-)dammen;
- Morfologische stabiliteit van de westelijke luwtedammen;
- Morfologische stabiliteit van de oostelijke buitenrand;
- Onderhoudsbehoefte oostelijke buitenrand;
- Positionering van houten palenrijen;
- Geotechnische aspecten.



Figuur 13 Overzichtswaergave van de Marker Wadden, met aanduiding van de westelijke (links) en de oostelijke (rechts) zanddammen van module D.



### 5.1.1 Dimensionering van de zanddammen

De zandige buitenranden van de eilanden in module D ( $D1$ ,  $D2$ ,  $D3$ ) hebben dezelfde functie als de zanddammen die reeds zijn beschouwd bij het ontwerp van de voorgaande modules. De zandranden hebben als primaire functie om de ondiepe moeraszones (plas-dras en ondiep water) te beschermen tegen golfslag en erosie, en om het holoceen materiaal in deze moeraszones 'op te sluiten'.

Module D is volledig aan de relatief luwe oostzijde van het reeds gerealiseerde deel van de Marker Wadden gepositioneerd. De oostzijde van de drie eilanden vormt dus de buitenrand van de Marker Wadden. De overige zijden van de eilanden liggen meer beschermt achter de reeds aanwezige moerasedeilanden en de primaire luwteranden. Voor de verdere analyses is daarom onderscheid gemaakt tussen de westelijke en de oostelijke zanddammen van module D; zie Figuur 13.

De westelijke randen van de D-eilanden (links in Figuur 13) liggen beschermt achter modules A, B en C. Deze randen kunnen daarom worden gezien als *secundaire luwtedam*; een extra luwtedam achter de primaire luwtedammen (de NW- en ZW- georiënteerde strandranden en de westelijk georiënteerde harde rand). Feitelijk wordt de westkant van de D-eilanden alleen belast door lokaal opgewekte windgolven en stroming in het beschutte binnenwater. Het ontwerp van de westelijke randen lijkt daarom sterk op het eerdere ontwerp van de westrand van module C.

De oostelijke randen van de D-eilanden vormen (na realisatie van ook dit deel van de Marker Wadden) de buitenrand van de Marker Wadden, en deze zullen derhalve in grotere mate bloot staan aan golf- en stromingsbelasting van buitenaf. Een belangrijk verschil tussen de oostelijke buitenrand en de meer westelijke georiënteerde buitenranden (de NW- en ZW- georiënteerde strandranden en de westelijk georiënteerde harde rand) is dat de oostkant van het moerasgebied kan worden beschouwd als relatief luwe zijde; zie sectie 4.2.

Doordat de oostzijde als *luwtezijde* kan worden beschouwd is ervoor gekozen om de buitenranden hier iets minder robuust op te zetten dan de strandranden aan noord- en zuidwestkant, waardoor meer natuurlijke dynamiek in het moerasgebied wordt toegelaten (onder de voorwaarde dat de lokale golfaanval bij stormcondities voldoende beperkt blijft). Hieronder wordt nader ingegaan op de dimensionering en de vormgeving van de zachte randen rondom module D.

In de onderstaande (sub-)secties wordt een nadere onderbouwing gegeven bij de totstandkoming van de ontwerpprofielen. Allereerst is in meer algemene zin ingegaan op de (functionele) verschillen tussen zandige onderwaterdammen en zandige bovenwaterdammen. Vervolgens is de (theoretisch) minimaal benodigde omvang van beide typen zanddammen beschouwd; op basis van expert judgement. Tot slot is de uiteindelijke dimensionering van de zanddammen (conform het DO-ontwerp van module D) nader beschreven; waarbij onderscheid is gemaakt tussen de westelijke zandrand van module D en de oostelijke randen van module D. De meer kwantitatieve verificatie-berekeningen/-analyses komen verderop in dit hoofdstuk aan bod.

#### 5.1.1.1 Onderscheid tussen boven- en onderwaterdammen

De zanddammen van module D worden vanwege de luwere ligging minder zwaar gedimensioneerd dan de strandranden aan de noord- en zuidwestkant van de Marker Wadden. In deze sectie wordt nader ingegaan op de minimaal benodigde omvang van de zanddammen van module D.

Voor een uitgebreidere analyse over de minimale omvang van de oostelijke randen wordt verwezen naar secties 5.3.1 en 5.3.2 in de ontwerpnota van modules A, B en C (*MW-UO-WP-OW04*).

De benodigde omvang van de zanddammen is sterk afhankelijk van de uiteindelijke functie en de gewenste zekerheid in de functionaliteit. Bij het ontwerp van zanddammen geldt dat er onderscheid gemaakt kan worden tussen **bovenwaterdammen** (zoals bij de ZW- en NW-rand voorzien is) en **onderwaterdammen**. Voor een stabiele bovenwaterdam geldt dat de golven feitelijk 'stuklopen' op de buitentaluds, zodat er geen (of zeer beperkte) golftransmissie zal optreden. Voor een onderwaterdam geldt dat er wel golftransmissie zal optreden, maar als de dam goed is gedimensioneerd (d.w.z. voldoende omvang heeft) kan de golfenergie van de golven wel afnemen door de dam.



In het algemeen geldt dat de kruin van een *bovenwaterdam* voldoende hoog (en breed) moet zijn om inkomende golfaanval volledig te kunnen opvangen en om te voorkomen dat de kruin erodeert ten gevolge van golfoverslag. Als de kruin te laag is dan zal de kruin ten gevolge van golfwerking geleidelijk onder water verdwijnen. Dit proces gaat vervolgens net zo lang door totdat een stabiel onderwaterniveau bereikt is waar het effect van golfwerking voldoende is gereduceerd. Resultaat: een *onderwaterdam*.

Met andere woorden, er zijn twee (min of meer) 'stabiele' situaties te onderscheiden voor zanddammen: [1] een bovenwaterdam waarbij de mate van golfoverslag nihil is, en [2] een onderwaterdam waarop de golven nog slechts beperkt invloed hebben.

### 5.1.1.2 Minimaal benodigde omvang zanddammen

Ten behoeve van het ontwerp van de Marker Wadden is voor zowel het type *bovenwaterdam* als het type *onderwaterdam* een inschatting gemaakt van de minimaal benodigde omvang om (ook gedurende een langere periode) te kunnen functioneren als luwtedam en als opsluitdam. Deze inschatting is primair gebaseerd op expert judgement en uit het project Pilot Houtribdijk verkregen informatie. Aanvullend zijn in secties 5.1.2 en 5.1.3 verkennende rekenkundige analyses uitgevoerd ter onderbouwing.

De uiteindelijke dimensionering en vormgeving van de zandranden rondom module D is beschreven in secties 5.1.1.3 en 5.1.1.4. De ontwerpprofielen zijn over het algemeen namelijk robuuster vormgegeven dan de 'minimaal benodigde omvang', rekening houdend met bijvoorbeeld te verwachten zandverliezen.

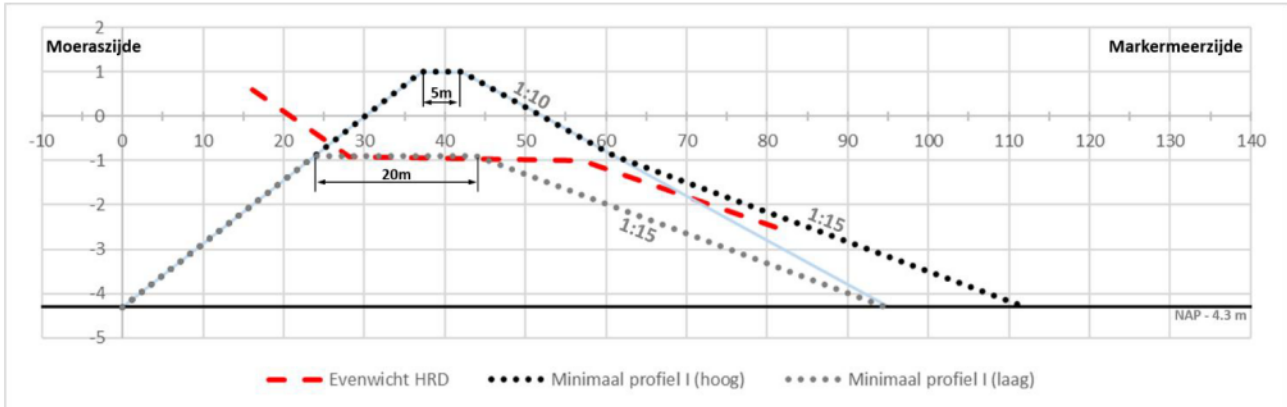
Om bij een *bovenwaterdam* de hoeveelheid golfoverslag (en daarmee de hoeveelheid erosie) te minimaliseren, wordt voorgesteld om een kruinniveau te realiseren dat minimaal boven NAP +0,5 m en bij voorkeur rond NAP +1 m ligt, dit met een kruinbreedte van ca. 5 m. De mate van golfploop en golfoverslag zal hiermee beperkt blijven. Aan de buitenzijde van de dam dient een voldoende flauw zandig evenwichtsprofiel aanwezig te zijn waarop de meeste golven stuklopen. De verwachte evenwichtshelling van een zandig profiel met de korrelkarakteristieken conform de in dit project gehanteerde ontwerpuitgangspunten ligt aan de relatief luwe oostzijde naar verwachting in de range tussen 1 op 15 en 1 op 20 (gemiddeld over het buitentalud). Deze inschatting is gemaakt op basis van monitoringsgegevens van de Pilot Houtribdijk en ervaring bij andere projecten langs de kust.

Voor een *onderwaterdam* geldt dat een zo hoog mogelijke kruin gewenst is die nog net stabiel is in relatie tot de golfwerking; op basis van de Pilot Houtribdijk is ingeschat dat dit niveau rond NAP -0,9 m ligt. Het exacte niveau is echter afhankelijk van de lokaal optredende condities, maar een hoger kruinniveau zal naar verwachting op de langere termijn niet stabiel zijn.

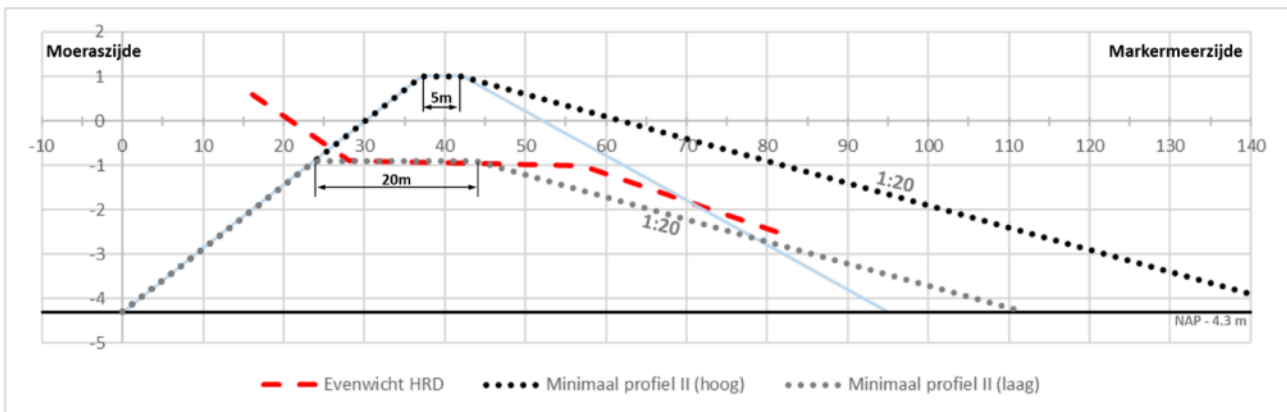
Om – als onderwaterdam – voor voldoende golfdemping te kunnen zorgen tijdens de zwaardere stormcondities is een kruinbreedte nodig die minimaal gelijk is aan de golflengte van de optredende golven. In deze situatie volstaat een kruinbreedte van ca. 20 m.

Voor de taludhelling aan de Markermeerzijde geldt net als bij de bovenwaterdam dat er een evenwichtshelling wordt verwacht tussen 1 op 15 en 1 op 20.

In Figuur 14 en Figuur 15 zijn de ingeschatte minimaal benodigde profielen voor zowel een bovenwaterdam (zwarte stippellijn) als een onderwaterdam (grijze stippellijn) weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen een minimale variant met een evenwichtshelling van 1 op 10 boven NAP -0,9 m en 1 op 15 onder dit niveau (Figuur 14) en gemiddelde variant met een evenwichtshelling van 1 op 20 (Figuur 15). Een helling van 1 op 20 is overeenkomstig met het ontwerpuitgangspunt voor de NW-strandrand. Ter vergelijking is in beide figuren ook een karakteristiek geachte, stabiele profielvorm van de Pilot Houtribdijk (rode gestreepte lijn) ingetekend.



Figuur 14 Weergave van het stabiele dwarsprofiel van de Pilot Houtribdijk (rode lijn) en twee te verwachten evenwichtssituaties voor de oostelijke zandranden: [1] situatie 'dam boven water', en [2] situatie 'dam onder water'. **Optie I** (minimale variant): een talud van 1 op 10 (boven water) en 1 op 15 (onder water).



Figuur 15 Weergave van het stabiele dwarsprofiel van de Pilot Houtribdijk (rode lijn) en twee te verwachten evenwichtssituaties voor de oostelijke zandranden: [1] situatie 'dam boven water', en [2] situatie 'dam onder water'. **Optie II** (gemiddelde variant): een talud van 1 op 20.

Samenvatting van resultaat expert beschouwing over de minimaal benodigde profielomvang, per type dam:

- Minimale omvang **bovenwaterdam** (als eindsituatie, na zetting)
  - Kruinniveau: NAP +1,0 m
  - Kruinbreedte: 5 m
  - Zandvolume: 300 m<sup>3</sup>/m (evenwichtshelling van 1 op 10 en 1 op 15)  
400 m<sup>3</sup>/m (evenwichtshelling van 1 op 20)
- Minimale omvang **onderwaterdam** (als eindsituatie, na zetting)
  - Kruinniveau: NAP -0,9 m
  - Kruinbreedte: 20 m
  - Zandvolume: 200 m<sup>3</sup>/m (evenwichtshelling van 1 op 10 en 1 op 15)  
225 m<sup>3</sup>/m (evenwichtshelling van 1 op 20)

Bovengenoemde zandvolumes zijn gebaseerd op profielen met een evenwichtshelling die benodigd is voor buitenranden die in open verbinding staan met het Markermeer. Voor de zanddammen tussen de moeraseilanden binnen in het gebied van Marker Wadden, zoals bijvoorbeeld de westelijke randen van module D, kan worden volstaan met steilere taluds (en dus met kleinere volumes per strekkende meter). De golfbelasting op deze dammen is namelijk substantieel lager dan langs de buitenranden.

Monitoring van het morfologische gedrag van de zanddammen in de periode na realisatie is daarbij wel noodzakelijk, met name om een inzicht te krijgen in de stabiliteit van de dammen op de langere termijn.

### 5.1.1.3 Dimensionering westelijke zanddammen

In navolging op de analyses van de *minimaal benodigde omvang* voor het (momentaan) functioneren van de zachte randen rondom module D, wordt hier nader ingegaan op de uiteindelijk voorgestelde omvang en vormgeving van de westelijke zanddammen in het ontwerp. In het ontwerp is onder meer ook rekening gehouden met eventuele vervorming en/of verliezen, waardoor het ontwerpvolume kan afwijken van de minima uit de voorgaande beschouwing.

De westelijke zanddammen van module D (Figuur 13, links) zijn qua ontwerp vergelijkbaar met het ontwerp van de westrand van module C. In beide gevallen is er sprake van een zogenaamde secundaire luwtedam met een – naar verwachting – beperkte golfbelasting (primair lokaal opgewekte golven). Vanwege de luwe ligging van de westelijke dammen is gekozen voor een slank ontwerp met een kruinniveau op NAP +1,0 m, en een buitentalud van ca. 1 op 7. Zie ook sectie 3.3.

Met het beschreven ontwerp is de beoogde functionaliteit van de westelijke zanddammen geborgd: de randen beschermen het achterliggende moerasgebied tegen golfaanval en tegelijkertijd houden ze het holoceen materiaal ingesloten binnen de eiland-compartmenten.

- Secundaire luwtedam westzijde (ontwerpprofiel, *excl. zettingscompensatie*)
  - Kruinniveau: NAP +1,0 m
  - Kruinbreedte: 7 m
  - Taludhelling onder water: ca. 1 op 7;
  - Taludhelling boven water: ca. 1 op 5 (gemiddeld; incl. berm rond waterlijn);
  - Zandvolume: 208 m<sup>3</sup>/m

### 5.1.1.4 Dimensionering oostelijke zanddammen

Op een vergelijkbare wijze als in de vorige sectie wordt hier nader ingegaan op de dimensionering en vormgeving van de oostelijke dammen in het ontwerp van module D. Ook hier geldt dat de ontwerpolumes afwijken van de (ingeschatte) minimaal benodigde zandvolume voor het momentaan functioneren van de dam, omdat de functionaliteit van de dam ook over een langere periode geborgd dient te zijn.

De oostelijke dammen van module D (Figuur 13, rechts) variëren qua dimensionering langs de buitenrand. De buitenrand betreft een zanddam met een kruinniveau dat afwisselend onder, op en boven de gemiddelde waterstand ligt; dit is enigszins vergelijkbaar met het ontwerp van de achterkant van modules A, B en C. Zie ook ontwerpnota *MW-UO-WO-OW04*.

De achterkant van module D bestaat in de eindsituatie grotendeels uit een onderwaterdam met een afwisselend kruinniveau op NAP -0,2 m en NAP -0,9 m; net als aan de achterkant van modules A en B. Dit type dam wordt gerealiseerd aan de achterzijde van eilanden D1 en D3.

Opgemerkt wordt dat een kruinniveau op NAP -0,2 m *naar verwachting* geleidelijk zal 'wegzakken' ten gevolge van golfwerking (zie vorige sectie met algemene overwegingen). Ingeschat wordt dat een stabiel (onderwater) kruinniveau rond NAP -0,9 m zal liggen, maar dit is ook sterk locatie-afhankelijk. Voor de functionaliteit van de zandrand (creëren van luwte en opsluiten van holoceen materiaal) is het geen probleem als het kruinniveau terugzakt tot ca. NAP -0,9 m (zie verificaties in ontwerpnota *MW-UO-WP-OW04*). In het ontwerp is ervoor gekozen om het kruinniveau rond de waterlijn te blijven hanteren, waarbij het gedrag en de functionaliteit van de dam gemonitord zal worden.

De achterkant van eiland D2 vormt een uitzondering wat betreft het kruinniveau: op deze locatie wordt een zandige buitenrand gerealiseerd met een hoger gelegen kruinniveau (afwisselend NAP +0,5 m en NAP -0,4 m). De belangrijkste reden hiervoor is het hogere niveau van het achterliggende plas-dras gebied. Zie sectie 5.4.1 voor een nadere toelichting.

Ook de zuidpunt van eiland D3 vormt een uitzondering wat betreft het kruinniveau. Deze zuidpunt wordt gezien als een relatief kwetsbaar punt van de oostelijke buitenrand, en daarom is veiligheidshalve gekozen voor een *bovenwaterdam* met een kruinniveau op NAP +1,0 m. Zie sectie 5.3 voor een nadere toelichting.



Wat betreft de vormgeving van het *buitentalud* van de oostelijke zanddammen is er een belangrijk verschil tussen het ontwerp van de oostelijke buitenrand van module D en het ontwerp van de (voormalige) buitenrand behorende bij het eerder beschouwde ontwerp zonder module D (= oostrand van module C). Het buitentalud van de oostelijke zandrand van module D is *flauwer* dan het buitentalud dat eerder was voorzien voor de achterzijde van module C (voormalige buitenrand). Voor de buitenrand van module D is veiligheidshalve een taludhelling van 1 op 20 aangehouden in het ontwerp.

De belangrijkste reden om juist aan de oostkant van module D een robuust ontwerp van de buitenrand (lees: flauw talud) te realiseren is dat het morfologische gedrag van de zandranden vooralsnog lastig te voorspellen is, en dat er veel belang gehecht wordt aan zekerheid over het functioneren van de zachte buitenranden van de Marker Wadden (luwtefunctie en opsluitfunctie). In de eerdere ontwerpfase (ontwerp module C) is reeds ingespeeld op de verwachting dat er meer eilanden gerealiseerd zullen worden, waardoor een iets groter risico is genomen in de vormgeving van de buitenranden.

Op dit moment is het nog (te) onzeker of er een vervolgfase komt waarmee direct achter module D nog een eilandengroep komt dat voor luwte kan zorgen. En, zoals het er nu naar uitziet<sup>3</sup> lijkt de oostkant van eiland D3 ook daadwerkelijk de definitieve buitenrand van de (1<sup>e</sup> fase) Marker Wadden te worden. Vanuit deze redenatie is besloten om een robuustere vormgeving van de oostelijke buitenrand van module D op te nemen in het ontwerp. De oostkant van eilanden D1 en D2 komt op termijn mogelijk nog wel in de luwte van module E te liggen, maar dit is momenteel nog te onzeker om alvast rekening mee te houden.

In het ontwerp van module D is voor elk van de D-eilanden (D1, D2, D3) een buitenrand voorzien met een taludhelling van ca. 1 op 20 (boven NAP -2,5 m). De kans op structurele verliezen in dwarsrichting wordt door dit flauwe buitentalud geminimaliseerd. Derhalve hoeft (bijna) alleen nog rekening gehouden te worden met eventuele verliezen en/of herverdeling van zand in langsrichting.

Hieronder is een overzicht gegeven met de belangrijkste kenmerken van de ontwerpprofielen (= beoogd eindbeeld na optreden zettingen) voor de oostelijke randen.

- Zandige buitenrand oostzijde - laag (ontwerpprofiel, *excl. zettingscompensatie*)
  - Kruinniveau: NAP -0,9 m
  - Kruinbreedte: 38 m
  - Taludhelling binnentalud: ca. 1 op 7;
  - Taludhelling buitentalud: ca. 1 op 20;
  - Zandvolume: 262 m<sup>3</sup>/m
- Zandige buitenrand oostzijde - hoog (ontwerpprofiel, *excl. zettingscompensatie*)
  - Kruinniveau: NAP -0,2 m
  - Kruinbreedte: 19 m (= 38 m op NAP -0,9m)
  - Taludhelling binnentalud: ca. 1 op 7;
  - Taludhelling buitentalud: ca. 1 op 20;
  - Zandvolume: 282 m<sup>3</sup>/m

Wanneer de zandvolumes van de ontwerpprofielen worden vergeleken met de (theoretisch) minimaal benodigde volumes voor een onderwaterdam (225 m<sup>3</sup>/m voor een evenwichtsprofiel met 20 m brede kruin rond NAP -0,9 m en een buitentalud van 1 op 20), dan kan worden geconcludeerd dat de ontwerpprofielen ruim voldoende zand bevat om te kunnen functioneren als luwtedam: een overschot van meer dan 40 m<sup>3</sup>/m. Dit overschot dient te worden beschouwd als een onderhoudsbuffer om vervorming en verliezen op te kunnen vangen gedurende de onderhoudsperiode.

<sup>3</sup> Stand van zaken op het moment van schrijven: maart 2017

Regelmatige monitoring van de ontwikkeling van deze dammen is noodzakelijk. Mocht tijdens de uitvoering al blijken dat er sterke vervorming van de dammen optreedt, dan kan ervoor worden gekozen om alsnog extra zand in profiel te brengen/houden. De zachte buitenranden, die allen ook als compartimenteringsdam fungeren, worden initieel hoger/breder aangelegd dan het beoogde eindbeeld (vanwege het consolidatieproces van het holoceen materiaal). De bestemming voor dit (voor realisatie benodigde) zandoverschot is momenteel nog onbekend. Afhankelijk van het initiële gedrag van de buitenranden kan besloten worden om dit zand te gebruiken voor (lokale) herprofilering op locaties waar de zandrand anders blijkt te ontwikkelen dan op voorhand voorzien. Dit is een risicoafweging; zie *risicodossier*.

### 5.1.2 Morfologische stabiliteit van westelijke luwtedammen

Het ontwerp van de zanddammen langs de westkant van module D van de Marker Wadden is dusdanig gedimensioneerd dat het achterliggende moerasgebied voldoende is beschermd/afgeschermd voor golfaanval vanuit het Markermeer. In de eerdere analyses is echter nog niet expliciet ingegaan op het feit dat de betreffende dammen primair uit zand bestaan, en er dus morfologische processen zullen optreden om en nabij deze randen. Daarom is een analyse uitgevoerd om de morfologische stabiliteit van de westzijde van de eilanden te toetsen; hierbij is onderscheid gemaakt tussen het effect van stormcondities en het effect van gemiddelde jaarrond condities.

De westelijke luwtedammen van module D zijn qua ontwerp min of meer gelijk aan de dammen aan de westkant van module C. De ontwerpverificaties voor de dammen zijn daarom volledig gebaseerd op de analyses en berekeningen die reeds zijn uitgevoerd in de eerdere ontwerpnota voor de zachte randen van modules A, B en C, met kenmerk *MW-UO-WP-OW04*. De relevante onderbouwingen zijn beschreven in secties 5.3.3 en 5.3.4 van de betreffende nota.

#### 5.1.2.1 Stormcondities

*Zie analyses in secties 5.3.3 en 5.3.4 in ontwerpnota MW-UO-WP-OW04 (o.a. Figuur 51)*

Er zijn modelberekeningen uitgevoerd om vast te stellen of de westelijke luwtedammen van module D, met een buitentalud van 1 op 7, een maatgevende storm kunnen weerstaan. Aangezien de hier beschouwde secundaire luwtedammen afgeschermd worden door de voorliggende primaire luwtedammen en het moerasgebied van modules A, B en C zal de golfaanval (veel) minder zwaar zijn dan langs de buitenranden van de Marker Wadden.

Voor de berekeningen (CROSMOR) is uitgegaan van golfhoogten in de range van 0,7 – 1,1 m; dit is een erg conservatief uitgangspunt aangezien de daadwerkelijke golfaanval voornamelijk zal bestaan uit lokaal opgewekte golven tussen de verschillende moerasedeilanden (met een ingeschatte golfhoogte van enkele decimeters; zie sectie 5.3.4 in *MW-UO-WP-OW04*). Uit de berekeningen blijkt dat de mate van erosie tijdens de beschouwde stormcondities beperkt is. Zelfs bij een extreme lokale golfhoogte van 1,1 m beperkt het erosievolume zich tot ca. 5 m<sup>3</sup>/m rond de waterlijn; wat equivalent is aan een achteruitgang van de waterlijn met ca. 5 m. Met lokaal opgewekte golven zal de morfologische verandering tijdens stormen nog kleiner zijn.

#### Conclusie stormcondities

Geconcludeerd wordt dat de westelijke zanddammen voldoende robuust zijn vormgegeven om de (lokaal opgewekte) golfaanval tijdens maatgevende stormcondities te kunnen weerstaan.

#### 5.1.2.2 Jaarrond condities

*Zie analyses in secties 5.3.3 en 5.3.4 in ontwerpnota MW-UO-WP-OW04 (o.a. Figuur 52)*

Om een inschatting te maken van de lange-termijn morfologische ontwikkeling van de westelijke luwtedammen is primair gekeken naar het mogelijke effect van (langdurige) golfwerking op een min of meer constant waterniveau. Benadrukt wordt dat de westelijke zandrand van module D volledig is afgeschermd van het open water van het Markermeer. De golf-/stromingsbelasting op deze dam zal dus in relatieve zin beperkt zijn.

De lange-termijn ontwikkeling van een zandig profiel in het Markermeer is voornamelijk lastig te voorspellen; kennis- en modelontwikkeling op dit vlak staan momenteel wel hoog op de (kennis)agenda vanwege diverse zandige initiatieven in het Markermeer. Voor het ontwerp van de noord- en zuidwestelijke strandranden van



de Marker Wadden zijn de inhoudelijke onderbouwingen deels ontleend aan de voorlopige resultaten van de Pilot Houtribdijk, maar vanwege de luwe ligging van de westelijke randen van module D is het niet direct mogelijk om deze resultaten 1 op 1 te gebruiken.

Op basis van beschikbare kennis is ingeschat dat een 1 op 7 talud in het afgeschermd binnengebied van de Marker Wadden gedurende een langere periode voldoende stabiel is om te functioneren als luwte- en opsluitdam voor het achterliggende moeras. Naar verwachting zal er op deze dammen op termijn ook vegetatie ontwikkelen wat de stabiliteit van het zandlichaam ten goede komt.

Ter ondersteuning van bovenstaande analyse zijn ook enkele morfologische berekeningen uitgevoerd met het model XBeach (zie ontwerpnota *MW-UO-WP-OW04*), uitgaande van een 1 op 7 profiel met een kruin boven water en een conservatief uitgangspunt van de korreldiameter (200 mu). Voor de berekeningen zijn gemiddelde condities gehanteerd (golfhoogte van 30 cm en waterstand rond zomerpeil). Het resultaat van deze berekening bevestigt de inschatting dat de morfologische vervorming van de dam (op een termijn van maanden tot jaren) beperkt zal zijn vanwege de luwe ligging.

Vanwege de beperkte kennis over lange-termijn ontwikkeling van zandige oevers in het Markermeer is actieve monitoring van het morfologische gedrag van deze randen noodzakelijk.

### Conclusie jaarrondcondities

Op basis van beschikbare kennis over zandige profielen in laag-energetische systemen en enkele verkennende modelberekeningen is ingeschat dat de westelijke randen van module D tijdens jaarrond condities voldoende stabiel zijn om gedurende een langere periode (jaren) te functioneren als luwte- en opsluitdam. Aanbevolen wordt om het morfologische gedrag van de dammen actief te monitoren.

## 5.1.3 Morfologische stabiliteit van oostelijke buitenrand

Het ontwerp van de zanddammen langs de oostelijke buitenrand van de Marker Wadden (module D) is dusdanig gedimensioneerd dat het achterliggende moerasgebied voldoende is beschermd/afgeschermd voor golfaanval vanuit het Markermeer. Net als voor de westelijke buitenrand is een analyse uitgevoerd om de morfologische stabiliteit van de oostzijde van de eilanden te toetsen; hierbij is onderscheid gemaakt tussen het effect van stormcondities en het effect van gemiddelde jaarrond condities.

De oostelijke buitenrand van module D is qua ontwerp vergelijkbaar met de dammen aan de achterzijde van modules A en B; met als belangrijkste verschil de toepassing van een iets flauwere taludhelling aan de Markermeerszijde.

Qua functionaliteit is deze buitenrand overeenkomstig met de (voormalige) ooststrand van module C. De ontwerpverificaties voor de oostelijke buitenrand zijn daarom grotendeels gebaseerd op de analyses en berekeningen die reeds zijn uitgevoerd in de eerdere ontwerpnota voor de zachte randen van modules A, B en C, met kenmerk *MW-UO-WP-OW04*. De relevante onderbouwingen zijn beschreven in secties 5.3.3 en 5.3.4 van de betreffende nota.

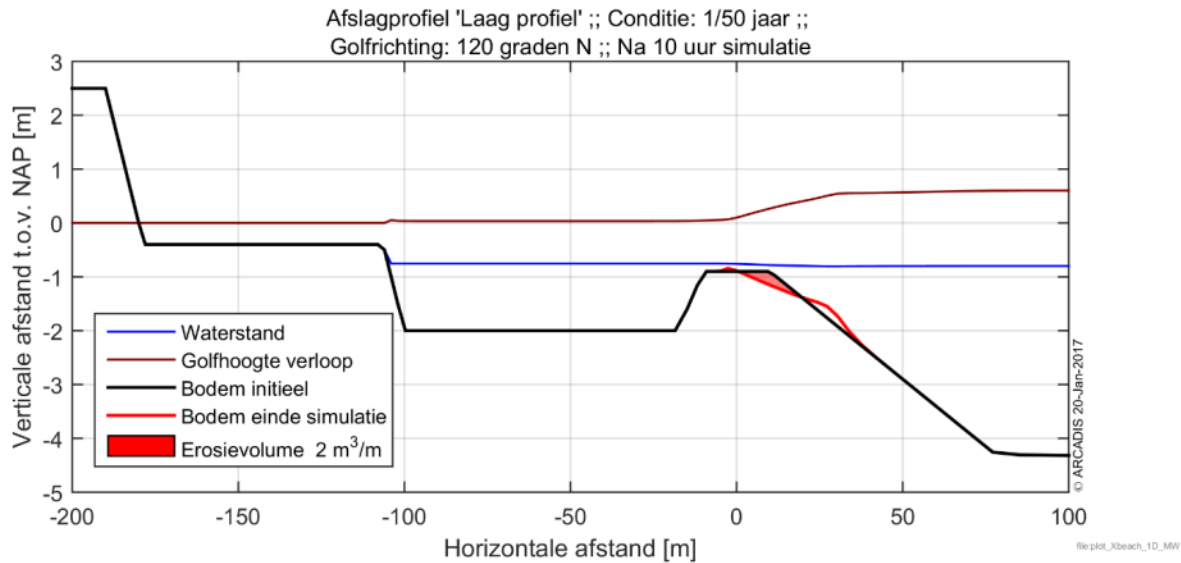
### 5.1.3.1 Stormcondities

Op eenzelfde wijze als bij eerdere analyses voor de verificatie van het ontwerp van de Marker Wadden (zie ontwerpnota *MW-UO-WP-OW04*) is voor de zandranden aan de oostelijke buitenrand van module D, op basis van modelberekeningen, een inschatting gemaakt van het morfologische effect van een 1/50 per jaar storm. Hiervoor is gebruikt gemaakt van het rekenmodel *XBeach*. Resultaten van de berekeningen zijn hieronder gepresenteerd.

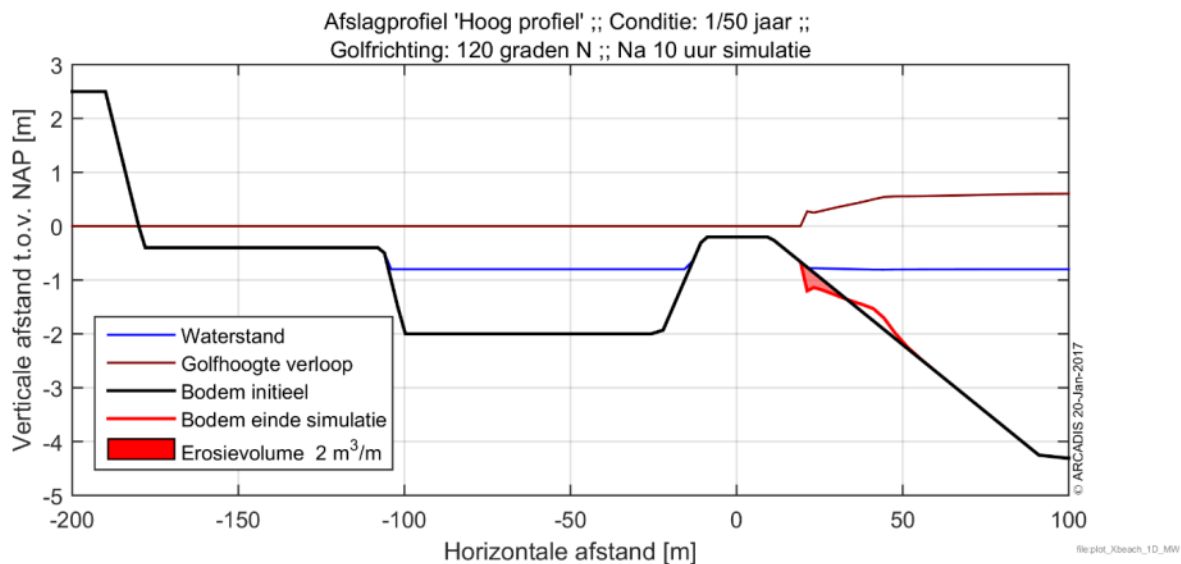
De uitgevoerde berekeningen zijn gebaseerd op de randvoorwaarden die zijn voorgeschreven in de VSE. Een overzicht met de relevante maatgevende condities behorende bij een 1/50 per jaar storm voor verschillende richtingssectoren (NNO – OZO); conform Tabel 5. Voor de korreleigenschappen van het zand is een conservatief uitgangspunt gehanteerd: 200 mu. Qua rekenprofiel zijn diverse varianten beschouwd die nader worden toegelicht.

In Figuur 16 en Figuur 17 zijn de modelresultaten gepresenteerd voor twee karakteristieke (geschematiseerde) dwarsprofielen langs de oostelijke buitenrand van module D. Figuur 16 toont (een iets smallere versie van) het profiel van de dam met een kruinniveau op het niveau NAP -0,9 m (lage variant). Figuur 17 toont het andere type dam met een kruinniveau op NAP 0,2 m (hoge variant). Beide profielen hebben een buitentalud van 1 op 20. Zie secties 3.3 en 5.1.1 voor een nadere toelichting.

Beide figuren tonen het rekenresultaat van een 1/50 per jaar storm uit oostzuidoostelijke richting. Deze golf-/windrichting resulteert in het meest 'ongunstige' morfologische effect op de buitenrand; ten opzichte van de berekeningen met andere combinaties van golven en waterstanden (voor de diverse windrichtingen).



Figuur 16 Resultaat van afslagberekening met XBeach voor een zanddam op niveau NAP -0,9 m aan de luwtezijde (oostkant), op basis van de 1/50 jaar<sup>-1</sup> stormcondities uit een oostelijke richting.



Figuur 17 Resultaat van afslagberekening met XBeach voor een zanddam op niveau NAP -0,2 m aan de luwtezijde (oostkant), op basis van de 1/50 jaar<sup>-1</sup> stormcondities uit een oostelijke richting.

De figuren laten zien dat slechts op een deel van de onderwaterdam erosie optreedt tijdens een 1/50 per jaar storm. Het totale erosievolume beperkt zich tot 2 m<sup>3</sup>/m. Bij de dam met een kruin op NAP -0,9 m spreidt de erosie zich in horizontale richting uit over de kruin en het buitentalud, waarbij de buitenkruinlijn ca. 10 m opschuift. Dit komt doordat de dam volledig onder water ligt bij deze stormcondities. Bij de dam met een kruin rond het zomerpeil (NAP -0,2 m) beperkt de erosie zich tot het buitentalud, omdat de kruin boven de – voor deze windrichting – maatgevende waterstand ligt. De resterende kruinbreedte ter plaatse van de dammen is in beide gevallen nog minimaal 5 – 10 m. Dit blijkt voldoende om tijdens de storm voor voldoende luwte te zorgen in het achterliggende gebied. In beide situaties (hoge en lage luwtedam) treedt er bovendien *géén* erosie op langs de rand van het plas-dras (in de ondiepere moeraszone). Beide damconfiguraties bieden dus (ook) tijdens 1/50 per jaar stormcondities bescherming tegen erosie in het achterliggende moerasgebied.

Opgemerkt wordt dat de kruinbreedte van de ‘lage’ dam in het uiteindelijke ontwerp breder is dan in deze berekening is voorzien. Dit betekent dat het ontwerpprofiel tot een (nog) gunstiger resultaat zal leiden.

Na een zware storm uit oostelijke richting is het wel aan te raden om de hoogteligging van de onderwaterdam in te meten en te beoordelen. Te veel zandverlies naar dieper water kan op termijn resulteren in een verminderde functionaliteit van de buitenrand in relatie tot het creëren van luwte (ook bij minder extreme condities).

### Conclusie stormcondities

Op basis van de uitgevoerde berekeningen is vastgesteld dat de buitenrand aan de oostzijde van de Marker Wadden voldoende robuust is gedimensioneerd om een 1/50 per jaar storm te kunnen weerstaan en om het achterliggende moeras te beschermen. Dit geldt voor alle profielvarianten in het ontwerp van de buitenrand; ieder met verschillende kruinniveaus.

### 5.1.3.2 Jaarrond condities

Hierboven is vastgesteld dat de zandranden aan de achterzijde van de Marker Wadden een zware storm (1/50 per jaar) kunnen weerstaan. Eén storm met een duur van ca. 10 uur is echter niet per definitie de meest maatgevende situatie qua morfologische stabiliteit. Daarom is het belangrijk om ook een gevoel te krijgen voor het morfologische gedrag van deze dammen tijdens gemiddelde jaarrond condities. Dit ook in relatie tot de minimaal benodigde profielomvang ten behoeve van het functioneren van deze dammen.

Aangezien er geen/weinig vergelijkbare situaties bestaan in het Markermeer, met een zandige dam aan een relatief luwe zijde, is een poging gedaan om het morfologische gedrag te voorspellen met behulp van een rekenmodel en op basis van expert judgement.

### Inschatting van profielontwikkeling (modelberekeningen)

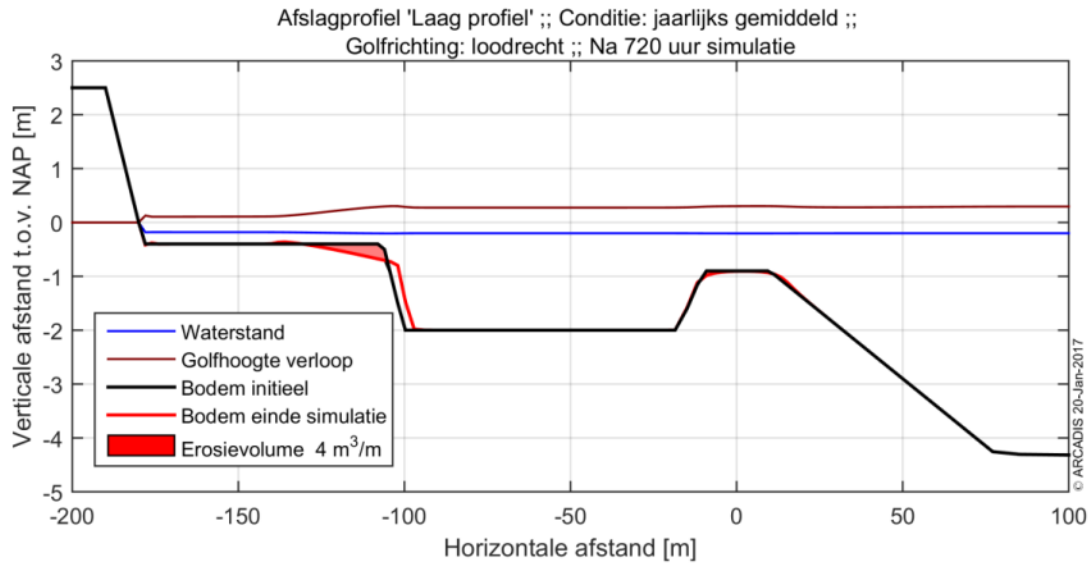
Om een inschatting te maken van de lange-termijn morfologische ontwikkeling van de (onderwater)dammen aan de oostelijke buitenrand van module D is in eerste instantie gebruik gemaakt van het rekenmodel XBeach. Dit is gedaan middels een geschematiseerde case met een constante hydraulische belasting ( $H_s = 0,3$  m en  $WL = NAP -0,2$  m), en een simulatieduur van 1 maand. Aangezien er in werkelijkheid nooit een maand lang oostenwind optreedt met een dusdanige windsnelheid dat er een golfhoogte van 30 cm ontstaat, is het resultaat van de simulatie representatief voor de morfologische ontwikkeling van een langere periode: enkele maanden.

Er zijn principe-berekeningen uitgevoerd voor zanddammen met twee verschillende kruinniveaus: NAP -0,2 m en NAP -0,9 m. Deze dammen hebben een buitentalud van 1 op 20 en een kruinniveau van ca. 20 m<sup>4</sup>. Het achterliggende moeras is in beide gevallen slechts schematisch weergegeven.

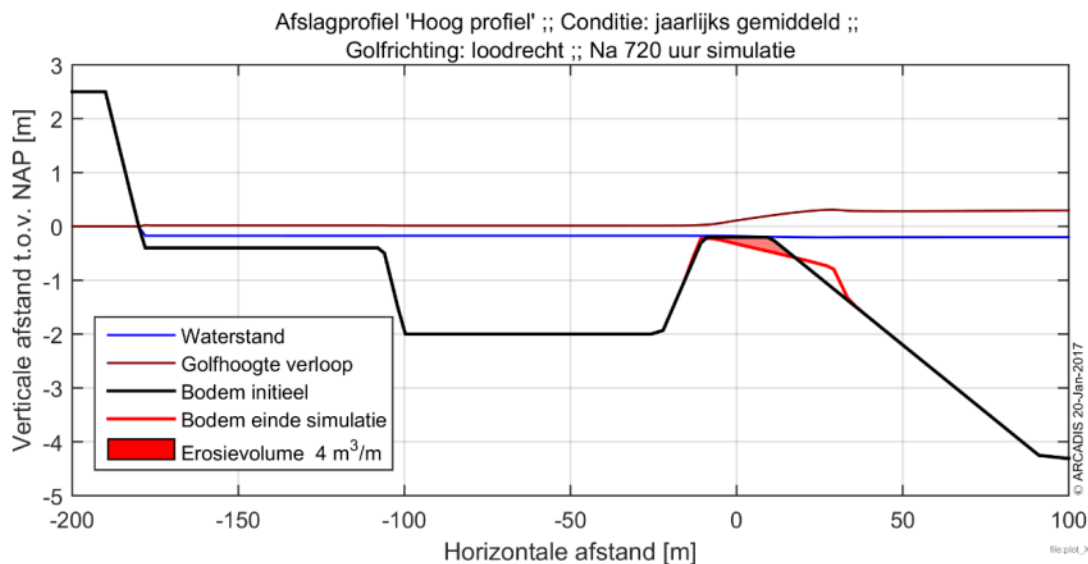
De resultaten van de morfologische berekeningen zijn gepresenteerd in Figuur 18 en Figuur 19.

<sup>4</sup> Het uiteindelijke ontwerpprofiel van de oostelijke dam met een kruinniveau op NAP -0,9 m heeft een kruinbreedte van méér dan 20 m.





Figuur 18 Resultaat van afslagberekening met XBeach voor een zanddam op niveau NAP -0,9 m aan de luwtezijde (oostkant), op basis van jaarlijks gemiddelde condities uit oostelijke richting.



Figuur 19 Resultaat van afslagberekening met XBeach voor een zanddam op niveau NAP -0,2 m aan de luwtezijde (oostkant), op basis van jaarlijks gemiddelde condities uit oostelijke richting.

Figuur 18 laat zien dat er bij de beschouwde condities *géén* erosie optreedt ter plaatse van de onderwaterdam op niveau NAP -0,9 m. De golfwerking ter plaatse van de kruin blijkt bij een waterdiepte van ca. 70 cm geen effect te hebben op de morfologie. *Het gaat hier primair om de lokale waterdiepte; kruinniveau en waterstand zijn op zichzelf minder relevant voor deze analyse.*

Figuur 19 toont de morfologische ontwikkeling van een situatie met een dam met een kruinniveau op NAP - 0,2 m. In dit geval treedt er *wel* erosie op ter plaatse van de dam. De mate van erosie is overigens wel kleiner dan bij een steiler buitentalud zoals beschouwd in de ontwerpnota voor modules A, B en C. Het figuur laat zien dat er binnen enkele maanden een lagere en bredere onderwaterdam ontstaat. De inkomende golven zorgen voor dusdanige herverdeling van zand dat er feitelijk een nieuwe, stabielere, situatie ontstaat met een geleidelijk oplopend profiel, met een lokale waterdiepte van ca. 60 cm ter plaatse van de onderwaterdam; dit komt overeen met  $2 \cdot H_s$ . Naar verwachting zal deze ontwikkeling zich over een langere periode nog iets verder doorzetten tot er een evenwichtssituatie ontstaat die lijkt op de situatie in Figuur 18.

Uit de rekenresultaten blijkt dat een onbeschermd zandige onderwaterdam niet in alle gevallen morfologisch stabiel is onder gemiddelde jaarrond condities. Met name voor zandige profiel met een kruinniveau net onder of net boven water (ca.  $\pm 50$  cm) zal vervorming optreden van de dam waardoor het kruinniveau afneemt. Dit hoeft niet direct een probleem te zijn, mits de golfhoogten in de achterliggende ondiepe moeraszone beperkt blijven (bij zwaardere condities); en dat is ook het geval (zie ontwerpnota MW-UO-WP-OW04).

De rekenresultaten lijken overigens – ondanks de verschillen in oriëntatie van de profielen – in lijn te zijn met de situatie die is ontstaan bij de Pilot Houtribdijk. Het onderwaterprofiel van de zandstranden bij de pilot is binnen enkele maanden dusdanig vervormd dat er een onderwaterplateau is ontstaan rond het niveau NAP -1 m. Blijkbaar is dit een ‘stabiel’ niveau waarop de gemiddeld optredende golven weinig invloed hebben.

### Inschatting van profielontwikkeling (expert judgement)

Voor het ontwerp van de oostelijke buitenranden is ook op basis van expert judgement een inschatting gemaakt van de te verwachten (morfologische) ontwikkeling ten gevolge van golfwerking. Een uitgebreide analyse over de stabiliteit van diverse typen onderwaterdam is reeds beschreven in ontwerpnota MW-UO-WP-OW04. Eén van de belangrijkste bevindingen in deze voorgaande ontwerpnota is dat een zandige dam met een kruinniveau rondom het gemiddelde waterniveau (ca.  $\pm 50$  cm) geleidelijk zal vervormen tot een onderwaterdam met een min of meer ‘stabiel’ kruinniveau rond NAP -0,9 m. Dit is gebaseerd op basis van voorlopige resultaten van de Pilot Houtribdijk en enkele verkennende modelberekeningen.

Ten aanzien van de vormgeving van de zanddammen aan de oostkant van module D geldt dat er een belangrijk verschil bestaat ten opzichte van de ontwerpprofielen van de achterzijden van de eerdere modules (A, B, C). In het ontwerp van de zanddammen aan de achterkant van de D-eilanden is namelijk gekozen voor een buitentalud van 1 op 20 (boven NAP -2,5 m); dit is een stuk flauwer dan de profielen die zijn beschouwd voor de eerdere modules. De belangrijkste reden hiervoor is dat er – naar verwachting – direct bij aanleg een evenwichtsprofielvorm wordt gerealiseerd; waardoor profielvervorming wordt geminimaliseerd.

Door het flauwere buitentalud, in combinatie met een gelijkblijvend kruinniveau en eenzelfde kruinbreedte, wordt extra zekerheid ingebouwd ten aanzien van de morfologische stabiliteit en de functionaliteit van de oostelijke dammen. Door deze robuuste vormgeving is naar verwachting minder onderhoud nodig gedurende de onderhoudsperiode. Het *theoretische* overschot aan zand in het profiel dient te worden beschouwd als een onderhoudsbuffer om (on)voorziene verliezen op te kunnen vangen. *Zie hierop volgende sectie.*

In relatie tot de analyses van de lange termijn ontwikkeling van de oostelijke buitenranden wordt nog wel opgemerkt dat er een belangrijk verschil bestaat tussen de situatie aan de achterzijde van de Marker Wadden en de – ter vergelijking beschouwde – situatie ter plaatse van de Pilot Houtribdijk. Op de locatie van de Pilot Houtribdijk is namelijk sprake van een sterke positieve correlatie tussen waterstand en golfhoogte, terwijl dit aan de achterzijde van het eiland juist niet het geval is. Het effect hiervan is op dit moment nog niet duidelijk. Gezien de onzekerheden met betrekking tot het morfologische gedrag van de onderwaterdammen aan de achterzijde – en dus ook de bepaling van het ‘stabiële kruinniveau’ – wordt aanbevolen om intensief te monitoren tijdens en na aanleg. Waar nodig kan het ontwerp dan later eventueel iets worden bijgesteld (adaptief ontwerp).

### Conclusie jaarrondcondities

Op basis van de hierboven beschreven analyses is vastgesteld dat de oostelijke buitenrand van module D dusdanig is ontworpen dat deze – in dwarsrichting – stabiel is tijdens jaarrond condities. Met een combinatie van expert judgement en ondersteunende berekeningen vastgesteld dat de functionaliteit van de zandrand (luwte- en opsluitfunctie) bij normale condities voor een langere periode geborgd is.

Met behulp van enkele lange-termijn morfologische berekeningen en een vergelijking met de Pilot Houtribdijk is vastgesteld dat voor de onbeschermd onderwaterdammen een min of meer stabiel kruinniveau kan worden verwacht rond NAP -0,9 m. Bij alle onderwaterdammen die hoger worden aangelegd dient rekening gehouden te worden met profielvervorming (en kruinverlaging) ten gevolge van golfwerking.

Eventueel gewenste instandhouding van een onbeschermd zandig profiel met een kruin tussen ca. NAP -0,9 m en NAP +0,5 m vergt (extra) onderhoud; maar lijkt niet nodig te zijn in relatie tot de feitelijke functies van deze zanddammen. In de volgende sectie wordt nader ingegaan op het eventueel benodigde onderhoud voor instandhouding van de functionaliteit van de oostelijke buitenrand.



#### 5.1.4 Onderhoudsbehoefte oostelijke buitenrand

Voor het maken van een inschatting van de onderhoudsbehoefte van de zachte randen aan de achterzijde van de Marker Wadden (ostrand module D) is onderscheid gemaakt tussen:

- Verliezen in dwarsrichting (vervorming dwarsprofiel);
- Verliezen in langsrichting (gradiënten in langstransport).

##### 5.1.4.1 Verliezen in dwarsrichting

Met de voorgaande analyses is ingeschat dat de delen van de buitenrand met een initieel kruinniveau rond NAP -0,2 m door de invloed van golven op de langere termijn dusdanig zullen vervormen dat het kruinniveau verder onder water zal zakken. Dit geldt voor een situatie waarbij de dammen *niet* beschermd worden door vegetatie (en/of steenbekleding). Mogelijk kan er op de dammen rond de waterlijn vegetatie tot ontwikkeling komen dat een positieve invloed heeft op de stabiliteit van de dam (erosiebestendigheid). In de voorliggende analyses is hier geen rekening mee gehouden.

Een verlaging van de dammen met een initieel kruinniveau rond de gemiddelde waterstand is, zoals eerder aangegeven, echter geen bedreiging voor de beoogde functionaliteit van de buitenrand. Zolang het niveau van de kruin boven NAP -0,9 m ligt, is er *vanuit dit oogpunt* geen directe aanleiding om onderhoud te plegen. Het wordt een ander verhaal als de wens bestaat om een kruin rond zomerpeil gedurende een lange periode in stand te houden. In dat geval is naar verwachting regulier onderhoud noodzakelijk. Zolang dit niet strikt noodzakelijk is voor het functioneren van de dammen wordt tussentijds onderhoud niet wenselijk geacht.

Anders dan de vervorming van de kruin van de onderwaterdammen (met een initieel 'te' hoge kruin) zullen er naar verwachting geen grote verliezen optreden ten gevolge van dwarstransport; zoals bijvoorbeeld verlies naar dieper water. Door het relatief flauwe buitentalud (1 op 20) zal het dwarsprofiel naar verwachting zonder structurele verliezen kunnen vervormen tot een stabiele profielvorm. De steilere opzet van het profiel van 1 op 20 naar 1 op 7 onder het niveau NAP -2,5 m zal niet resulteren in grote extra verliezen omdat dit deel van het profiel onder de zogenaamde closure depth ligt en daarom buiten het bereik van de golfwerking ligt. De gemiddelde profielhelling is bovendien nog steeds ca. 1 op 18, en ook daarmee voldoende flauw voor de vorming van een evenwichtsprofielvorm.

##### 5.1.4.2 Verliezen in langsrichting

Ten aanzien van structurele verliezen (onderhoudsbehoefte) bestaat er – zeker in verhouding tot de dwarsverliezen – een relatief groot risico op verliezen ten gevolge van langstransportgradiënten. Gradiënten in het (netto) langstransport kunnen zorgen voor structurele erosie, waardoor – op termijn – de functionaliteit van de zanddammen op negatieve wijze kan worden beïnvloed. Vanwege de beperkte kennis over de lange-termijn ontwikkeling van zandige oevers in het Markermeer gaat het maken van een inschatting van de onderhoudsbehoefte gepaard met relatief grote onzekerheidsmarges.

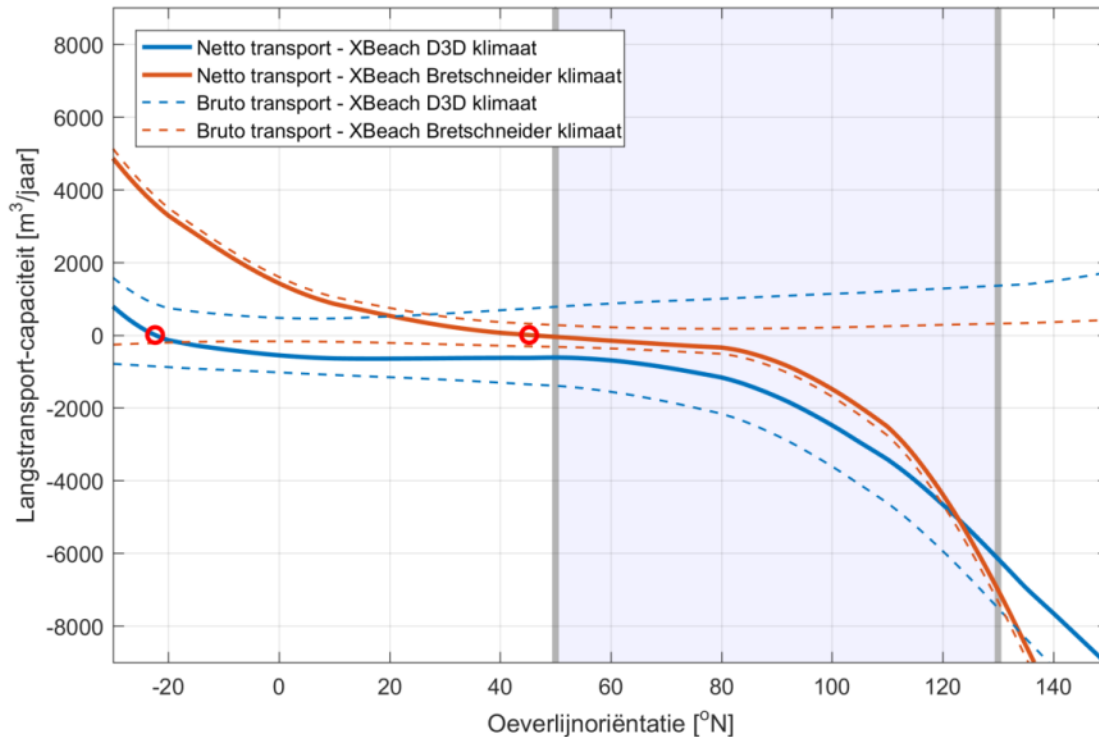
Voor de oostelijke buitenrand van de Marker Wadden (module D) geldt dat deze in relatieve zin 'in de luwte' ligt ten opzichte van de overheersende (en maatgevende) windrichtingen. Dit betekent echter niet dat er geen langstransporten te verwachten zijn langs de oostelijke randen. Er zal altijd op enige wijze sprake zijn van golf- en stromingsbelasting, en bovendien is de oriëntatie van de oostelijke randen sterk variabel waardoor (ook) grote gradiënten ontstaan in het optredende langstransport. Door de variaties in oriëntatie van de oostelijke rand zullen zandverliezen naar verwachting niet alleen nabij de uiteinden van de randen plaatsvinden, maar ook langs het tracé.

Op basis van eerdere analyses van langstransporten (zie ontwerpnota *MW-UO-WP-PW04*) is ingeschat dat er aan de oostzijde rekeningen gehouden moet worden met een netto langstransport variërend tussen 0 en 3.000 m<sup>3</sup>/jaar (in noordwaartse richting) voor oriëntaties tussen NO en O; dit zijn oriëntaties die voor het grootste deel van de oostelijke buitenrand van module D van toepassing zijn.

Voor oeverlijnorientaties waarbij de kustnormaal meer zuidoostelijk is gericht (tussen O en ZO) wordt de zuidelijke component van het golfklimaat dominant, waardoor het noordwaarts gerichte langstransport oploopt tot ca. 7.000 m<sup>3</sup>/jaar. In het ontwerp van module D heeft enkel de zuidpunt van eiland D3 een dergelijke oeverlijnorientatie.

In Figuur 20 zijn, ter onderbouwing, de zogenaamde S-Phi curves gepresenteerd voor de oeverlijniëoriëntaties die relevant zijn voor de oostelijke buitenrand; voor zowel het Brettschneider golfklimaat als voor het Delft3D golfklimaat. Een nadere toelichting bij de gehanteerde analyse methodiek is gegeven in sectie 5.1.2 van de vorige ontwerpnota (*MW-UO-WP-OW04*). Het figuur toont voor elke willekeurige oeverlijniëoriëntatie de (met XBeach) berekende netto en bruto langstransporten voor de twee verschillende golfklimaten.

Opgemerkt wordt dat de onzekerheidsmarge rondom de berekende waarden vrij groot is. De methode met S-Phi curves gaat bijvoorbeeld uit van een in langsricting uniforme ligging van de bodemcontouren (rechte oeverlijn en rechte vooroever) en houdt ook geen rekening met luwtewerking van verderop gelegen objecten die de golfwerking kunnen beïnvloeden (zoals de primaire luwteranden, NW en ZW).



Figuur 20 S-Phi curves (bruto en netto langstransport – positief is zuidwaarts – als functie van oeverlijniëoriëntatie) op basis van XBeach berekeningen en twee verschillende golfklimaten. De rode markers geven de evenwichtsoriëntatie(s) van de oeverlijn aan, en het vlak tussen de grijze lijnen geeft de range aan van de oeverlijniëoriëntaties aan de oostelijke buitenrand van de Marker Wadden (50° tot 130°).

Figuur 20 laat zien dat er – in tegenstelling tot bij de ZW-strandrand – een vrij breed bereik aan oriëntaties is waarbij het morfologische systeem ‘min of meer’ in evenwicht is. Voor beide golfklimaten geldt dat het netto transport voor oriëntaties tussen N en O beperkt blijft tot ca. 0 – 3.000 m<sup>3</sup>/jaar. Het Delft3D-klimaat voorspelt binnen deze gehele range een netto noordwaarts transport. Het Brettschneider-klimaat voorspelt een noordwaarts gericht transport voor oriëntaties vanaf 45°N; bij noordelijke oriëntatie is er sprake van beperkt zuidwaarts/oostwaarts transport.

In het ontwerp van de oostelijke buitenrand van module D varieert de oriëntatie van de zanddammen grofstoffelijk tussen ca. 50°N en 100°N. Aan de zuidkant van eiland D3 draait de zandrand iets verder door tot ongeveer een zuidwestelijke oriëntatie (130°N). Het relevante bereik van variërende oriëntaties is in het figuur aangeduid met het vlak tussen de grijze lijnen. Binnen deze range varieert het berekende bruto langstransport in het uiterste geval tussen 1.000 m<sup>3</sup>/jaar (zuidwaarts) en 7.000 m<sup>3</sup>/jaar (noordwaarts); met netto noordwaarts gericht transport.

Gemiddeld genomen zal er langs het grootste deel van de oostelijke buitenrand sprake zijn van een transportcapaciteit van 0 – 2.000 m<sup>3</sup>/jaar.

Bovenstaande inschattingen van de langstransporten zijn gebaseerd op een conservatief uitgangspunt voor de korrelde diameter:  $D_{50} = 200$   $\mu$ m. Het langstransport is ca. 30% kleiner voor  $D_{50} = 350$   $\mu$ m.



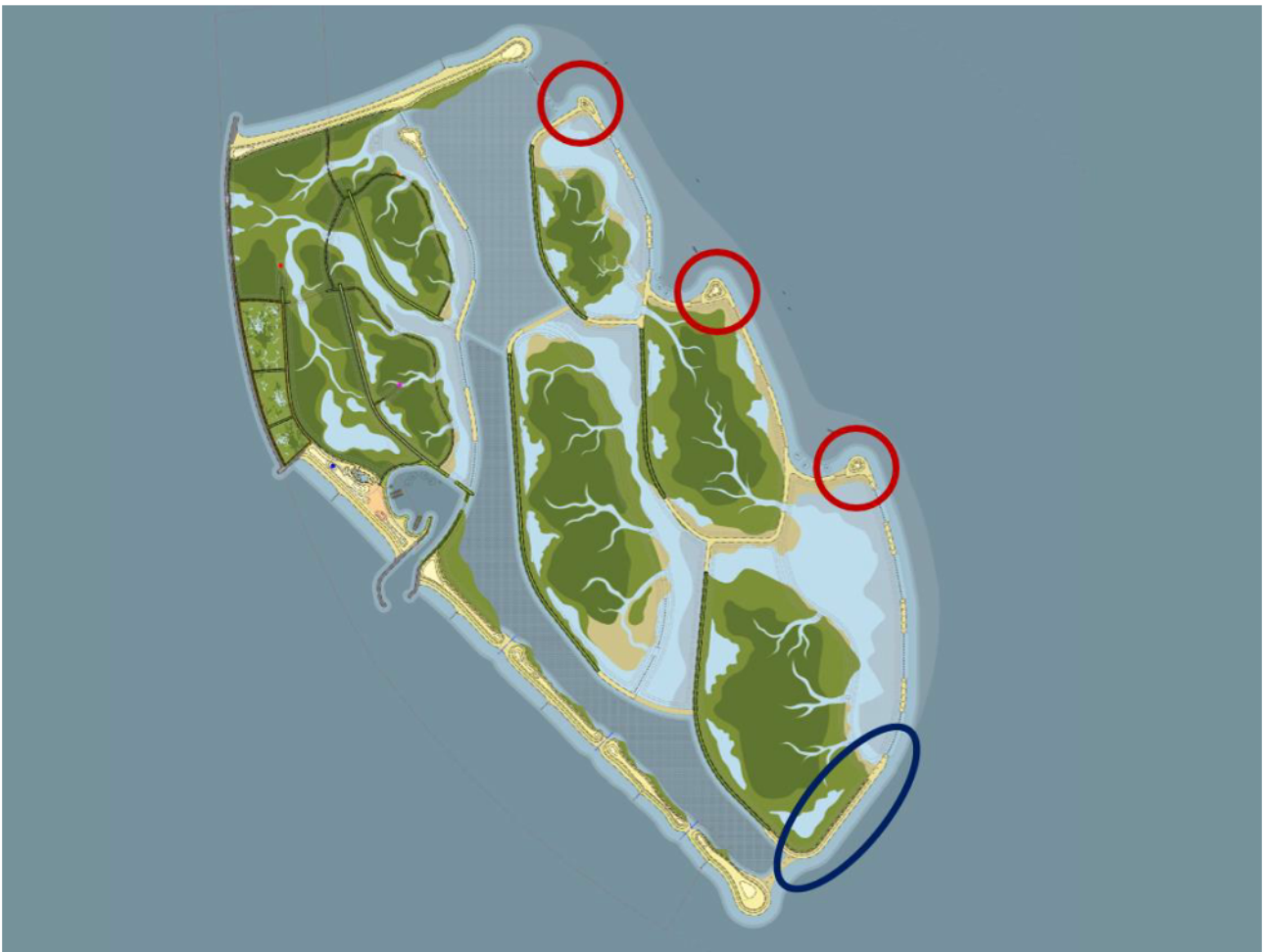
Zandverliezen in langsrichting zullen enkel optreden als er sprake is van gradiënten in het optredende transport. Dit kan het gevolg zijn van ofwel variaties in het golfveld ofwel variaties in de oeverlijnoriëntatie. Met name dit laatste aspect is relevant langs de oostelijke buitenrand. Het kwantificeren van de onderhoudsbehoefte voor een dergelijke complexe situatie is niet eenvoudig. Gezien alle onzekerheden wordt voorgesteld om voor het totale netto zandverlies (t.g.v. langstransportgradiënten) aan de oostzijde rekening te houden met een totaalverlies van dezelfde orde van grootte als het verlies bij de strandranden: orde grootte 100.000 m<sup>3</sup> voor een periode van 10 á 20 jaar (5.000 tot 10.000 m<sup>3</sup> per jaar); zie voorgaande ontwerpnota.

Ten aanzien van de onderhoudsbehoefte langs de oostelijke buitenrand zijn een aantal locaties uitgelicht waar naar verwachting de grootste structurele verliezen zullen optreden. Het gaat hierbij om secties met relatief scherpe overgangen in de oriëntatie van deze zandrand.

Aan de oostkant van module D is er op een viertal locaties sprake van een dergelijke erosie-hot-spot: de noordoostelijke hoekpunten van de drie D-eilanden, en de meest zuidelijke sectie van de oostrand van eiland D3, zie Figuur 21.

In sectie 5.2 is nader ingegaan op de onderhoudsbehoefte van de erosiegevoelige knikpunten bij de noordoostpunten van de drie eilanden. In deze sectie is ook gepresenteerd welke ontwerp oplossing is toegepast om de te verwachten erosie te kunnen opvangen op deze locaties.

In sectie 5.3 is meer aandacht besteed aan de relatief kwetsbare zuidpunt van eiland D3. Ook voor deze erosiegevoelige locatie is een ontwerp oplossing toegepast om het risico op instabiliteit van de zandrand te minimaliseren.



Figuur 21 Overzichtstekening van het (reeds aangepaste) ontwerp van de Marker Wadden; inclusief een aanduiding van de belangrijkste locaties waar naar verwachting erosie zal optreden ten gevolge van langstransportgradiënten.

Op basis van bovenstaande analyses is een zo goed mogelijke inschatting gemaakt van het morfologische gedrag van de oostelijke buitenrand en de hieruit voortvloeiende onderhoudsbehoefte. Desondanks moet geconcludeerd worden dat er op dit punt sprake is van een grote onzekerheid. Het gedrag en de onderhoudsbehoefte zijn lastig te voorspellen, en er zijn weinig vergelijkbare situaties waaruit op dit moment lering kan worden getrokken. In het ontwerp is reeds rekening gehouden met verliezen door middel van een robuuste vormgeving van de zandige dammen; desondanks is het sterk aan te bevelen om het morfologische gedrag langs deze rand frequent te monitoren, en op basis hiervan de inschattingen van de onderhoudsbehoefte waar nodig bij te stellen.

Mocht de tijdshorizon waarbij een ingreep nodig is onverhoopt veel korter blijken te zijn dan in de analyses is ingeschat, dan zijn dit enkele beheersmaatregelen waaraan (op termijn) gedacht kan worden:

- Herverdeling van zand;
- Suppleren van extra zand;
- Toevoegen van extra houten palenrijen langs de buitenrand;
- Het lokaal erosiebestendig maken van de zandige oeverlijn (bijv. toepassing van stortsteen of grind/keien).

Het type maatregel hangt sterk af van de waargenomen morfologische ontwikkeling na realisatie van de zachte rand. Bij een zeer geleidelijk verlies van zand uit de oeversectie kan een periodieke ingreep (suppleren of herverdelen) volstaan, maar bij (onverwacht) snelle negatieve ontwikkelingen zijn maatregelen in de vorm van constructies zoals extra palenrijen of zelfs steenbekleding.

#### 5.1.4.3 Conclusies onderhoudsbehoefte

Het is zeer lastig gebleken om een realistische inschatting te maken van de onderhoudsbehoefte voor de zachte randen aan de achterzijde van de Marker Wadden. Het betreft een zeer complexe situatie in de luwte van de moerasedeilanden, en er zijn weinig praktijkgegevens beschikbaar over het morfologische gedrag van dergelijke zanddammen.

Enkele bevindingen op basis van langstransport berekeningen:

- Het netto langstransport voor het grootste deel van de oostelijke buitenrand is ingeschat in de range van 0 tot 3.000 m<sup>3</sup>/jaar (in noordelijke richting). Uitgegaan kan worden van een netto noordwaarts transport van gemiddeld 2.000 m<sup>3</sup>/jaar.
- Aan de zuidoostkant van eiland D3 wordt grotere langstransporten verwacht ten gevolge van een lokaal meer zuidoostelijke oriëntatie van de zandrand. Het (bruto) noordwaarts transport kan hier oplopen tot ca. 7.000 m<sup>3</sup>/jaar. Hier is bovendien zeer beperkt bruto zuidwaarts transport te verwachten (bruto = netto).
- Bovengenoemde langstransportschattingen zijn gebaseerd op een zeer fijne korreldiameter van 200 µm (=conservatief). De waarden zijn ca. 30% kleiner bij toepassing van een grovere korreldiameter rond de 350 µm.

De toekomstige onderhoudsbehoefte voor de zachte randen aan de luwtezijde is een *risicopunt*. Waar nodig zal moeten worden bijgestuurd in de periode na aanleg. In de ontwerpprofielen van de buitenrand is in theorie een zandoverschot aanwezig van 40 – 80 m<sup>3</sup>/m om zandverliezen op te vangen. Eventuele lokale extra verliezen zullen mogelijkerwijs middels periodiek onderhoud moeten worden opgevangen; met name op enkele specifieke erosielocaties.

Aanbevolen wordt om het morfologische gedrag van de achterzijde actief te monitoren na aanleg, en om gedurende deze periode – indien nodig – bij te sturen (suppleren of vastleggen).

De onderhoudsbehoefte van de erosiegevoelige knikpunten bij de noordoostpunten van de drie eilanden en ter plaatse van de relatief kwetsbare zuidpunt van eiland D3 komen verderop nog uitgebreider aan de orde.

### **5.1.5 Positionering van palenrijen**

Op de onderwaterdammen aan de achterzijde (oostkant) van de moeraseilanden zijn palenrijen voorzien op de kruin. De palenrijen staan in langsrichting op de kruin van deze onderwaterdammen, en ze hebben als primair doel om het natuurlijke systeem te verrijken: rustplaats voor vogels, substraat voor schelpdieren, etc. Bovendien zorgen de palenrijen voor afwisseling in het landschap (strakke belijning) en beperken ze de invaarbaarheid van het moerasgebied.

Opgemerkt wordt dat de palenrijen *niet* zijn geplaatst met als doel om van invloed te zijn op ofwel de morfologische stabiliteit van de dammen ofwel de mate van golfdoordringing. Naar verwachting is het effect van een enkele palenrij met relatief grote tussenruimte op deze processen uiterst beperkt. Mocht dit in de praktijk anders blijken te zijn, dan is dat een positieve extra bijkomstigheid.

Zie de ontwerptekeningen voor nadere specificaties.

### **5.1.6 Geotechnische aspecten**

*Zie rapportage 'Zettings- en stabiliteitsbeschouwing' (13084-04-R02) en de ontwerpnota over het ontwerp van de zachte randen van modules A, B en C (MW-UO-WP-OW04).*



## 5.2 Ontwerpdetail: zandbuffers langs oostelijke buitenrand

Ten aanzien van het ontwerp van de zachte randen van module D zijn een aantal ontwerpdetails uitgelicht. In deze sectie is nader ingegaan op de zandbuffers die zijn voorzien langs de oostelijke buitenrand. Achtereenvolgens komen in dit kader de volgende onderwerpen aan bod:

- Onderhoudsbehoefte van oostelijke buitenrand
- Risico: morfologische instabiliteit van knikpunten in buitenrand
- Ontwerpoplossing: zandbuffers ter plaatse van knikpunten

De sectie heeft specifiek betrekking op de ontwerpdetails die zijn aangeduid in Figuur 22 (rode cirkels + detailweergave). De overgang van de ZW-rand op de zuidostrand van module D komt in de volgende sectie aan de orde.



Figuur 22 Overzichtstekening van het ontwerp van de Marker Wadden; inclusief een detailweergave van het ontwerp van de overgangszones tussen de geschakelde moeras-eilanden van module D, inclusief zandige koppen.

### 5.2.1 Onderhoudsbehoefte van oostelijke buitenrand

Als onderdeel van de ontwerpbeschuwing is in sectie 5.1.3.2 aandacht besteed aan de morfologische stabiliteit van de oostelijke zandrand van module D. In dit kader is een inschatting gemaakt van de optredende langstransporten aan de oostkant ten gevolge van golfwerking. Naar verwachting zal het langtransport primair noordwaarts gericht zijn, waarbij rekening gehouden moeten worden met transporten van ca. 0 – 3.000 m<sup>3</sup>/jaar voor de damsecties met een oriëntatie in de range tussen NNO en O. Een uitzondering hierop is de zuidpunt van eiland D3, waar de oriëntatie bijdraait naar het zuidoosten zodat de transportcapaciteit toeneemt (zie sectie 5.3).

Langs het grootste deel van de oostrand (= achterzijde van eilanden D1, D2 en een groot deel van D3) is sprake van een oriëntatie in het noordoostelijke kwadrant. Een belangrijk kenmerk van dit tracé is dat de



zandige rand nabij de noordoostelijke punt van elk eiland 'inspringt'. Deze geschakelde ligging van de eilanden resulteert in een soort zaagtandverloop, met een (bijna) haakse overgang in de oriëntatie van de buitenrand. Op deze scherpe overgangen (zie Figuur 22) zullen de grootste gradiënten optreden in het langtransport, met potentieel structurele erosie tot gevolg.

Naar verwachting zullen de noordoostelijke hoekpunten van de drie eiland primair 'gevoed' worden door het (berekende) netto noordwaarts gerichte zandtransport langs de oostelijk georiënteerde buitenrand ten zuiden hiervan. Hierdoor bestaat er een kans dat er een soort zandspit ontstaat (haakvorming) bij het knikpunt. Echter, langs de noordelijk georiënteerde delen van de buitenrand ('om de hoek') is het transport westelijk gericht; dus van het knikpunt af en daarmee een verliespost voor dit punt. Of deze balans in praktijk positief of negatief zal uitvallen is lastig te voorspellen, maar er kan wel geconstateerd worden dat de drie knikpunten bij de eilanden D1, D2 en D3 potentieel kwetsbare punten zijn voor structurele erosie. Dit is nog in grotere mate het geval als blijkt dat er in werkelijkheid meer events (stormen) met zuidelijk gericht transport optreden dan nu voorzien met de geschematiseerde golfklimaten. Bij zuidwaarts transport is de mate van erosie op de hoekpunten naar verwachting groter.

Op basis van Figuur 20 in sectie 5.1.4 is ingeschat dat ter plaatse van de knikpunten in de buitenrand rekening gehouden moet worden met een (potentieel) structureel verlies van ca. 500 – 1.000 m<sup>3</sup>/jaar. Als het potentiële verlies niet voldoende wordt gecompenseerd door een zandtoevoer vanuit naastgelegen gebieden, dan is ofwel regulier onderhoud ofwel een fysieke maatregel tegen erosie nodig.

### 5.2.2 Risico: functieverlies van zandrand ter plaatse van de knikpunten

Uit de analyses van de langtransporten langs de oostelijke buitenrand van module D blijkt een risico te bestaan dat morfologische instabiliteit optreedt ter plaatse van de knikpunten in de buitenrand (zie de rode cirkels in Figuur 22). Rondom deze knikpunten kunnen relatief grote langtransportgradiënten ontstaan die resulteren in erosie van de buitenrand. In het geval van *structurele* erosie komt de functionaliteit van de buitenrand op termijn in gevaar.

### 5.2.3 Ontwerpoplossing: zandbuffers ter plaatse van knikpunten

Om het risico te minimaliseren dat morfologische instabiliteit optreedt bij de knikpunten langs de oostelijke buitenrand zijn in het ontwerp enkele beheersmaatregelen getroffen. Ter plaatse van de knikpunten zijn in het ontwerp zandbuffers geplaatst die structurele erosie op deze kwetsbare stukken van de zandrand kunnen opvangen. Een voorbeeld van één van de drie zandbuffers is uitgelicht in het kader in Figuur 22.

Figuur 22 laat zien dat de zandbuffers dusdanig zijn vormgegeven dat er een gekromde baai ontstaat ten westen van de buffers. De relatief hoog gelegen zandbuffers fungeren als 'ophangpunten' in het morfologische systeem, en benadrukken hiermee ook direct de buitenbelijning van module D van de Marker Wadden. Doordat ook de zandranden langs de naastgelegen baaien ruim boven water uitkomen, wordt bovendien een aantrekkelijke rustplaats gecreëerd voor ofwel natuur ofwel recreatieve doeleinden (nadere te bepalen).

In relatie tot de onderhoudsbehoefte van de zandige oostrand wordt opgemerkt dat de zandbuffers op de knikpunten feitelijk een tweeledig doel dienen. Naast de (veel) robuustere vormgeving van de knikpunten zelf waarmee lokaal structurele erosie kan worden opgevangen, zorgen de uitstekende buffers ook voor extra luwte bij de (teruggesprongen) delen van de buitenrand ten noorden ervan: een indirecte onderhoudsbuffer.

In het ontwerp is ter plaatse van de drie zandbuffers een (extra) zandvolume voorzien dat (lokaal) resulteert in zowel een hogere (boven NAP +1 m) als een bredere (enkele tientallen meters boven water) buitenrand.

### 5.3 Ontwerpdetail: zuidpunt van moeraseiland D3

Ten aanzien van het ontwerp van de zachte randen van module D zijn een aantal ontwerpdetails uitgelicht. In deze sectie is nader ingegaan op de relatie tussen de zuidwestelijke strandrand (ZW-rand) en moeraseilanden in module D. Achtereenvolgens komen in dit kader de volgende onderwerpen aan bod:

- Bescherming van de zuidpunt van module D
- Risico: morfologische instabiliteit van de zuidelijke punt van module D
- Ontwerpoplossing: aansluiting op (verlengde) ZW-rand + hogere en bredere kruin zuidoostelijke zandrand

De sectie heeft specifiek betrekking op de ontwerpdetails die zijn aangeduid in Figuur 23 (rode cirkel + detailweergave).



Figuur 23 Overzichtstekening van het ontwerp van de Marker Wadden; inclusief een detailweergave van het ontwerp van de zuidpunt van module D en het uiteinde van de zuidweststrand.

#### 5.3.1 Bescherming van de zuidpunt van module D

Om te zorgen dat de moeraseilanden van module D voldoende afgeschermd liggen van de dominante golfrichtingen is de zuidwestelijk georiënteerde strandrand (ZW-rand) met ca. 600 m verlengd, ten opzichte van het ontwerp van modules A, B en C (zie nota *MW-UO-WP-OW04*). In Figuur 23 is ter vergelijking de indicatieve ligging van het voormalige uiteinde van de strandrand ingetekend.

De verlenging van de ZW-rand betreft een voortzetting van het voorgaande ontwerp van de ZW-rand. De ontwerpprofielen inclusief slijtlaag worden over een langere strekking doorgetrokken, en de onderhoudsbuffer op de (voormalige) kop wordt wederom aan het uiteinde van de ZW-rand gepositioneerd.



Uit Figuur 23 blijkt duidelijk dat een verlenging van de primaire luwtedam noodzakelijk is om directe golfaanval vanuit zuidwestelijke richtingen op eiland D3 te voorkomen. De westelijke zandranden van de moerasedammen (*secundaire* luwtedammen) zijn namelijk niet gedimensioneerd op een dergelijke golfbelasting.

Figuur 23 toont dat de verlenging van de ZW-rand, die dus gepaard samenhangt met het ontwerp van module D, zorgt dat module D grotendeels in de luwte komt te liggen van de strandrand. Het gedeelte van module D dat in het nieuwe ontwerp nog het meest is blootgesteld aan de dominante golfrichtingen (rondom ZW) is nu alleen nog de zuidpunt van eiland D3. De zuidpunt is bijvoorbeeld wel afgeschermd van golfaanval vanuit het zuidwesten, maar is wel deels blootgesteld aan (minder frequent voorkomende) golven vanuit het zuiden.

Wat betreft de mate van verlenging van de ZW-rand is in het ontwerp een balans gezocht tussen de hoeveelheid luwte dat geboden wordt en de extra kosten die verbonden zijn aan een verdere verlenging. Een verdere verlenging van de dam zal de zuidpunt van eiland D3 wellicht een nog iets beter bescherming tegen zuidelijke golfaanval, maar dan is er vervolgens weer een golfcomponent uit meer zuidoostelijke richting waarvoor bekeken kan worden of een luwtemaatregel nodig is, etc. etc.

Op dit punt is uiteindelijk een afgewogen ontwerpkeuze gemaakt; resulterend in het ontwerp zoals weergegeven in Figuur 23. Met dit ontwerp worden de meest dominante en maatgevende golfcondities opgevangen door de primaire luwtedam, en zal de resterende golfbelasting ter plaatse van de buitenrand van module D naar verwachting relatief beperkt zijn.

Een belangrijk aandachtspunt in het ontwerp is de lange-termijn ontwikkeling van de zuidpunt van eiland D3. Ondanks dat de meest dominante golfcondities worden afgeschermd door de luwtedam, zullen er op deze locatie morfologische veranderingen optreden ten gevolge van langstransport. Op basis van de berekende S-Phi curves in Figuur 20 (zie sectie 5.1.3.2) kan worden vastgesteld dat er langs het zuidelijke deel van de oostrand een noordoostwaarts gericht netto langstransport optreedt van ca. 7.000 m<sup>3</sup>/jaar (uitgaande van een gemiddelde oeverlijniëoriëntatie van 130°N). Dit transport kan zorgen voor structurele verliezen aan de zuidkant van eiland D3; wat kan resulteren in morfologische instabiliteit van de buitenrand van module D, en dus het falen van de opsluitrand.

Het belang van een goed functionerende buitenrand aan de zuidkant van eiland D3 is extra groot omdat de zandige dam op deze locatie de enige barrière vormt tussen 'diep water' (bodemniveau rond NAP -4 m) en 'plas-dras' (bodemniveau rond NAP 0,2 m). Op de meeste andere locaties aan de oostzijde van de Marker Wadden is een tussenliggend gebied met 'beschut ondiep water' aanwezig, waardoor het moeras feitelijk beschermd wordt door twee zanddammen (tussen 'plas-dras' en 'ondiep water', en tussen 'ondiep water' en 'diep water'). Een 'doorbraak' van de buitenrand aan de zuidkant van eiland D3 resulteert hierdoor direct in een situatie waarbij het holocene ophoogmateriaal van het moerasedam kan uitspoelen.

### 5.3.2 Risico: functieverlies van zandrand ter plaatse van zuidelijke punt eiland D3

De zuidelijke punt van eiland D3 in module D wordt gezien als een relatief kwetsbaar punt langs de oostelijke buitenrand van de Marker Wadden. Golfwerking uit zuidelijke richtingen zorgt voor een noordwaarts transport waardoor bij de zuidpunt van het moerasedam structurele verliezen kunnen optreden. Een risico is dat hierdoor de functionaliteit van de buitenrand van module D (op termijn) in gevaar komt.

### 5.3.3 Ontwerpoplossing: aansluiting op zuidwestelijke strandrand

Om het genoemde risico te minimaliseren en de kans op morfologische instabiliteit bij de zuidpunt van moerasedam D3 zo veel mogelijk te reduceren, zijn in het ontwerp enkele beheersmaatregelen getroffen. De eerste maatregel is dat de zandrand rondom de zuidpunt en langs het zuidoostelijk georiënteerde deel van de buitenrand van eiland D3 robuuster is vormgegeven dan de meer noordelijk gelegen delen van de oostelijke rand. In het DO-ontwerp van de zandrand aan de zuidkant van module D is uitgegaan van een kruinniveau op NAP +1m (in plaats van afwisselend NAP -0,2 m en NAP -0,9 m), in combinatie met een kruinbreedte van ca. 4 m en een buitentalud van 1 op 20.

Op basis van de ontwerpanalyses over de langstransporten en de onderhoudsinschattingen is geconcludeerd dat een kruinbreedte van 4 m (zoals *ingetekend in het DO-ontwerp, d.d. 9 maart 2017*) niet volstaat om de functionaliteit van de zachte rand nabij de zuidpunt voor langere tijd te kunnen borgen.

Aanbevolen wordt om een kruinbreedte te hanteren van minimaal 15 m langs de rechte secties van de dam, en een kruinbreedte van gemiddeld 25 m rondom de gekromde (en meest kwetsbare) zuidpunt van eiland D3. Deze verbreding dient bij voorkeur aan de binnenzijde van de kruin in het DO-ontwerp te worden toegepast, zodat de buitenbelijning van de oostrand gelijk blijft.

De voorgestelde ontwerpwijziging is schetsmatig ingetekend in Figuur 24.



Figuur 24 Detailweergave van zuidpunt van moeraseiland D3, met voorgestelde ontwerpwijziging (t.o.v. DO-tekening) om met robuustere vormgeving de zachte zuidostrand beter bestand te maken tegen (structurele) erosie en functieverlies.

De omvang van de voorgestelde ontwerpwijziging is gebaseerd op een aanvullende analyse van de berekende langstransporten voor de zuidoostkant van de Marker Wadden; zie ook sectie 5.1.4 en Figuur 20.

Aan de zuidoostkant van eiland D3 worden grotere langstransporten verwacht ten gevolge van een lokaal meer zuidoostelijke oriëntatie van de zandrand. Het (bruto) noordwaarts transport kan hier oplopen tot ca. 7.000 m<sup>3</sup>/jaar; uitgaande van een relatief fijne korrelde diameter van 200 µ. Een afname van dit langstransport in de tijd is hier niet te verwachten omdat de oeverlijn op deze locatie niet kan/mag bijdraaien. De gradiënten in langstransport ten gevolge van variaties in de oeverlijnoriëntaties (rondom de zuidpunt) zijn ingeschat op ca. 1.000 – 3.000 m<sup>3</sup>/jaar, over een oeverlengte van ca. 150 á 200 m.

De werkelijk te verwachten verliezen rondom de zuidpunt liggen naar verwachten eerder rond de ondergrens van ca. 1.000 m<sup>3</sup>/jaar; omdat de onderhoudsbuffer van de ZW-rand voor aanvoer van zand kan zorgen (zie verderop). Een verlies van 1.000 m<sup>3</sup>/jaar rondom de kop staat gelijk aan een gemiddeld verlies van ca. 6 m<sup>3</sup>/m/jaar (= 60 m<sup>3</sup>/m per 10 jaar). Uitgangspunt hierbij is dat er geen structurele verliezen optreden in dwarsrichting, vanwege de flauwe helling van het buitentalud (1 op 20).



Het benodigde (extra) zandvolume in de morfologisch actieve zone (boven NAP -1) van 60 m<sup>3</sup>/m voor 10 jaar is equivalent aan een extra benodigde kruinbreedte van ca. 20 m (rekening houdend met de initieel flauwe helling van het buitentalud). De totaal benodigde kruinbreedte komt daarmee uit op 5 + 20 = 25 m.

Voor de rechte secties van de zandige buitenrand geldt dat de gradiënten in langstransport een stuk kleiner zijn. Hierdoor volstaat een kruinbreedte van minimaal ca. 15 m.

Ten opzichte van het DO-ontwerp is een extra zandvolume van ca. 50 m<sup>3</sup>/m nodig om de kruin te verbreden tot een breedte van ca. 15 m, langs de rechte secties van de zuidoost-dam. Langs de gekromde zuidpunt is een extra zandvolume nodig van ca. 100 m<sup>3</sup>/m, uitgaande van een gemiddelde kruinbreedte van ca. 25 m. In totaal is er langs het hoge deel van de zuidooststrand een extra zandvolume van ca. 40.000 m<sup>3</sup> nodig ten opzichte van het DO-ontwerp.

De belangrijkste kenmerken van de ontwerpprofielen (= beoogde eindbeeld exclusief zettingscompensatie) aan de zuid(oost)kant van module D:

- Zandige buitenrand oostzijde – zuidpunt eiland D3 (excl. zettingscompensatie)
  - Kruinniveau: NAP +1,0 m
  - Kruinbreedte:
    - Conform DO-tekening ca. 4 m (conclusie analyses: te smal)
    - Langs rechte secties: ca. 15 m (minimaal); (voorstel ontwerp aanpassing t.o.v. DO)
    - Rondom gekromde zuidpunt ca. 25 m (gemiddeld); (voorstel ontwerp aanpassing t.o.v. DO)
  - Taludhelling binnentalud: ca. 1 op 7;
  - Taludhelling buitentalud: ca. 1 op 20;
  - Zo grof mogelijk zand toepassen rond de waterlijn bij de zuidpunt van eiland D3.

#### Ontwerpafwijking t.o.v. DO-ontwerp:

De zuidooststrand van eiland D3 heeft langs de rechte secties een kruinbreedte van minimaal 15 m, op het niveau NAP +1 m.

De gekromde zuidpunt van eiland D3 heeft in de eindsituatie een kruinbreedte van gemiddeld 25 m, op het niveau NAP +1 m.

Een tweede belangrijke maatregel om (op de langere termijn) structurele verliezen te kunnen opvangen aan de zuidkant van eiland D3 is dat er in het ontwerp voor is gekozen om een fysieke verbinding te realiseren tussen het uiteinde van de zuidwestelijke strandrand (ZW-rand) en de zuidpunt van het moerasediland. De verbinding tussen beide ontwerp onderdelen is uitgelicht in het kader in Figuur 23. De verbinding heeft primair betrekking op het onderwatertalud van beide zandlichamen; het kruinniveau van de verbindende dam ligt rond het niveau van de gemiddelde waterstand (zomerpeil).

Het beoogde doel van de verbinding tussen de ZW-rand en het moerasediland is dat (het voorheen minder efficiënte deel van) de onderhoudsbuffer op de kop van de ZW-rand op een efficiënte wijze het kwetsbare deel van de buitenrand van module D kan 'voeden' door het noordwaarts gerichte langstransport. Als er geen verbinding zou zijn tussen beide zanddammen, dan zou ditzelfde zandvolume uiteindelijk op de bodem van het Markermeer terechtkomen (NAP -4 m). In dat geval levert het zand geen positieve bijdrage meer aan de stabiliteit van de zanddammen. Door het onderwatertalud te laten doorlopen van de onderhoudsbuffer op de kop naar de zandrand langs het moeras wordt het zand langs het talud getransporteerd in plaats van naar dieper water.

De verbinding werkt overigens ook de andere kant op. Bij (sporadisch voorkomend) zuidwaarts gericht transport langs de oostelijke buitenrand kan de moerasrand ook sediment 'teruggeven' aan de onderhoudsbuffer. Op de langere termijn zal de overgang tussen beide zandranden steeds meer stroomlijnen zodat er een natuurlijk dynamisch evenwicht ontstaat. De tijdschaal waarop dit optreedt is lastig te voorspellen.

## 5.4 Ontwerpdetail: overige aandachtspunten

Ten aanzien van het ontwerp van de zachte randen van module D zijn een aantal ontwerpdetails uitgelicht. In deze sectie is nader ingegaan op een tweetal overige ontwerpzaken die extra aandacht behoeven. Achtereenvolgens komen de volgende onderwerpen aan bod:

- De zandrand tussen 'plas-dras' en 'diep water' ter plaatse van eiland D2
- Het relatief grote gebied met 'beschut ondiep water' ter plaatse van eiland D3

De sectie heeft specifiek betrekking op de ontwerpdetails die zijn aangeduid in Figuur 25 (rode cirkels).



Figuur 25 Overzichtstekening van het ontwerp van de Marker Wadden; met aanduiding van twee aandachtsgebieden in het ontwerp van module D: (I) zandrand tussen 'plas-dras' en 'diep water' zonder tussenliggend 'beschut ondiep', (II) relatief groot gebied met 'beschut ondiep'.

### 5.4.1 Zandrand tussen 'plas-dras' en 'diep water' (eiland D2)

Het ontwerp van de zandige oostrand van module D is reeds in detail beschouwd in secties 3.3 en 5.1.3. Bij de ontwerpbeschoouwingen is voor het grootste deel van de oostelijke buitenrand uitgegaan van een zandrand met een afwisselend kruinniveau: NAP -0,2 m en NAP -0,9 m. Dit type oostrand wordt uiteindelijk toegepast voor de achterzijden van moeraseilanden D1 en D3.

Voor eiland D2 is gekozen voor een iets afwijkend ontwerpprofiel met een hoger kruinniveau. De belangrijkste reden voor de realisatie van een hogere dam aan de achterkant van het middelste moeraseiland is dat er een directe overgang tussen het plas-dras gebied en het (diepe) buitenwater van het Markermeer is voorzien, zonder een tussenliggend gebied met beschermt ondiep water. Bij alle andere moeraseilanden is sprake van een stapsgewijze overgang van plas-dras naar beschermt ondiep water naar diep water (met tweemaal een tussenliggende compartimenteringsdam). Bij eiland D2 is slechts één opsluitdam aanwezig om het holoceen materiaal op te sluiten in het moerascompartiment. Om de kans op uitspoelen van holoceen materiaal te



minimaliseren, en tegelijkertijd wel voldoende dynamiek in het systeem toe te laten, is ervoor gekozen om de zandrand ca. 50 cm á 70 cm hoger aan te leggen.

De zandige oostrand van eiland D2 krijgt door de ontwerpaanpassing een kruinniveau dat afwisselend op NAP -0,4 m en NAP +0,5 m ligt (in plaats van NAP -0,9 m en NAP -0,2 m). Ter plaatse van de verlagingen in de zandrand (rond NAP -0,4 m) is uitwisseling van water mogelijk tussen het Markermeer en het achterliggende moerasgebied, en wordt het holoceen materiaal toch voldoende ingesloten.

De hogere delen van de zandrand (rond NAP +0,5 m) zorgen voor een volledige opsluiting van het ophoogmateriaal in het plas-dras gebied tot direct tegen de dam, en bovendien wordt het moerasgebied hierdoor extra beschermd tegen inkomende golven vanuit het Markermeer. Een voldoende brede kruin op het niveau NAP +0,5 m of hoger zal naar verwachting ook gedurende een langere tijd als een bovenwaterdam kunnen blijven functioneren. Lagere dammen zijn veel vatbaarder voor vervorming/verlaging van de kruin door golfwerking; zie sectie 5.1.1.

Aan de zuidoostpunt van eiland D3 is overigens ook sprake van een direct overgang tussen plas-dras en diep water (met één tussenliggende zandrand). Ook op deze locatie is een robuuster ontwerp met een hoger kruinniveau toegepast. Zie sectie 5.3 voor een uitgebreidere toelichting.

Opgemerkt wordt dat in de DO-ontwerptekeningen die zijn gepresenteerd in deze ontwerprapportage (zie o.a. Figuur 25) nog geen rekening is gehouden met een verhoogd kruinniveau rond NAP +0,5 m. In het DO is aan de achterkant van eiland D2 een zandrand voorzien met afwisselend kruinniveau op NAP -0,4 m en NAP -0,2 m. Hierin is dus enkel een verhoging van de lagere delen van de oostrand voorzien, ten opzichte van de overige eilanden. Op basis van de ontwerpbeschouwingen wordt dus alsnog geadviseerd om ook de niet-verlaagde delen van de oostrand ter plaatse van eiland D2 te verhogen; van NAP -0,2 m naar NAP +0,5 m.

Voor de zandranden langs de twee gekromde baaien ten westen van de oostelijke zandbuffers geldt ook dat er een hoger kruinniveau rond NAP +0,5 m (i.p.v. NAP -0,2 m) zal worden gerealiseerd.

#### **Ontwerpafwijking t.o.v. DO-ontwerp:**

De oostrand van eiland D2 heeft een afwisselend kruinniveau op NAP -0,4 m en NAP +0,5 m.

De zandranden langs de gekromde baaien nabij de zandbuffers hebben een kruinniveau op NAP +0,5 m.

Ten opzichte van het DO-ontwerp is een extra zandvolume van ca. 10 á 15 m<sup>3</sup>/m nodig zijn om het kruinniveau te verhogen van NAP -0,2 m naar NAP +0,5 m, uitgaande van een kruinbreedte van minimaal 5 m en een slechts beperkt steiler opgezet buitentalud. Uitgaande van een damlengte van ca. 1.000 m waarop deze verhoging betrekking heeft, is op dit punt een extra zandvolume van ca. 10.000 m<sup>3</sup> nodig ten opzichte van het DO-ontwerp.

#### **5.4.2 Relatief groot gebied 'beschut ondiep water' (eiland D3)**

Een tweede ontwerpaandachtspunt dat is uitgelicht, is het relatief grote gebied met beschut ondiep water aan de noordoostkant van eiland D3. In het ontwerp is gekozen voor een oplossing waarbij geen beschut ondiep water aanwezig is aan de oostkant van eiland D2, maar juist een extra grote ondiep water zone achter het moeras van eiland D3. De plas-dras zones van beide eilanden komen in verbinding te staan met dit gebied. Naar verwachting zal deze omvang van de ondiepe zone geen nadelige invloed hebben op de stabiliteit en de erosiebestendigheid van het moeras. Desalniettemin wordt aanbevolen om de zachte randen rondom dit gebied goed in de gaten te houden in de periode na realisatie. Het risico bestaat namelijk dat de grotere (lokale) strijklengten in de beschutte zone resulteren in een grotere golfbelasting op de zanddammen langs de plas-dras zones.

In tegenstelling tot bij de andere beschut ondiep water gebieden zijn aan de oostkant van eiland D3 (tussen het moeras en de zandige buitenrand) – bij noordoostelijke wind – strijklengten mogelijk van enkele honderden



meters (tot ca. 500 m). Dus ondanks dat er een buitenrand aanwezig is die de golfaanval vanuit het Markermeer grotendeels tegenhoudt, is er alsnog golfwerking mogelijk nabij het moerasgebied door lokaal opgewekte windgolven. De vraag is alleen of deze golven een nadelig effect kunnen hebben op de stabiliteit van de moerasranden.

In de voorgaande ontwerpnota (*MW-UO-WP-OW04*) is in sectie 5.3.4 reeds gekeken naar het mogelijke effect van lokale golfgroei binnen het moeras tijdens maatgevende stormcondities. Op basis van de eerdere analyses en de beschikbare informatie over de maatgevende windcondities uit noordoostelijke richting (ca. 18 m/s bij 1/50 per jaar storm) is vastgesteld dat de maximaal optredende lokale golfhoogten – bij maatgevende stormcondities – rond de 20 á 30 cm liggen. Dit is een zeer conservatieve inschatting.

Naar verwachting is de golfenergie van deze lokaal opgewekte golven te beperkt om te kunnen resulteren in negatieve effecten op de stabiliteit van de moerasranden. Monitoring van de moerasranden is wel aan te bevelen.

## 5.5 Monitoring van zandige buitenrand (oostzijde)

Aangezien er nog relatief weinig kennis beschikbaar is over het morfologische gedrag van zandige oeverzones in het Markermeer gaat de inschatting van de onderhoudsbehoefte van dit type oplossingen gepaard met relatief grote onzekerheden. Voor de ZW-strandrand van de Marker Wadden is een analogie te trekken met het strand van de Pilot Houtribdijk; vanwege de overeenkomsten wat betreft oeverlijniëoriëntatie en profielhelling. Daarom zijn veel verificaties (deels) gebaseerd op de voorlopige conclusies uit deze pilotstudie. Voor de zachte randen aan de noordwestzijde en de oostzijde van de Marker Wadden is de vergelijking met de Pilot Houtribdijk lastiger te maken; omdat de oeverlijniëoriëntatie (en dus de lokaal optredende golfcondities) afwijkend zijn. Desalniettemin is de pilot de enige bruikbare praktijkcase die – in combinatie met ondersteunende rekenkundige analyses – ter ondersteuning gebruikt kan worden voor de ontwerpverificaties.

Om de gemaakte inschattingen over het morfologische gedrag van zachte buitenranden van de Marker Wadden te kunnen beoordelen, en om – waar nodig – tijdig te kunnen bijsturen in het geval van onverwachte erosietrends, is het noodzakelijk om de profielontwikkeling hiervan actief te monitoren, direct vanaf het moment van realisatie. Naast het feit dat er veel kennis kan worden opgedaan over zandige oevers in het Markermeer, is monitoring vooral benodigd om een realistische inschatting te kunnen maken van de onderhoudsbehoefte van dergelijke oeverzones. Ook kunnen de monitoringsgegevens gebruikt worden om de ontwerpmethodiek voor zandige oeverzones verder te optimaliseren.

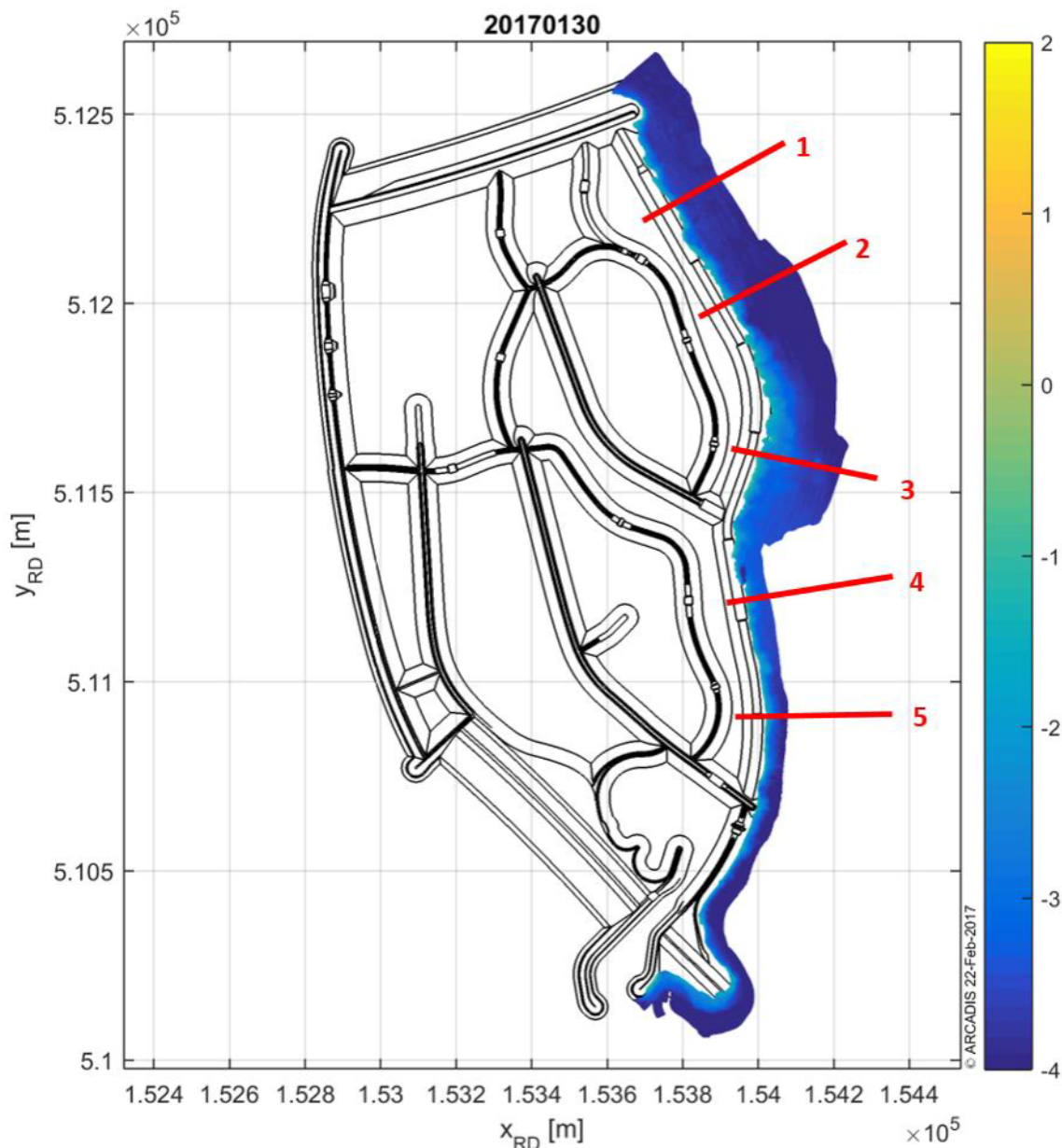
Hieronder wordt nader ingegaan op twee aspecten van monitoring van de Marker Wadden: [1] bevindingen op basis van bodeminpeilingen van de reeds gerealiseerde oostrand van modules A+B, en [2] aandachtspunten voor toekomstige monitoring van de zachte (buiten)randen van de Marker Wadden.

### 5.5.1 Bevindingen o.b.v. bodemmetingen oostelijke buitenrand module A+B

Met de achterliggende gedachte om het ontwerp van de oostelijke buitenrand van module D beter te kunnen onderbouwen is een verkennende analyse uitgevoerd op basis van ingewonnen bodemmetingen nabij de reeds gerealiseerde oostrand van modules A en B. Het beoogde doel hiervan is om inzicht te krijgen in de initiële dwarsontwikkeling van de zandige profielen (vorming van een evenwichtsprofielvorm). Deze verkennende analyse bestaat primair uit de vergelijking van twee datasets met surveygegevens; ingemeten op 28 november 2016 (kort na realisatie) en op 30 januari 2017 (na twee maanden).

In Figuur 26 is het onderwaterprofiel van de oostelijke buitenrand van modules A+B weergegeven, zoals ingemeten op 30 januari 2017. In deze overzichtswaargave zijn ook 5 raailocaties aangeduid waarlangs profielvergelijkingen zijn uitgevoerd tussen de datasets van 28 november 2016 en 30 januari 2017. De resultaten van twee van deze raaien zijn weergegeven in Figuur 27 (doorsnede 1) en Figuur 28 (doorsnede 5). In beide gevallen beperkt de vergelijking zich tot het bodemprofiel onder NAP -2 m. Uit deze figuren blijkt dat de bodemveranderingen onder NAP -2 m zeer klein zijn gedurende de eerste twee maanden na realisatie.

Echter, conclusies over bodemveranderingen onder NAP -2 m zijn niet erg relevant voor het verkrijgen van inzicht over de initiële morfologische ontwikkeling van de zandige rand. Dit deel van het profiel ligt namelijk niet in de morfologisch actieve zone. Het is veel interessanter om te weten welke (autonome) morfologische ontwikkeling er heeft plaatsgevonden rond de waterlijn (tussen NAP -1 m en NAP +0,5 m). Helaas zijn er momenteel onvoldoende gegevens beschikbaar om hierover conclusies te trekken.

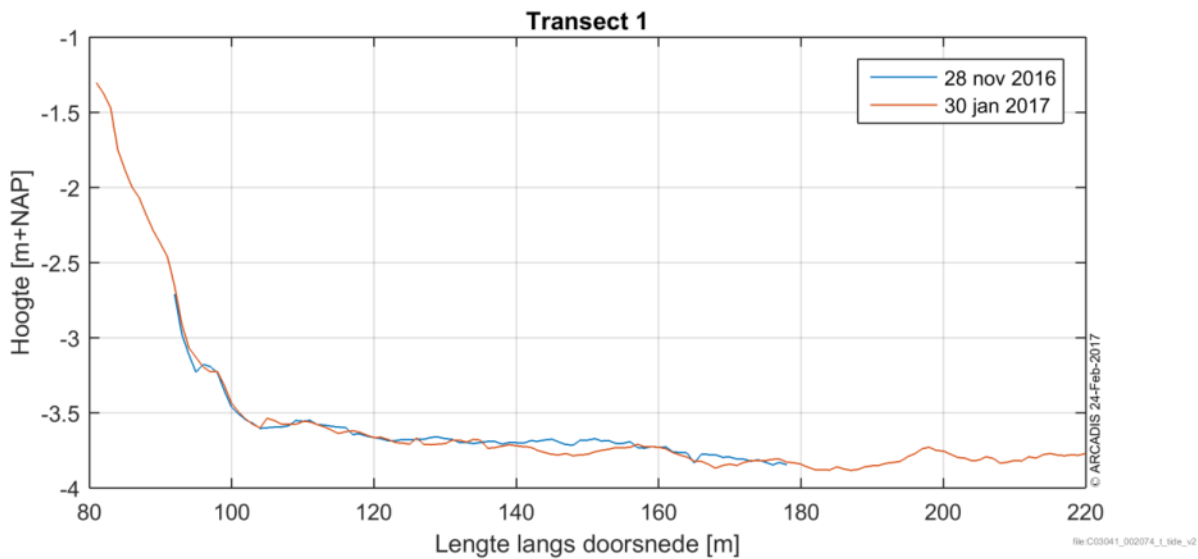


Figuur 26 Overzicht van het onderwatergebied dat is ingemeten tijdens de survey op 30 januari 2017, aan de oostzijde van modules A+B van de Marker Wadden. Inclusief aanduiding van een vijftal raailocaties waarlangs de profielontwikkeling is beschouwd op basis van beschikbare surveygegevens.

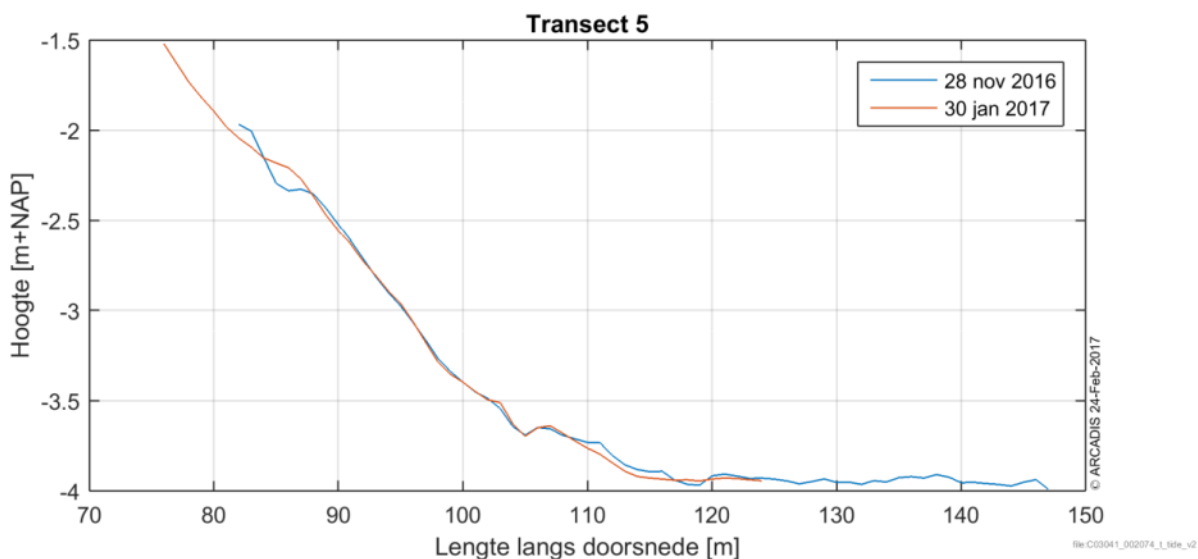
Naast de bodemmetingen van 28 november en 30 januari zijn nog een aantal andere surveys uitgevoerd nabij de oostelijke rand, maar deze zijn niet allemaal vlak-dekkend en ook hierin mist de relevant geachte ondiepe profielzone. Er zijn wel enkele gegevens beschikbaar over het maaiveldniveau van de opgespoten zanddammen boven water, maar ook deze geven weinig inzicht in de morfologische ontwikkeling.

Op basis van de beschikbare surveygegevens is vastgesteld dat er – in deze fase – nog geen dussdanige conclusies kunnen worden getrokken over de morfologische ontwikkeling van de reeds gerealiseerde oostrand van modules A+B waardoor de ontwerpmethodiek voor de zachte buitenrand van module D hierop kan/moet worden aangepast. Voor het ontwerp van zandranden van module D is dus (noodgedwongen) eenzelfde methodiek gehanteerd als voor het ontwerp van de zachte randen van modules A, B en C.

Aanbevolen wordt om in de vervolgfase meer aandacht te besteden aan de monitoring van de ondiepe profieldelen van de zachte buitenranden. Monitoring van deze zone geeft het meeste inzicht in de (korte- en lange-termijn) morfologische ontwikkeling van de zanddammen. Zie de volgende sectie voor enkele aandachtspunten.



Figuur 27 Profielontwikkeling ter plaatse van raai "Transect 1" aan de oostelijke achterrand van modules A+B, op basis van de surveygegevens van 28 november 2016 en 30 januari 2017.



Figuur 28 Profielontwikkeling ter plaatse van raai "Transect 5" aan de oostelijke achterrand van modules A+B, op basis van de surveygegevens van 28 november 2016 en 30 januari 2017.

### 5.5.2 Aandachtspunten t.a.v. toekomstige monitoring

Vanwege de onzekerheden rondom de morfologisch ontwikkeling van de zandige randen, met name aan de relatief luwe oostkant van de Marker Wadden, is het noodzakelijk om het zandige systeem structureel te monitoren. Dit houdt in dat het gehele zandige profiel (juist ook de ondiepe zones tussen NAP -1,5 en NAP !) op gezette tijden, en ook direct vanaf aanleg, ingemeten dient te worden en dat er goed bijgehouden moet worden waar en wanneer er sprake is van herprofilering en/of zandaanvullingen.

Monitoring is noodzakelijk omdat hiermee (mits goed en structureel uitgevoerd) kennis kan worden opgedaan waarmee in vervolgfases ontwerptimalisaties kunnen worden doorgevoerd en risico's kunnen worden gemitigeerd. Bovendien kan hierdoor een efficiënter en beter onderbouwd onderhoudsplan worden opgesteld.

Voorgesteld wordt dus om zo snel mogelijk een goed monitoringsplan op te stellen op basis waarvan de ontwikkeling van de zachte randen, reeds vanaf realisatie, kan worden geanalyseerd.



## 6 VERIFICATIE EN VALIDATIE

### 6.1 Verificatie

*Voldoet het ontwerp aan de gestelde eisen?*

In navolging op de technisch inhoudelijke uitwerkingen en beschouwingen in het voorgaande hoofdstuk is hieronder specifiek aandacht besteed aan de verificatie van de vastgestelde ontwerpeisen. Per relevante eis in de Eisen-Boom-Verificatie-Matrix (EBVM) is kort en bondig toegelicht *hoe* en *in welk document/hoofdstuk* wordt aangetoond dat het ontwerp voldoet aan de betreffende eis.

Een samenvatting van de in deze rapportage beschreven onderdelen van het verificatieproces voor object RA2 (zachte randen) is, per ontwerpeis, weergegeven in Tabel 9.

Tabel 8 Voorbeeld tabelindeling t.b.v. verificatie (samenvatting)

#	Object ID
Code	Eistitel
	Eistekst

Toelichting m.b.t. verificatie van betreffende eis.

Tabel 9 Samenvatting van resultaten van het verificatieproces voor object RA2 (zachte randen), per ontwerpeis uit de EBVM. De verificaties die betrekking hebben op het ontwerp van **module D** zijn met **oranje tekst** aangeduid.

1	MW – Marker Wadden
MW-16	Erosie ten gevolge van een storm 1:50 jaar. In habitat plas-dras mag erosie, ten gevolge van een storm die eens in de 50 jaar voorkomt (met een duur van 10 uur, met een trapezium verloop van 3-4-3 uur), leiden tot het verloren gaan van maximaal 5% van het aangelegde oppervlakte plas-dras.

Verificatie:

In sectie 5.4 van de UO-nota 'zachte randen' is een beschouwing gedaan m.b.t. het potentiële effect van een 1/50 per jaar storm op het oppervlak van habitat 'plas-dras'. Hierbij is een inschatting gemaakt van de mate van erosie die kan optreden voor verschillende wind-/ golfrichtingen. De conclusie is dat het moerasgebied van de Marker Wadden voldoende beschermd is door de omliggende randen zodat eventuele erosie niet zal resulteren in (meer dan) 5% verlies van het oppervlak plas-dras.

Dezelfde verificatieanalyse is van toepassing op het ontwerp van module D.

Referentie:

UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §5.4

1.1	RA – Randen
RA-01	Beschermen tegen weersinvloeden
	Randen/dammen dienen de te realiseren objecten te beschermen tegen erosieprocessen als gevolg van wind, golfoverslag en kruierend ijs.

Zie onderliggende eis: RA2-A-05

RA-04	Verhouding harde-zachte rand	Verhouding harde-zachte rand is ter keuze Opdrachtnemer mits minimaal 500m zachte rand aanwezig is.
-------	------------------------------	---

**Verificatie:**

In het ontwerp is ruim 3500 m aan zogenaamde strandranden voorzien. Ook aan de luwtezijde zijn zachte buitenranden (zanddammen) voorzien van in totaal bijna 5000 m lengte (ca. 2000 m langs module A+B en ca. 3000 m langs module C).

Door de ontwerpuitbreiding met module D neemt de totale lengte aan zachte rand nog verder toe, waardoor ruimschoots wordt voldaan aan de gestelde eis over de verhouding tussen harde en zachte randen.

**Referentie:**

Tekeningen: 52812492-TEK-UO-0006, 52812492-TEK-UO-0007, 52812492-TEK-UO-0008, 52812492-TEK-UO-0011

RA-05	Evenwichtsprofiel zachte rand van zand	Een zachte rand dient een zodanig groot volume zand te hebben dat er na een maatgevende storm van eens in de 50 jaar nog steeds een kruin op ontwerphoogte aanwezig is met een minimale breedte van 3,0 m.
-------	--	--

**Verificatie:**

Voor alle zachte randen (NW-zijde, ZW-zijde en Oostzijde) zijn ontwerpberoeeningen uitgevoerd om het effect van een 1/50 per jaar storm vast te stellen; zie §5.1.1, §5.2.1, §5.3.2, §5.3.3 (UO-nota zachte randen). In alle gevallen is vastgesteld dat er minimaal een kruinbreedte van 3 m (op ontwerpniveau) resteert na een dergelijke storm.

ZW-rand:	resterende kruinbreedte: meer dan 15 á 20 m	(§5.1.1)
NW-rand:	resterende kruinbreedte: meer dan 10 á 15 m	(§5.2.1)
O-randen:	resterende kruinbreedte: meer dan 5 m	(§5.3.2)

Ook voor de zachte randen (westkant en oostkant) van module D zijn ontwerpberoeeningen uitgevoerd om het effect van een 1/50 per jaar storm vast te stellen; zie §5.1.2 en §5.1.3 (UO-nota zachte randen - module D). In beide gevallen is vastgesteld dat er minimaal een kruinbreedte van 3 m (op ontwerpniveau) resteert na een dergelijke storm.

**Referentie:**

UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §5.1.1, §5.2.1, §5.3.2, §5.3.3  
UO-nota 'zachte randen (module D)'; MW-UO-WP-OW04-D; §5.1.2, §5.1.3

RA-07	Levensduur houten constructie	Een houten beschermingsconstructie dient een ontwerp levensduur te hebben van minimaal 20 jaar.
-------	-------------------------------	---

**Verificatie:**

De houten palenrijen die zijn voorzien in het ontwerp worden gemaakt van eikenhout met duurzaamheidsklasse II. De minimaal te verwachten levensduur is hierdoor >20 jaar.

**Referentie:**

n.t.b.

### 1.1.2 RA2 – Zachte rand

RA2-01	Onbeschermde ligging	De 500m zachte rand dient niet beschermd te zijn met een vooroever en/of golfbreker.
--------	----------------------	--

**Verificatie:**

De zachte (strand)randen met zuidwestelijke en noordwestelijke oriëntatie worden niet beschermd door een luwteconstructie zoals een onderwaterdam of een golfbreker.

**Referentie:**

Tekening: 52812492-TEK-UO-0006  
UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §3

RA2-02	Ligging aan loefzijde	De 500 m zachte rand dient aan de loefzijde te liggen ten opzichte van de overheersende windrichting (zijnde zuidwest).
--------	-----------------------	---

**Verificatie:**

De zuidwestelijke strandrand (met een totale lengte van ca. 700+1500=2200 m) heeft een oriëntatie die gelijk is aan de overheersende windrichting. Oriëntatie = 225°N (zuidwest).

Referentie:  
 Tekening: 52812492-TEK-UO-0006  
 UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §3

RA2-03	Zachte rand is van zand	De 500 m zachte rand dient gemaakt te zijn van uitsluitend zand.
--------	-------------------------	--

Verificatie:  
 Alle zachte buitenranden van de Marker Wadden bestaan uitsluitend uit zand dat wordt gewonnen uit de Pleistocene zandlaag onder het Markermeer.

Referentie:  
 Tekening: 52812492-TEK-UO-0006  
 UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §3

RA2-04	Bieden kennis	"De 500 m zachte rand dient kennis te bieden over de maakbaarheid, toepasbaarheid, onderhoudbaarheid, beheerbaarheid en het functioneren van een zand-rand in het Markermeer.
--------	---------------	---

Verificatie:  
 De zachte buitenranden van de Marker Wadden zijn ontworpen conform de eisen voor het object zachte rand (RA2), en voldoet hierdoor aan de criteria om in de toekomst kennis te bieden t.a.v. maakbaarheid, onderhoudbaarheid, beheerbaarheid en functionaliteit.

Zie onderliggende eisen: RA2-01, RA2-02, RA2-03, RA2-04, RA2-05

RA2-A05	Beschermen tegen weersinvloeden >> zachte rand	De zachte randen dienen de achterliggende objecten te beschermen tegen erosie t.g.v. wind en golfslag.
---------	--	--

Zie onderliggende eisen: RA2-A-06, RA2-A-07, RA2-A-08, RA2-A-09, RA2-E-01, RA2-E-02, RA2-E-03, RA2-E-04, RA2-E-05, RA2-E-06, RA2-E-07

RA2-A06	Bescherming tegen golven (loefzijde)	De zachte (strand)randen langs de ZW- en NW-randen van de Marker Wadden, worden dusdanig gepositioneerd en vormgegeven dat directe golfaanval op het achtergelegen gebied wordt voorkomen.
---------	--------------------------------------	--

Verificatie:  
 Langs de zuidwestelijke en noordwestelijke randen van de Marker Wadden zijn robuust vormgegeven zandranden voorzien ter bescherming van het achterliggende moerasgebied; zie §5.1 en §5.2 in UO-nota 'zachte randen'. De randen zijn dusdanig ontworpen dat alle inkomende golven worden opgevangen door het flauw oplopende strandtalud en de achterliggende duinenrij. Golfaanval op het achtergelegen gebied wordt hierdoor voorkomen.

Referentie:  
 UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §5.1, §5.2

RA2-A07	Bescherming tegen golven (luwtezijde)	De zachte randen langs het moeras, aan de luwtezijde (NO), worden dusdanig gedimensioneerd dat voldaan wordt aan MW-16, HT1.2-06, en HT2-05.
---------	---------------------------------------	--

Verificatie:  
 Aan de luwtezijde (oostzijde) van de Marker Wadden zijn zanddammen voorzien ter bescherming van het achterliggende moerasgebied; zie §5.3 in UO-nota 'zachte randen'. De oostelijke randen hebben variërende kruinniveaus (NAP +1 m, NAP -0,2 m en NAP -0,9 m) en hebben als doel om het moeras voldoende te beschermen tegen golven uit oostelijke richtingen. De randen blokkeren (in tegenstelling tot de ZW- en NW-randen) niet alle golven zodat natuurlijke dynamiek binnen de Marker Wadden mogelijk blijft. De randen zorgen wel voor voldoende golfreductie om erosie en golfslag in het moerasgebied te minimaliseren.  
 Zie ook verificatie van eisen MW-16, HT1.2-06 en HT2-05.

Dezelfde verificatieanalyse is van toepassing op het ontwerp van module D.



## Referentie:

UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §5.3

UO-nota 'zachte randen (module D)'; MW-UO-WP-OW04-D; §5

RA2-A08	Stabiliteit van zachte (onderwater)dammen (met/zonder palenrijen)	De stabiliteit van de zachte (onderwater)dammen langs de buitenranden van het moeras (met/zonder houten palenrijen erop) moeten voldoende bestand zijn tegen hydraulische belasting, zodat zowel de dammen als de eventuele palenrijen er bovenop hun (golfremmende) functie niet zullen verliezen.
---------	---	---

## Verificatie:

In §5.3 in de UO-nota 'zachte randen' is een uitgebreide analyse uitgevoerd ter toetsing van de morfologische stabiliteit van de zachte (onderwater)dammen. Voor zowel jaarrond- als stormcondities is een inschatting gemaakt van de te verwachten morfologische ontwikkeling. Naar verwachting zijn de dammen voldoende gedimensioneerd om gedurende een langere periode functioneel te blijven.

*Opgemerkt wordt dat de onzekerheden rondom de morfologische stabiliteit van dit type dammen erg groot is, en daarom wordt aanbevolen om na aanleg actief te monitoren en waar nodig bij te sturen (middels suppleties of kruinbescherming).*

Dezelfde verificatieanalyse is van toepassing op het ontwerp van module D.

## Referentie:

UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §5.3

UO-nota 'zachte randen (module D)'; MW-UO-WP-OW04-D; §5

RA2-A10	Vaststellen minimale omvang zachte randen	Er dient een minimaal benodigd profiel te worden gedefinieerd om in de B&O-fase eenvoudig te kunnen toetsen of de zachte randen nog voldoen aan de eisen RA-02 en RA-05.
---------	---	--

## Verificatie:

Ten behoeve van de monitoring in de periode tijdens en na aanleg van de Marker Wadden is voor elk van de verschillende typen zachte rand (NW, ZW, O) een minimale profielomvang gedefinieerd waarmee voldaan wordt aan eisen RA-02 en RA-05; zie §5.5 in UO-nota 'zachte randen'.

Voor de zachte randen van module D is een vergelijkbare uitwerking gedaan. Zie §5.1 in de (voorliggende) aanvullende ontwerp- en verificatienota voor module D.

## Referentie:

UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §5.5

UO-nota 'zachte randen (module D)'; MW-UO-WP-OW04-D; §5.1(.1)

RA2-E01	Oriëntatie en omvang van strandranden	De uiteindelijke oriëntatie en omvang van de strandranden (ZW en NW-randen) dient in grote mate overeenkomstig te zijn met het ontwerp en de bijbehorende principeprofielen in het EMVI-document.
---------	---------------------------------------	---

## Verificatie:

Het uiteindelijke ontwerp van de strandranden (ZW en NW) is overeenkomstig met het ontwerp dat is gepresenteerd in de EMVI. Zie §3 van UO-nota 'zachte rand'.

**ZW:** Oriëntatie: 225°N (ZW). Profiel: 1:25 talud met achterliggende duinenrij. Kruinniveau van duin varieert tussen >NAP+1,8m en >NAP +2,8m; kruinbreedte ligt tussen 20m en 30m.

**NW:** Oriëntatie 340°N (~NNW). Profiel: 1:20 talud met achterliggende duinenrij. Kruinniveau van duin is >NAP+1,8m; kruinbreedte is >15m.

Zie ontwerptekeningen.

## Referentie:

Tekeningen: 52812492-TEK-UO-0006, 52812492-TEK-UO-0007, 52812492-TEK-UO-0008, 52812492-TEK-UO-0011

UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §3

RA2-E02	Zandbuffer zachte randen	Ter compensatie van structurele zandverliezen bij de 'zachte' uiteinden van de zanddammen worden
---------	--------------------------	--

zandbuffers aangelegd. Aan de zuidkant van het zuidweststrand heeft de buffer een volume van 220.000 m<sup>3</sup> (modules A, B, C en D); aan de noordzijde van het noordweststrand is dit 100.000 m<sup>3</sup>.

**Verificatie:**

Er is een analyse uitgevoerd om de te verwachten onderhoudsinspanning voor de verschillende zachte randen in te schatten; zie §5.1.4, §5.2.4 en §5.3.2.3 in UO-nota 'zachte rand'. Op basis van deze analyse is vastgesteld dat de beoogde zandbuffers voor de strandranden (NW: 100.000m<sup>3</sup>; ZW: 220.000m<sup>3</sup>) voldoende zijn voor het onderhoud voor minimaal 10 jaar en naar verwachting zelfs voor 20 jaar. Voor de oostelijke randen aan de luwtezijde zal de onderhoudsbehoefte moeten worden vastgesteld o.b.v. intensieve monitoring.

De zandbuffers zijn qua positionering op zo'n efficiënt mogelijke wijze ingepast in het ontwerp.

In de ontwerptekeningen zijn de zandbuffers en slijtlagen ingetekend; het totale volume is minimaal gelijk aan het gestelde criterium.

Ten gevolge van het aanvullende ontwerp van module D is voor de *gehele* (verlengde) ZW-rand uiteindelijk een onderhoudsbuffer opgenomen van 220.000 m<sup>3</sup> ter compensatie van te verwachten structurele zandverliezen langs en rond de kop van de strandrand. Dit is overeenkomstig met het genoemde zandvolume in de EMVI-documenten. Voor de NW-rand zijn geen wijzigingen voorzien ten opzichte van het ontwerp van module A, B en C.

Aan de oostkant van module D zijn drie kleinere onderhoudsbuffers gepositioneerd, aan de noordoostpunten van drie moeraseilanden. Bovendien wordt rondom de zuidpunt van eiland D3 een relatief hogere en bredere zachte rand toegepast om lokale erosie op te kunnen vangen. Dit zijn preventieve beheersmaatregelen.

Om een betere inschatting te maken van de onderhoudsbehoefte is intensieve monitoring nodig.

**Referentie:**

Tekeningen: 52812492-TEK-UO-0006, 52812492-TEK-UO-0007, 52812492-TEK-UO-0008

UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §5.1.4, §5.2.4

UO-nota 'zachte randen (module D)'; MW-UO-WP-OW04-D; §5.1, §5.2, §5.3

RA2-E03	Wash-overs in zachte ZW-rand	Om extra morfodynamiek en interactie tussen Markermeer en Marker Wadden mogelijk te maken worden twee wash-overs gecreëerd in de zuidwestelijke zanddam (voor modules A+B+C).
---------	------------------------------	---

**Verificatie:**

Langs de zuidwestelijke strandrand zijn twee wash-over-zones aanwezig.

In het ontwerp van module D is een verlenging van de ZW-rand opgenomen. Door de grotere lengte van deze strandrand ontstaat ruimte voor een derde wash-over zone; met dezelfde specificaties als de andere twee. In totaal worden er dus drie wash-overs gerealiseerd in de zachte ZW-rand.

**Referentie:**

Tekening: 52812492-TEK-UO-0007

UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §5.1.5

UO-nota 'zachte randen (module D)'; MW-UO-WP-OW04-D; §5.2

RA2-E04	Taludhelling strandranden	De uiteindelijke taludhellingen van de strandranden (ZW en NW-randen) dienen in grote mate overeenkomstig te zijn met het ontwerp en de bijbehorende principeprofielen in het EMVI-document.
---------	---------------------------	--

**Verificatie:**

Het uiteindelijke ontwerp van de strandranden (ZW en NW) is overeenkomstig met het ontwerp dat is gepresenteerd in de EMVI. Zie §3 van UO-nota 'zachte rand'.

**ZW:** Taludhelling: 1:25 boven NAP -2,5 m.

**NW:** Taludhelling: 1:20 boven NAP -2,0 m.

Zie ontwerptekeningen.

**Referentie:**

Tekening: 52812492-TEK-UO-0006, 52812492-TEK-UO-0007, 52812492-TEK-UO-0008

UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §3.2, §3.3, §3.4

RA2-E05	Taludhelling zachte randen (luwtezijde)	De randen in de luwte van de eilandengroep (NO-zijde) worden dusdanig ontworpen dat deze qua taludhellingen overeenkomen met de principeprofielen in het EMVI-document.
---------	---	---

**Verificatie:**

In het uiteindelijke ontwerp zijn voor de zachte randen aan de luwtezijde (oost) taludhellingen gehanteerd die flauwer zijn dan in het EMVI-ontwerp. Vanwege de morfologische en geotechnische stabiliteit is gekozen voor taludhellingen van minimaal 1-op-7 voor de zachte randen die direct aan het water grenzen. Langs de buitenrand (achterkant) van module C is een 1-op-10 talud gehanteerd. Deze flauwere taludhelling zijn o.a. nodig om op de langere termijn de functionaliteit van de dammen te kunnen borgen en om de onderhoudsbehoefte te beperken. Zie §3.5 en §5.3 in UO-nota 'zachte rand'.

Bij het ontwerp van de oostelijke buitenrand van module D is uitgegaan van een buitentalud van 1-op-20 (boven NAP -2,5 m). Dit is flauwer dan het buitentalud van de voormalige buitenrand van module C. Met deze flauwere ontwerphelling wordt beoogd dat het profiel direct conform een (theoretische) evenwichtshelling wordt aangelegd, om daarmee ongewenste initiële profielvorming (t.g.v. dwarsprocessen) zoveel mogelijk te beperken. Het risico op een vroegtijdige onderhoudsinspanning door erosie in de bovenste delen van het profiel wordt hiermee sterk gereduceerd. Zie §5.1 in UO-nota 'zachte randen (module D)'.

**Referentie:**

Tekening: 52812492-TEK-UO-0009

UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §3.5

UO-nota 'zachte randen (module D)'; MW-UO-WP-OW04-D; §5.1

RA2-E07	Palenrijen dwars op het strand	Om het negatieve effect van bruto langtransport (zandverlies) langs de strandranden te beperken worden dwars op het strand/vooroever - waar nodig/nuttig - palenrijen geplaatst.
---------	--------------------------------	--

**Verificatie:**

Langs de strandranden zijn in totaal vier houten palenrijen voorzien in het ontwerp: [#1] nabij recreatiestrand, [#2] en [#3] langs ZW-rand ten zuidoosten van de haven, [#4] langs de NW-rand. Palenrij #2 dient ter reducering van de langtransporten nabij de zuidelijke havendam; de palen worden daarom dicht op elkaar geplaatst. De overige palenrijen hebben geen functie t.a.v. de morfologie, enkel t.b.v. ruimtelijke kwaliteit; de palen worden daarom ruimer uit elkaar geplaatst.

**Referentie:**

Tekening: 52812492-TEK-UO-0006, 52812492-TEK-UO-0007, 52812492-TEK-UO-0008

UO-nota 'zachte randen'; MW-UO-WP-OW04; §3.5

**Overige relevante eisen**

HT1.2-06	Waterbodembodem is beschermd tegen golf-erosie	Golfbewegingen in ondiep water dienen de ontwikkeling van bodemleven niet nadelig te beïnvloeden.
----------	--	---

Zie *Ontwerpnota UO Habitat, CDS, ontvangstvoorziening*

HT2-05	Golfhoogte (beschutte oeverzone)	In de beschutte oeverzone dient de golfhoogte bij een storm die eens per jaar (=1:1) kan voorkomen, zodanig gereduceerd te zijn dat de golfhoogte maximaal 0,30 m bedraagt.
--------	----------------------------------	---

Zie *Ontwerpnota UO Habitat, CDS, ontvangstvoorziening*



## 6.2 Validatie

*Voorziet het ontwerp in alle beoogde functies?*

In de vorige sectie is vastgesteld dat het ontwerp van de zandige delen van de Marker Wadden voldoet aan alle hieraan gestelde eisen (verificatie). Veel belangrijker nog is om te controleren of het uiteindelijke ontwerp ook voorziet in alle beoogde functies in het te realiseren gebied: validatie.

Hieronder is nogmaals een overzicht gegeven van de door de opdrachtgever(s) beoogde functies van de verschillend (in deze rapportage beschouwde) objecten.

### Functies RA2 – Zachte rand:

- Bieden nieuw habitat: oeverzones
- Reduceren golfslag
- Beschermen ophoogmateriaal
- Leren voor het vervolg: genereren uitvoerings- en beheerskennis

Bovenstaand overzicht in ogenschouw nemend, kan worden geconcludeerd dat met het voorliggende ontwerp van de Marker Wadden voorzien wordt in elk van de beoogde functies.

De zachte buitenranden creëren luwte en beschermen het achterliggende moeras, en ze zorgen voor een geleidelijke overgang naar luwe oeverzones. Vanwege de variëteit aan onbeschermde zachte (buiten)randen kunnen we bovendien in de toekomst veel leren over de natuurlijke processen en de morfologische ontwikkeling die optreden ter plaatse van dit type luwteranden.

## 7 UITVOERINGSASPECTEN

### 7.1 Uitvoeringsfasering

Voor een nadere beschrijving van de uitvoeringsmethodiek en de uitvoeringsfasering wordt verwezen naar sectie 7.1 in de voorgaande ontwerpnota met kenmerk MW-UO-WP-OW04.

Aanvullende informatie en overige relevante details over de uitvoeringsmethodiek worden opgenomen in werkplannen.

### 7.2 Uitvoeringseisen

Tabel 10 Overzicht met uitvoeringseisen die betrekking hebben op object RA2.

Code	Uitvoeringseis	
RA2-UA-D01	<b>Eistitel:</b>	<b>Korrel diameter zandige randen luwtezijde (module D)</b>
	Eistekst:	Het zand op/in de zanddammen aan de luwtezijden dient de volgende vakgemiddelde D50 te hebben: - D50: > 250 mu (streefwaarde: > 300 mu)
	Toelichting:	Eis volgt uit ontwerputgangspunten (grof zand nodig i.v.m. stabiliteit gewenste taludhellingen en beperking van de onderhoudsbehoefte.  <i>Hoe grover, des te beter m.b.t. morfologische stabiliteit.</i>
	Methode:	[1] Sturing op juiste D50 bij zandwinning/suppletie [2] Bemonstering van D50 vóór oplevering (samengevoegde samples uit representatieve vakken) [3] Vergelijking D50-monsters met ontwerputgangspunten voor D50.
	Verantwoordelijke:	Hoofduitvoerder
RA2-UA-D02	<b>Eistitel:</b>	<b>Minimale taludhellingen zanddammen (module D)</b>
	Eistekst:	Het initieel aanlegprofiel voor de zandige zanddammen (luwtezijde) dient – in verband met de <i>geotechnische stabiliteit</i> – te worden aangelegd met een minimale taludhelling van 1:4 boven water en 1:7 onder water (of flauwer). De kruin mag in combinatie met genoemde taludhellingen initieel worden aangelegd op N.A.P. +2 meter. Het aanbrengen van de zanddam met steilere taluds dient vooraf ter toetsing te worden voorgelegd aan de Geotechnisch adviseur en dient te worden onderbouwd met aanvullende geotechnische informatie.
	Toelichting:	Let op: taludhellingen van de buitenranden (onder directe golfaanval) worden in z'n geheel flauwer (1:20) aangelegd.
	Methode:	[1] Check of gerealiseerde taludhellingen gelijk of flauwer zijn dan de geotechnische eis [2] Indien nodig terugkoppeling naar geotechnisch adviseur
Verantwoordelijke:	Hoofduitvoerder	
RA2-UA-D03	<b>Eistitel:</b>	<b>Aanlegfasering conform Geotechnisch UO</b>
	Eistekst:	Tijdens de uitvoeringsfase dient de conceptuele fasering uit het Geotechnisch Uitvoeringsontwerp (13084-04-R02) te worden verwerkt in werktekeningen / werkplannen. Deze dienen ter toetsing te worden voorgelegd aan een geotechnisch adviseur.
	Toelichting:	

	Methode:	[1] Check of uitvoeringsfasering overeenkomstig is en blijft met uitgangspunten en beschreven methodiek in geotechnisch UO [2] Indien nodig terugkoppeling naar geotechnisch adviseur.
	Verantwoordelijke:	Geotechnisch adviseur
<b>RA2-UA-D04</b>	<b>Eistitel:</b>	<b>Vaststelling definitief aanlegniveau</b>
	Eistekst:	De definitieve aanleghoogte dient tijdens de uitvoeringsfase door een geotechnisch adviseur te worden bepaald op basis van meetresultaten van de zetting tijdens de uitvoering.
	Toelichting:	
	Methode:	[1] analyse van monitoring zettingsgedrag [2] bijstellen van inschattingen restzetting [3] waar nodig het definitief aanlegniveau van ontwerponderdelen (bijv. kruinniveau zanddammen, en niveau wash-overs) bijstellen.
	Verantwoordelijke:	Geotechnisch adviseur
<b>RA2-UA-D05</b>	<b>Eistitel:</b>	<b>Monitoring zettingsgedrag (zandige buitenranden luwtezijde)</b>
	Eistekst:	Tijdens de uitvoeringsfase dient het zettingsgedrag van de zandige buitenranden aan de luwtezijde van de Marker Wadden (O) gemonitord te worden, om zo goed mogelijke inschatting van de restzettingen te kunnen maken (o.a. voor vaststelling definitieve aanlegniveaus).
	Toelichting:	
	Methode:	Monitoring van zettingsgedrag. - Locaties zakbaken: <b>n.t.b.</b> - Frequentie monitoring: <b>n.t.b.</b>
	Verantwoordelijke:	Hoofduitvoerder
<b>RA2-UA-D06</b>	<b>Eistitel:</b>	<b>Monitoring morfologische ontwikkeling</b>
	Eistekst:	De morfologische ontwikkeling van de zachte randen (vooroever, stranden, dammen, duinen) dient tijdens uitvoeringsfase en gedurende de B&O-fase gemonitord te worden.
	Toelichting:	
	Methode:	Monitoring van morfologische ontwikkeling zachte randen - Wijze van monitoring: <b>n.t.b.</b> - Monitoringsgebied: <b>n.t.b.</b> - Frequentie monitoring: <b>n.t.b.</b>
	Verantwoordelijke:	Hoofduitvoerder



## 8 RISICO'S

### 8.1 Ontwerprisco's

Tabel 11 Overzicht met ontwerprisco's i.r.t. object RA2; specifiek voor module D.

ID	Risico's	Oorzaken	Gevolgen	Maatregelen
D-O1	Zanddammen langs oostelijke buitenrand van module D onvoldoende stabiel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structurele erosie t.g.v. stroming en/of golven (meer dan ingeschat op basis van theoretische analyses en beschikbare golf- en waterstandsgegevens)</li> <li>Omvang van onderhoudsbuffers niet voldoende om erosie op te vangen</li> <li>(Te) beperkte stroomlijning van buitenrand; (te) grote variatie in oriëntatie van oeverlijn</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grotere onderhouds-behoefte voor zachte randen aan oostzijde</li> <li>Ongewenste vervorming zand-dammen: lagere kruin of heroriëntatie</li> <li>Verminderde golfhoogtereductie door zachte rand, en daardoor zwaardere golfwerking binnen de ondiepe moeraszones (<i>afname luwtefunctie</i>)</li> <li>Uitspoeling van holoceen materiaal (<i>afname opsluitfunctie</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>[P] Flauwe buitentaluds langs oostrand: 1 op 20</li> <li>[P] Initieel benodigde <i>extra</i> zandvolume voor realisatie van zandrand in het systeem laten</li> <li>[P] Robuustere vormgeving van ontwerpprofielen op risicovolle locaties</li> <li>[P] Realisatie van onderhoudsbuffers langs oostrand</li> <li>[P] Monitoring van morfologische ontwikkeling</li> <li>[R] Zandsuppletie</li> <li>[R] Oeverlijn-bescherming</li> </ul>
D-O2	Morfologische instabiliteit van zuidelijke punt module D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structurele erosie t.g.v. stroming en/of golven (meer dan ingeschat op basis van theoretische analyses en beschikbare golf- en waterstandsgegevens)</li> <li>Zuid(oost)punt van eiland D3 onvoldoende afgeschermd voor golfaanval uit zuidelijke richting</li> <li>Scherpe bijdraaiing van oeverlijn bij zuidpunt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grotere onderhouds-behoefte voor zachte randen aan oostzijde</li> <li>Uitspoeling van holoceen materiaal (<i>afname opsluitfunctie</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>[P] Robuustere vormgeving van ontwerpprofielen rondom de zuidpunt van eiland D3</li> <li>[P] Realiseren van fysieke verbinding tussen oostrand D3 en ZW-rand</li> <li>[P] Zo grof mogelijk zand toepassen bij zuidpunt van eiland D3</li> <li>[R] Zandsuppletie</li> <li>[R] Oeverlijn-bescherming</li> </ul>
D-O3	Morfologische instabiliteit van knikpunten in buitenrand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Structurele erosie t.g.v. stroming en/of golven (meer dan ingeschat op basis van theoretische analyses en beschikbare golf- en waterstandsgegevens)</li> <li>Zuid(oost)punt van eiland D3 onvoldoende afgeschermd voor golfaanval uit zuidelijke richting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grotere onderhouds-behoefte voor zachte randen aan oostzijde</li> <li>Ongewenste vervorming zand-dammen: lagere kruin of heroriëntatie</li> <li>Verminderde golfhoogtereductie door zachte rand (<i>afname luwtefunctie</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>[P] Realisatie van drie onderhoudsbuffers op knikpunten in oostrand</li> <li>[P] Verhoogde kruin rondom knikpunten (langs de baaien)</li> <li>[R] Zandsuppletie</li> <li>[R] Oeverlijn-bescherming</li> </ul>

## 8.2 Uitvoeringsrisico's

Tabel 12 Overzicht met uitvoeringsrisico's i.r.t. object RA2; specifiek voor module D.

ID	Risico's	Oorzaken	Gevolgen	Maatregelen
D-U1	Beschikbaar zand in winput heeft een veel kleinere korreldiameter dan voorzien	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Weinig grof zand in winput</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Niet voldoet aan gestelde ontwerpeisen</li> <li>▪ Grotere zandverliezen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ [P] Bij uitvoeringsfasering (baggeren/storten) rekening houden met resultaten bodem-bemonstering winput (D<sub>50</sub> vs. diepte)</li> </ul>
D-U2	Zetting ondergrond groter dan gedacht	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grondopbouw wijkt af van gehanteerde uitgangspunten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Extra zand nodig om op benodigde niveaus te komen/blijven</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ [P] Monitoring van zetting tijdens uitvoering (zakbaken)</li> <li>▪ [P] Resultaten zettingsmetingen gebruiken voor update van modelberekening</li> <li>▪ [P] Voldoende overhoogte aanbrenge</li> </ul>
D-U3	Zandverliezen tijdens uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zanddammen zijn onvoldoende stabiel <i>tijdens</i> de uitvoering (in tijdelijke situatie)</li> <li>▪ Stormcondities tijdens uitvoering (voor afronding van gesloten buitenring)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Extra zand nodig voor realisatie van eindbeeld</li> <li>▪ Uitvoeringsfasering werkt niet zoals beoogd</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ [P] Veel aandacht voor uitvoeringsfasering tijdens ontwerpfase</li> <li>▪ [P] Regelmatige afstemming tussenontwerp en uitvoering</li> <li>▪ [P] Regelmatige monitoring tijdens uitvoeringsfase (incl. review door ontwerpteam)</li> <li>▪ [R] Uitvoeringsfasering aanpassen</li> <li>▪ [R] Extra maatregelen nodig om zand (tijdelijk) vast te leggen</li> </ul>

## REFERENTIES

**Arcadis, 2015;** *Golfklimaten Markerwadden*; achtergrondrapportage Marker Wadden, ref: 0782530687:A; maart 2015.

**Arcadis, 2016;** *Marker Wadden – ontwerp en verificatie zachte randen (objecten: RA2, IE1, IE3)*; ontwerp- en verificatienota Marker Wadden, ref: MW-UO-WP-OW04-v2; 18 april 2016.

**Arcadis, 2016b;** *Positionering slibgeul Marker Wadden*; verificatiedocument Marker Wadden, ref: 078776214:A; maart 2016.

**Boskalis, 2015a;** *EMVI 2 – Landschappelijke kwaliteit vogelparadijs*; EMVI document Marker Wadden; mei 2015.

**Boskalis, 2015b;** *EMVI 4 – Risicobeheersplan*; EMVI document Marker Wadden; mei 2015.

**Ecoshape, 2015;** *Interim rapportage – Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk*; tussentijdse oplevering; juli 2015.

**Fugro, 2013;** *Rapportage geotechnisch veldwerk*; bodemonderzoek Markerwadden – aanbiedingsfase; 2013.

**Rijkswaterstaat, 2015a;** *Vraagspecificatie Eisen - eerste fase Marker Wadden*; contractdocument; april 2015.

**Rijkswaterstaat, 2015b;** *Vraagspecificatie Proces - eerste fase Marker Wadden*; contractdocument; april 2015.

**Royal HaskoningDHV, 2013;** *Milieu-Effect Rapport (MER) tbv van bestemmingsplan Marker Wadden*; 2013.

**Van Rijn, 2015** *V4 Ontwerp van zandranden van natuureiland Marker Wadden*; ontwerprapportage (VO) Marker Wadden; maart 2015.



**Arcadis Nederland B.V.**

Postbus 137  
8000 AC Zwolle  
Nederland  
+31 (0)88 4261 261

[www.arcadis.com](http://www.arcadis.com)

Projectnummer: C01021.200906.0600  
Documentkenmerk: **MW-UO-WP-OW04-D**  
Status: Definitief

Auteur: [redacted] (Arcadis)  
Review: [redacted] (Arcadis)  
[redacted] (Boskalis)