

## Kennisinventarisatie Zandmotor

Beschikbare informatie in relatie tot vragen vanuit de MER en het beheer over de periode 2011 tot 2019



## **Kennisinventarisatie Zandmotor**

Beschikbare informatie in relatie tot vragen vanuit de MER en het beheer over de periode 2011 tot 2019

### **Auteur(s)**

Bas Huisman

Bert van der Valk

Bas Arens

Kees Vertegaal

Jeroen Wijsman

Peter Herman

## Kennisinventarisatie Zandmotor

Beschikbare informatie in relatie tot vragen vanuit de MER en het beheer over de periode 2011 tot 2019

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat-WVL
<b>Contactpersoon</b>	Carola van Gelder
<b>Referenties</b>	<i>Opdracht tot uitvoering van het meerwerk op project "Zandmotor meerwerk 2019-2020", zaaknummer 31131954.0002</i>
<b>Trefwoorden</b>	Zandmotor, Evaluatie, Duinen, Natuur, Ecologie, Recreatie, Grondwater

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	09-03-2021
<b>Projectnummer</b>	11201431-000
<b>Document ID</b>	11201431-000-ZKS-0014
<b>Pagina's</b>	65
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Bas Huisman	
	Bert van der Valk	
	Bas Arens	
	Kees Vertegaal	
	Jeroen Wijsman	
	Peter Herman	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Bas Huisman 	Marcel Taal 	Toon Segeren 	
	Bert van der Valk			
	Bas Arens			
	Kees Vertegaal			
	Jeroen Wijsman			
	Peter Herman			

# Samenvatting

In 2011 is er een grootschalige zandsuppletie de 'Zandmotor' op de Delflandse kust geplaatst. Deze maatregel is een innovatieve pilot die bedoeld is om natuurlijke duingroei te bevorderen zodat de kustveiligheid toeneemt. Tegelijkertijd creëert de Zandmotor ruimte voor natuur en recreatie, en wordt kennisontwikkeling en innovatie gestimuleerd. Om te beoordelen of de Zandmotor voldoet aan de van tevoren gestelde doelstellingen zijn evaluatievragen opgesteld. Deze vragen komen voort uit de milieueffectrapportage (MER) en vergunningseisen (beheersvragen).

Het doel van dit onderzoek is om de kennis samen te vatten die in 2019 beschikbaar is voor de beantwoording van de evaluatievragen van de Zandmotor. Op deze manier ontstaat een gezamenlijk uitgangspunt, waarna toegewerkt kan worden naar de eindevaluatie in het voorjaar van 2021. Daarnaast kunnen eventuele kennislacunes worden vastgesteld, die mogelijk nog ingevuld kunnen worden op basis van dit onderzoek. Ook dient de rapportage als verkenning voor relevante onderwerpen die voor externe communicatie door Rijkswaterstaat gebruikt kunnen worden.

Aan deze kennisinventarisatie is bijgedragen door Jeroen Wijsman (WMR), Bas Arens (Arens bureau voor strand- en duinonderzoek), Kees Vertegaal (Vertegaal ecologisch advies), Peter Herman en Bert van der Valk (Deltares).

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Doel van deze rapportage	7
1.2	Zandmotor	8
1.3	Doelen Zandmotor	8
1.4	Evaluatievragen	8
1.5	Stakeholders	9
1.6	Monitoringprogramma	9
1.7	Externe onderzoeksprogramma's	10
1.8	Leeswijzer	11
<b>2</b>	<b>De Zandmotor voor kustveiligheid</b>	<b>12</b>
2.1	Introductie	12
2.2	Morfologische ontwikkeling van de Zandmotor	12
2.2.1	Brandingszone	13
2.2.2	Diepe voorover	15
2.2.3	Duinen	16
2.2.4	Duinmeer en lagune	17
2.2.5	Dynamiek zandbanken	18
2.3	Morfologie van vooroeversuppleties	20
2.4	Sedimentbalans Delflandse kust	21
2.5	Zandtoename in primaire waterkering, basiskustlijn en kustfundament	22
<b>3</b>	<b>Meerwaarde voor natuur en recreatie</b>	<b>24</b>
3.1	Introductie	24
3.2	Ontwikkeling van de voorover	25
3.2.1	Sedimentsamenstelling	25
3.2.2	Ecologie voorover en natte strand	28
3.2.3	Habitats op de voorover en het natte strand	31
3.3	Ontwikkeling van strand en duinen	32
3.3.1	Ontwikkeling van de natuur in de nieuwe duinen	32
3.3.2	Dynamische eolische ontwikkeling in relatie tot natuurkwaliteit	33
3.3.3	Habitats op het strand en in de duinen	34
3.4	Ontwikkeling van de lagune	35
3.4.1	Sedimentsamenstelling van de lagune	35
3.4.2	Bodemdiergemeenschap van de lagune	36
3.4.3	Habitats van de lagune	39
3.5	Vissen, vogels en zoogdieren op de Zandmotor	40
3.5.1	Vissen	40

3.5.2	Vogels (broeden)	40
3.5.3	Vogels (foerageren)	41
3.5.4	Zeezoogdieren	41
3.6	Kennisontwikkeling voor het plannen van megasuppleties	42
3.6.1	Ontwerp in relatie tot natuur en recreatie	42
3.6.2	Spin-off voor kennis en innovatie	44
3.7	Beleving en waardering van de Zandmotor	45
<b>4</b>	<b>Beheer, gebruik en invloed op de omgeving</b>	<b>46</b>
4.1	Introductie	46
4.2	Recreatieveiligheid	46
4.3	Verenigbaarheid recreatie en natuur	50
4.4	Grondwater	51
4.5	Invloed op natuur bestaande duinen	54
4.6	Natte infrastructuur	56
<b>5</b>	<b>Conclusies</b>	<b>58</b>
	<b>Referenties</b>	<b>59</b>
A	Overzicht evaluatievragen	62

# 1 Inleiding

## 1.1 Doel van deze rapportage

In 2011 is een grootschalige pilot zandsuppletie op de Delflandse kust geplaatst (Figuur 1.1). Deze maatregel is een innovatieve pilot die bedoeld is om natuurlijke duingroei te bevorderen, kennisontwikkeling en innovatie te stimuleren en ruimte te creëren voor natuur en recreatie. Om te beoordelen hoe de Zandmotor voldoet aan de van tevoren gestelde doelstellingen zijn evaluatievragen opgesteld, welke voortkomen uit de milieueffectrapportage (MER) en vergunningseisen (beheersvragen). Op basis hiervan is in 2016 een eerste evaluatie uitgevoerd van de Zandmotor. Een vergelijkbare analyse zal eind 2020 worden uitgevoerd, waarvoor in dit rapport een eerste kennisinventarisatie wordt gemaakt.



*Figuur 1.1 Zandmotor na aanleg in Oktober 2011 (Rijkswaterstaat / Joop van Houdt)*

Het doel van dit rapport is om de kennis samen te vatten die in 2019 beschikbaar is voor de beantwoording van de evaluatievragen van de Zandmotor. Op basis van de resultaten van het rapport kan concreet nagedacht worden over de ontwikkelingen bij de Zandmotor, zodat er een gedragen beantwoording kan worden ontwikkeld voor de eindevaluatie in het voorjaar van 2021. Eventuele kennislacunes kunnen worden vastgesteld op basis van de resultaten in dit rapport, die voor de eindevaluatie mogelijk nog ingevuld kunnen worden. Ook dient de rapportage als verkenning voor relevante onderwerpen die voor externe communicatie door Rijkswaterstaat gebruikt kunnen worden.

Voor de beantwoording wordt gebruikt gemaakt van informatie die voorkomt uit de monitoring die is opgezet door Rijkswaterstaat (Deltares en WMR), de Provincie Zuid-Holland, Dunea en de universiteiten. Ook wordt een verbinding gelegd tussen de beschikbare informatie en de gestelde evaluatievraag. Eventuele nog te vullen lacunes in kennis worden benoemd.

## 1.2 Zandmotor

Tussen mei en juli 2011 is de grootschalige 'Zandmotor' suppletie geplaatst langs de Delflandse kust. In totaal is hier 21.5 miljoen m<sup>3</sup> zand op de kust geplaatst, waarbij ook het zand van de aan de Zandmotor voorafgaande kustversterking 2008-2009 wordt meegenomen (i.e. circa 3 miljoen m<sup>3</sup>). Door de tijd heen wordt het zand van de Zandmotor langs de kust verspreid als gevolg van de werking van golven en stromingen, waardoor zowel de aanliggende kust als de duinen versterkt worden. Doel van deze maatregel is het stimuleren van natuurlijke duinaangroei, genereren van kennisontwikkeling en toevoegen van een aantrekkelijk recreatie- en natuurgebied.

Het extra verkregen oppervlak boven MSL (bestemd voor recreatie en natuur) was na aanleg van de Zandmotor circa 128 hectare. Aan de noordzijde van de Zandmotor is landwaarts van de 'haak' een lagune aanwezig, waar de beschutte ligging tegen golven en stroming zorgt dat er andere types ecologische habitat ontstaat dan op de onbeschermde kust. Ter plaatse van de aansluiting van de Zandmotor haak met de kust is een duinmeer aangelegd. Noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor zijn onderwater suppleties geplaatst om te voorkomen dat er hier erosie zou optreden. Deze 'vooroeversuppleties' hadden een volume van respectievelijk 500,000 m<sup>3</sup> (noordzijde) en 2 miljoen m<sup>3</sup> (zuidzijde).

## 1.3 Doelen Zandmotor

In de Projectnota / MER Zandmotor Delflandse Kust (PZH, 2010) zijn de volgende doelstellingen geformuleerd :

- I. Stimuleren van natuurlijke duinaangroei in het kustgebied tussen Hoek van Holland en Scheveningen. Deze duinaangroei dient verschillende functies namelijk, veiligheid, natuur en recreatie;
- II. Genereren van kennisontwikkeling en innovatie om de vraag te beantwoorden in welke mate kustonderhoud en meerwaarde voor recreatie en natuur gezamenlijk te realiseren zijn;
- III. Toevoegen van een aantrekkelijk (tijdelijk) recreatie- en natuurgebied aan de Delflandse kust.

Het vierde doel dat geëvalueerd wordt is het 'beheer van de Zandmotor en omgeving'. Hierbij gaat het om recreatieveiligheid, verenigbaarheid van recreatie en natuur doelen en om het voorkomen van ongewenste invloed op het grondwater, natuurwaarden van het bestaande duin of aanwezige natte infrastructuur.

## 1.4 Evaluatievragen

Ten behoeve van de concrete toetsing van de effecten van de Zandmotor zijn er evaluatievragen opgesteld die beschreven zijn in het Uitvoeringsprogramma (UVP) Monitoring en Evaluatie pilot Zandmotor (Tonnon et al, 2011) en op verzoek van Rijkswaterstaat recent enigszins bijgesteld om de vragen beter toetsbaar te maken (Taal et al., 2017; Huisman, 2018). Dit betekende dat hypothesen zijn omschreven tot sub-evaluatievragen (zie bijlage A). De evaluatievragen komen voort uit de 3 MER doelen en het beheer van de Zandmotor.

De evaluatievragen voortkomend uit de MER richten zich op :

- de bijdrage van de Zandmotor aan kustonderhoud en natuurlijke duinaangroei (EF1-1)
- fysische kennis over kustonderhoud in relatie tot recreatie en natuur (EF2-1)
- meerwaarde van de Zandmotor voor de natuur (EF2-2)
- spin-off van de Zandmotor voor kennis en innovatie (EF2-3)
- ontwikkeling van de toegevoegde duin- en intergetijde gebieden (EF3-1)
- beleving en waardering van de Zandmotor (EF3-2)



De evaluatievragen vanuit het beheer van de Zandmotor richten zich op :

- effecten op recreatieveiligheid en mogelijke beheersmaatregelen (EF4-1)
- verenigbaarheid van de natuur- en recreatie doelstellingen (EF4-2)
- effecten op grondwater (EF4-3)
- overstuiving van zand en zout naar de bestaande duinen (EF4-4)
- eventuele effecten op de havengeulen van Scheveningen en Rotterdam (EF4-5)

Opgemerkt wordt dat de vragen worden gesteld door verschillende stakeholders. Rijkswaterstaat, de Provincie Zuid-Holland en Dunea hebben in een convenant afgesproken om gezamenlijk de monitoring en evaluatie van de MER en beheer vragen te doen. De evaluaties van de fysische en natuur ontwikkeling alsmede kennisontwikkeling en effecten op de bestaande duinen en vaargeulen vallen onder verantwoordelijkheid van Rijkswaterstaat die hiervoor Deltares en WMR als uitvoerende partijen heeft ingeschakeld. De provincie Zuid-Holland is verantwoordelijk voor de vragen met betrekking tot recreatie (in relatie tot natuur), zwemveiligheid, grondwater, metingen van overstuiving, beheer van het strand en gebruik/waardering van de Zandmotor. De effecten van de Zandmotor op grondwater worden door Dunea gemonitord.

## 1.5 Stakeholders

Er zijn verschillende belanghebbenden bij de Zandmotor welke worden onderscheiden als initiatiefnemers, belanghebbenden, onderzoekers en gebruikers/omwonenden. De initiatiefnemers hebben de Zandmotor aangelegd vanuit hun belang in kustlijn zorg, recreatie en natuur.

- Initiatiefnemers
  - Rijkswaterstaat (WVL, DGW)
  - Provincie Zuid-Holland
- Belanghebbenden
  - Dunea
  - Natuurorganisaties (Zuid-Hollands landschap, ARK)
  - Hoogheemraadschap (Delfland)
  - Gemeenten (Monster, Den Haag-Kijkduin)
  - Reddingsbrigade (Monster en Kijkduin)
  - Bedrijven in recreatie (o.a. kite surfschool, strandtenten)
- Onderzoekers
  - Universiteiten (Technische Universiteit Delft, Universiteit Twente, Universiteit Utrecht, Wageningen universiteit, Vrije Universiteit van Amsterdam)
  - Kennisinstituten (Deltares, WMR en NIOZ)
- Gebruikers en omwonenden
  - Strandbezoekers
  - Omwonenden

## 1.6 Monitoringprogramma

Om gegevens over de ontwikkeling van de Zandmotor te verzamelen is een monitoringprogramma opgesteld (Tonnon et al., 2011). Het monitoringprogramma beschouwt de omgevingscondities, bodemhoogte ontwikkeling (morfologie en sediment samenstelling) en natuur (vegetatie, bodemdieren en vogels) van de vooroever, het strand en de duinen (Figuur 1.2). Doel van deze metingen, die namens Rijkswaterstaat worden uitgevoerd, is om inzicht te krijgen in de effecten van de Zandmotor op het fysische systeem (o.a. verspreiding van zand)

en ecologie. De beheerder wil informatie over het gebruik van het strand, de effectiviteit van de maatregelen voor natuur en recreatie en de invloed op de omgeving (o.a. grondwaterstand, havengeul en natuur van de duinen). Namens Deltares worden de onderaannemers Shore monitoring, Arens bureau voor strand- en duinonderzoek en Vertegaal ecologisch advies ingezet voor metingen en analyse.

Daarnaast wordt door de Provincie Zuid-Holland onderzoek gedaan naar de meerwaarde van de Zandmotor op de omgeving (beleving en waardering), recreatie en beheer alsmede de invloed op recreatieveiligheid en grondwater. Door Dunea wordt de monitoring uitgevoerd van het grondwater en de inwinning van gegevens over zand- en zoutspray.



\* door Wageningen Marine Research (WMR)

\*\* door de Provincie Zuid-Holland

\*\*\* door Dunea

Figuur 1.2 Overzicht van monitoring op de Zandmotor

## 1.7 Externe onderzoeksprogramma's

Ten behoeve van de evaluatie van de Zandmotor voeren Deltares en WMR onderzoek uit in opdracht van Rijkswaterstaat. Dit betreft analyses van de zandbalans van de Zandmotor en aangrenzende Delflandse kust, sorteringsprocessen op de kust, veranderingen van de bodemdiergemeenschappen op de vooroever en in de lagune, alsmede de invloed van de Zandmotor op de vegetatie van de bestaande duinen welke gemonitord wordt door Dunea. Er vinden ook onderzoeken plaats bij de universiteiten. De volgende universiteiten zijn betrokken bij het onderzoek naar de Zandmotor en analyse van gegevens:

- Technische Universiteit Delft  
Binnen de onderzoeksprogramma's NatureCoast en NEMO heeft onderzoek plaats gevonden naar 1) de morfologische ontwikkeling van de Zandmotor, 2) sortering van sediment, 3) verspreiding van zand door windtransport in relatie tot zandbeschikbaarheid in het intergetijdengebied en 4) grootschalige stromingen en muien in relatie tot zwemveiligheid.
- Universiteit Utrecht  
Vanuit de programma's NatureCoast en 'Aeolus meets Poseidon' is onderzoek gedaan naar 1) het gedrag van banken op de kust op basis van video-waarnemingen, 2) invloed van de Zandmotor op grondwater 3) invloed op milieukwaliteit en 4) windtransport op het strand en de relevantie van de vochtigheid van de bodem.
- Technische Universiteit Twente  
Onderzoek vindt plaats naar met name de patronen van windgedreven transport op het strand vanuit de NatureCoast en Shorescape projecten.
- Wageningen universiteit  
De nieuwe begroeiing dicht bij het duin en daarmee samenhangende groei van duinen is onderzocht. Tevens is onderzocht hoe platvissen reageren op veranderingen in bodemsamenstelling. Allen binnen het NatureCoast project.
- Vrije Universiteit van Amsterdam  
Onderzoek is gedaan naar bodemdieren in het intergetijdengebied (NatureCoast).
- Netherlands Institute for Ocean Research (NIOZ)  
De invloed van de Zandmotor op de bodemdieren is onderzocht (NatureCoast).

## 1.8 Leeswijzer

Dit rapport bespreekt in Hoofdstuk 2 de ontwikkeling van de vorm van de Zandmotor in relatie tot duingroei. Hierna volgt de natuurontwikkeling op de Zandmotor in Hoofdstuk 3, waarna de beheersvragen worden besproken in Hoofdstuk 4. Een overzicht van bevindingen met betrekking tot de beantwoording van de vragen en eventuele kennislacunes wordt gegeven in Hoofdstuk 5.

## 2 De Zandmotor voor kustveiligheid

### 2.1 Introductie

Dit hoofdstuk biedt een inventarisatie van kennis over de morfologische ontwikkeling van de Zandmotor ten behoeve van een toekomstige evaluatie van de eerste MER doelstelling en bijbehorende evaluatievraag EF1-1. Hiervoor is het van belang om te begrijpen wat er met het gesuppleerde zand van de Zandmotor gebeurd is sinds aanleg, én welke lessen hieruit getrokken kunnen worden.

*MER doelstelling 1(a) : "Het stimuleren van natuurlijke duinaangroei in het kustgebied tussen Hoek van Holland en Scheveningen."*

*EF1-1: Zorgt de Zandmotor langjarig voor instandhouding van kustfundament en basiskustlijn en in welke mate in ruimte en tijd leidt dit tot natuurlijke duinaangroei, in het kustgebied van Hoek van Holland tot Scheveningen?*

Opgemerkt wordt dat evaluatievraag EF1-1 naast de natuurlijke duinaangroei ook de instandhouding van kustfundament (i.e. de actieve kust van diep water tot aan de duinen) en de basiskustlijn (i.e. vastgestelde minimale kustlijnpositie) noemt. Reden hiervoor is dat de ontwikkeling van de duinen niet los gezien kan worden van de ontwikkeling van de onderwateroever van de kust.

Paragraaf 2.2 beschrijft de waargenomen ontwikkelingen van de Zandmotor (i.e. landschapsvormende processen), waarna ook de morfologische ontwikkeling van de bijbehorende vooroeveropbouw in Paragraaf 2.3 wordt toegelicht. Paragraaf 2.4 combineert de kennis over de morfologische ontwikkeling van de Delflandse kust daarna in een sedimentbalans. Vervolgens wordt teruggekoppeld op de evaluatievraag en de afgeleide subvragen over de kust en duinen (Paragraaf 2.5).

### 2.2 Morfologische ontwikkeling van de Zandmotor

De Zandmotor is aangelegd in een haakvorm met een zeewaartse uitbouw van circa 1 km die dynamisch mag vervormen in de tijd (Figuur 2.1). Onder invloed van golven en getij wordt dit zand voornamelijk kustlangs verspreid, waardoor erosie plaats vindt op de kop van de Zandmotor en aanzanding op de aanliggende kust. Er ontstond daarom al snel een klokvorm die langzaam breder werd in kustlangse richting en smaller in kustdwarse richting.

Vanaf de aanleg in 2011 tot augustus 2019 heeft ongeveer 450 meter erosie plaats gevonden op het meest zeewaartse punt van de Zandmotor. Met name in de eerste 3 jaar na aanleg van de Zandmotor was sprake van sterke erosie die vooral in het winterseizoen plaats had tijdens stormen. Ook onderwater treedt erosie op, maar de snelheid waarmee dit plaats vindt is lager in dieper water (ongeveer half zo snel op 5 tot 8 meter waterdiepte). Op circa 5 meter waterdiepte is hierdoor een zekere mate van afvlakking van de vorm van de Zandmotor te zien. In feite is de steilheid van het kustprofiel minder groot geworden. Door de afnemende kustdwarse breedte van de Zandmotor in combinatie met een flauwer wordend profiel neemt de erosie van de Zandmotor én transport naar de omliggende kust over de jaren langzaam af.

Zand van de kop van de Zandmotor wordt langs de kust verplaatst in noordelijke en zuidelijke richting, waardoor zich aan de noordzijde een landtong ('spit') ontwikkelt die al binnen vijf

maanden na aanleg vergroeit met de kust. Aan de zuidzijde ontstond een breed aanzandingsgebied wat tijdens hoogwater onderloopt. De aanzandingsgebieden aan beide zijden van de Zandmotor blijven zich in de jaren erna uitbreiden. Aan de noordelijke flank direct noordelijk van de Zandmotor is de kust lokaal tot 300 meter verder zeewaarts gelegen in 2019. De aanzanding aan de zuidzijde van de Zandmotor van ongeveer 200 meter vond voornamelijk plaats in de eerste 2 jaar na aanleg van de Zandmotor.



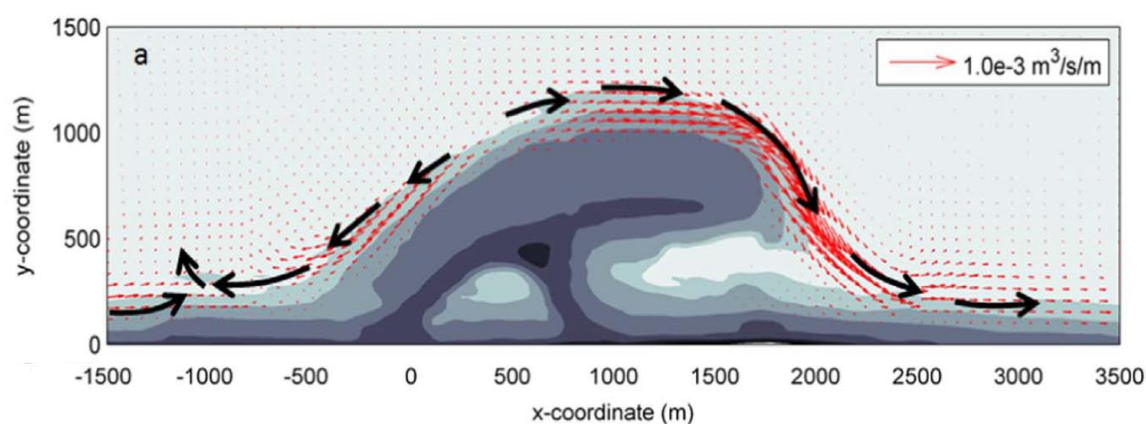
Figuur 2.1 De Zandmotor tijdens laag water op een moment kort na aanleg in 2011 (a) en oktober 2013 (b)

### 2.2.1 Brandingszone

De branding is de meest energieke zone van de kust, omdat brekende golven en getijstromingen hier sterk zijn. Kustdwars bevindt de brandingszone zich tussen de hoogwaterlijn en de 8 meter dieptecontour. Ook voor de verspreiding van het zand van de Zandmotor is dit de meest actieve zone.

Uit analyses blijkt dat met name de golven een belangrijke invloed hebben op de verspreiding van het zand in de brandingszone bij de Zandmotor. Luijendijk et al. (2017) laat zien dat met name de golven een grote invloed hebben op het verplaatsen van het zand van de haak naar de flanken (i.e. 74% van het geërodeerd volume zand). Als de golven schuin aankomen op de kustlijn (i.e. niet loodrecht) dan zorgen ze voor een sterke stroming die zand verplaatst naar een rustiger locatie langs de kust. Die rustige locaties zijn bij de Zandmotor met name aanwezig op de flanken (Figuur 2.2), waar als gevolg dan ook sterke aanzanding optreedt. De beschikbare golfenergie is de belangrijkste bepalende factor voor de snelheid waarmee de Zandmotor zich ontwikkelt in de tijd. Tijdens de stormen in de winterperiode is dan ook een duidelijk sterkere ontwikkeling te zien (De Schipper et al., 2016). Het maakt voor de levensduur van de Zandmotor (i.e. hoe de kop terug schrijdt) maar weinig uit wat de precieze richting is van waaruit de golven binnenkomen, terwijl de golfhoogte er wel veel toe doet (Tonnon et al., 2018). Bij de Zandmotor vallen de meeste golven schuin vanuit het zuiden binnen, waardoor zand noordwaarts wordt verplaatst. Het grootste deel van het geërodeerde zand van de Zandmotor wordt dus aan de noordkant afgezet. De aanzanding aan de zuidkant wordt echter niet alleen gevoed door de Zandmotor, maar ook door het natuurlijke noordwaartse transport langs de kust. De kustlangse herverdeling van zand bij de Zandmotor kan zowel met een gebiedsmodel als een kustlijnmodel worden gerepresenteerd, zolang het maar golfgedreven langstransport meeneemt (Luijendijk et al., 2017; Tonnon et al., 2018; Huisman et al., 2018b).

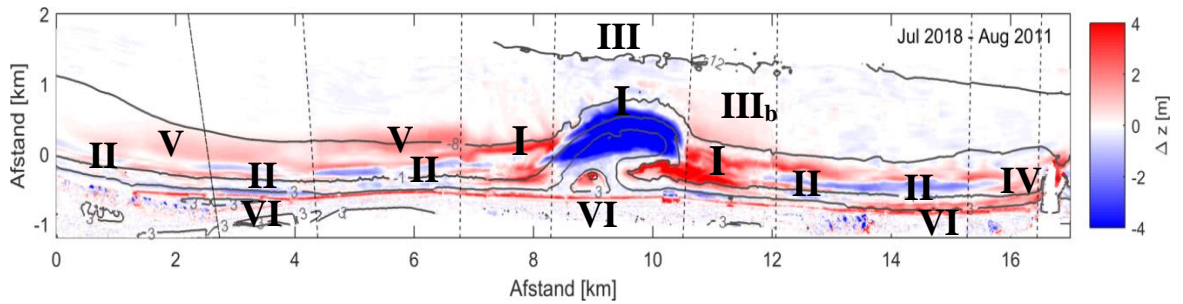
Getij- en windgedreven stromingen kunnen de lange-termijn vormverandering van de Zandmotor maar beperkt beïnvloeden. De wind- en getijgedreven stromingen zorgen voor slechts 5% extra erosie bij de haak van de Zandmotor, terwijl de verticale verandering van de waterstand door het getij tot 17% bijdraagt aan de erosie van de haak van de Zandmotor (Luijendijk et al., 2017). De waterstandsvariatie zorgt er in feite voor dat de golven ook het diepere deel van het kustprofiel beïnvloeden (i.e. tijdens laag water), waardoor de erosie meer gespreid wordt over de hoogte en de teruggang van de kust minder snel is.



Figuur 2.2 Jaargemiddelde verspreiding van zand bij de Zandmotor als gevolg van golven (Luijendijk et al., 2017)

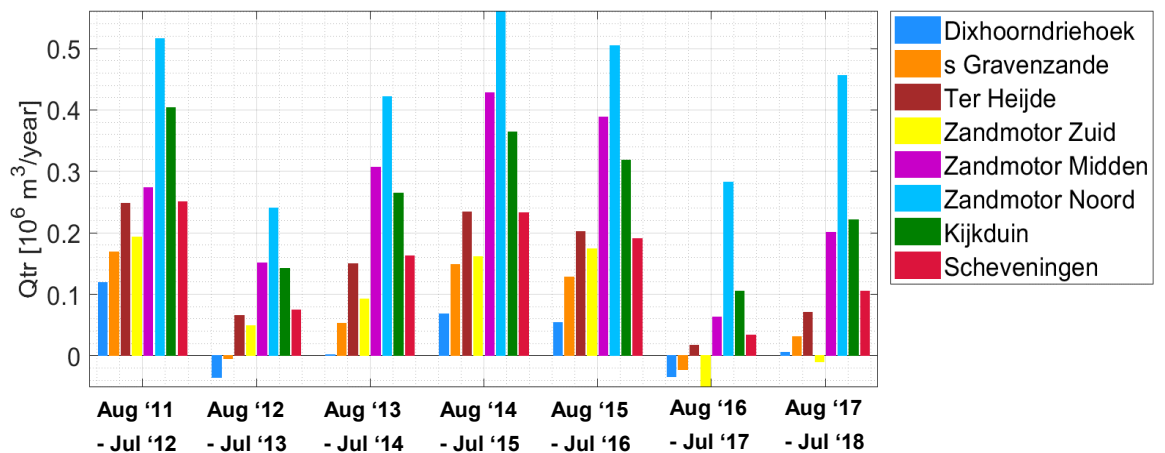
De waargenomen veranderingen in bodemhoogte voor de Delflandse kust laten de invloed van de golven ook zien, aangezien er sterke erosie te zien is bij de haak van de Zandmotor en aanzanding op de aanliggende kust (zie I in Figuur 2.3). In de brandingszone van de omliggende kust is afwisselend erosie en sedimentatie te zien door de ontwikkeling van zandbanken (zie II). In dieper water is erosie zichtbaar zeewaarts van de Zandmotor (III) en lichte aanzanding aan de noordzijde (III<sub>b</sub>). Bij Scheveningen is accumulatie van zand zichtbaar

(IV) en een toename in zandvolume bij de vooroeversuppleties (V). Ook in de duinen is op de meeste plaatsen een toename van de hoogte te zien (VI).



Figuur 2.3 Sedimentatie (rood) en erosie (blauw) op basis van de gemeten bodemligging tussen Augustus 2011 en Juli 2018. De zwarte lijnen geven de deelgebieden aan (Huisman et al., 2018b).

Berekeningen van de zandtransporten op de Delflandse kust (Huisman et al., 2018b) over de periode van augustus 2011 tot juli 2018 laten zien dat er een netto noordwaarts transport is richting Scheveningen, maar dit transport varieert aanzienlijk per jaar (Figuur 2.4). In sommige jaren (o.a. van augustus 2011 tot juli 2012) was het transport in de regio Ter Heijde tussen de 200,000 en 300,000 m<sup>3</sup>/jaar, terwijl dat voor de andere periodes juist heel laag was (bijv. in augustus 2016 tot juli 2017 slechts 20,000 m<sup>3</sup>/jaar). Ter plaatse van de havendammen van Scheveningen wordt een transport geschat van ~90,000 m<sup>3</sup>/jaar (geschatte range van 0 tot 0.2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) op basis van berekeningen met een kustlijnmodel (Huisman et al., 2018b).

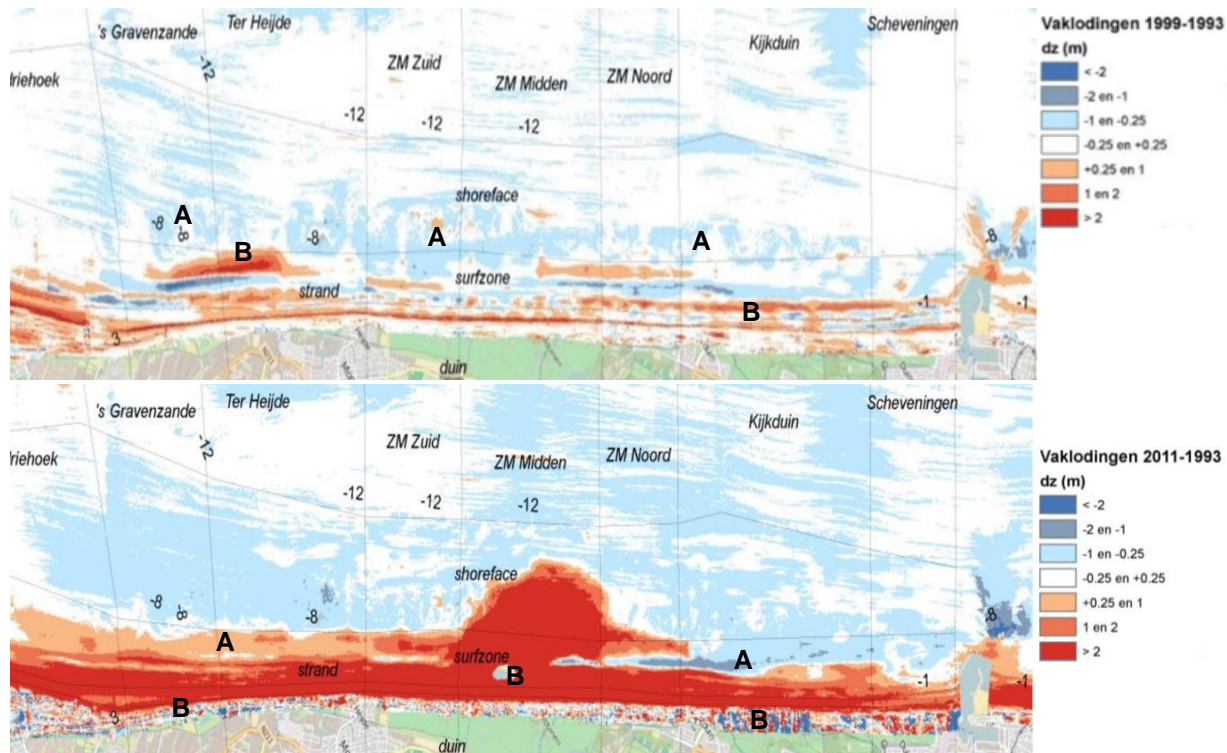


Figuur 2.4 Gemodelleerde netto jaarlijkse sedimenttransporten op de Delflandse kust voor de periode 2011 tot 2018. De deelgebieden zijn met gekleurde symbolen weergegeven (Huisman et al., 2018b).

### 2.2.2 Diepe voorover

Op de diepe voorover van de Delflandse kust treedt zowel voorafgaand als na aanleg van de Zandmotor hoofdzakelijk erosie op (alle blauwe gebieden; zie A in Figuur 2.5). Deze ontwikkeling wijkt af van de ondiepe voorover (tot 8 meter waterdiepte) waarin vooral volumetoename te zien als gevolg van de duinversterkingen en zandsuppleties (o.a. de Zandmotor en vooroeversuppleties; zie B). De volumeveranderingen van de diep-water voorover tussen 8 en 12 meter waterdiepte laten een aanzienlijk volumeverlies zien over de

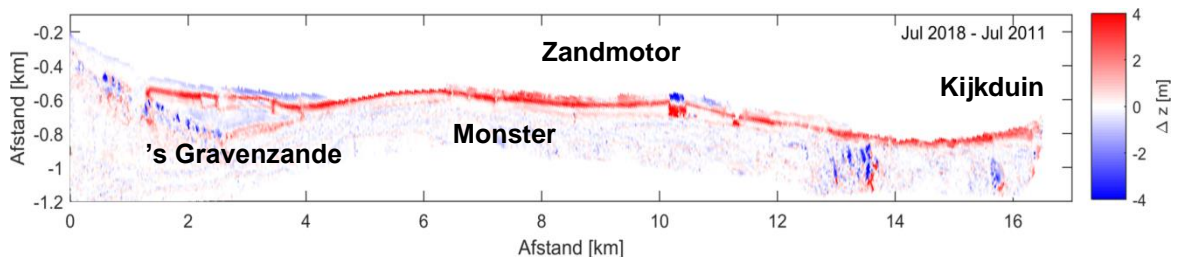
beschouwde periode tot 2018 (-0.77 miljoen m<sup>3</sup>). Op basis van literatuurkennis over de Delflandse kust (Van Rijn, 1997; Radermacher et al., 2018) en het effect van dichtheidsgedreven stromingen (De Boer, 2009) wordt verwacht dat sediment van de diepe vooroever richting de brandingszone wordt verplaatst. Erosie op de diepe vooroever levert hiermee een relevante bijdrage aan de sedimentbalans van de kust. Tevens vindt er op de diepe vooroever erosie plaats zeewaarts van de Zandmotor en afzetting van dit sediment op het aangrenzende deelgebied noordelijk van de Zandmotor (zie Figuur 2.3), wat tevens zorgt voor sortering van bodemmateriaal (Huisman et al., 2018).



Figuur 2.5 Bodemverandering in Vaklodgingen voor de periode 1993 – 1999 en 1993 - 2011 uit Tonnon en Nederhoff (2016). De kustlangse en kustdwarse deelgebieden zijn aangegeven met een grijze lijn.

### 2.2.3 Duinen

De duinhoogte van de eerste rij duinen is voor de hele Delflandse kust toegenomen in de periode van 2011 tot en met 2018 (Figuur 2.6). Totaal is het duinvolume met circa 1.57 miljoen m<sup>3</sup> toegenomen over de periode 2011 tot 2018. Deze duingroei is het gevolg van een landwaarts transport van zand door de wind vanaf het strand naar de duinen.



Figuur 2.6 Verschil in bodemligging van het duingebied tussen 2018 en 2011 (Huisman et al., 2018b).



Gemiddeld bedroeg het dwarstransport naar de duinen 13.6 m<sup>3</sup>/m/jaar over de periode van 2011 tot en met 2018. Vooral de eerste duinenrij is in hoogte toegenomen. Het gemiddelde transport varieert van 8 m<sup>3</sup>/m/jaar bij Hoek van Holland tot 21 m<sup>3</sup>/m/jaar voor deelgebied Zandmotor-Zuid en Scheveningen. Dit komt overeen met schatting van het windtransport naar de duinen voor de eerste 4 jaar na aanleg van de Zandmotor van 14 tot 19 m<sup>3</sup>/m/jaar voor het centrale en noordelijke deel van de Delflandse kust (Hoonhout & De Vries, 2017). Deze volumes zijn vergelijkbaar met de waargenomen duingroei vóór aanleg van de Zandmotor in de periode 1999 tot 2008 (Arens et al., 2010). Toen was met name tussen Hoek van Holland en Ter Heijde sprake van duingroei.

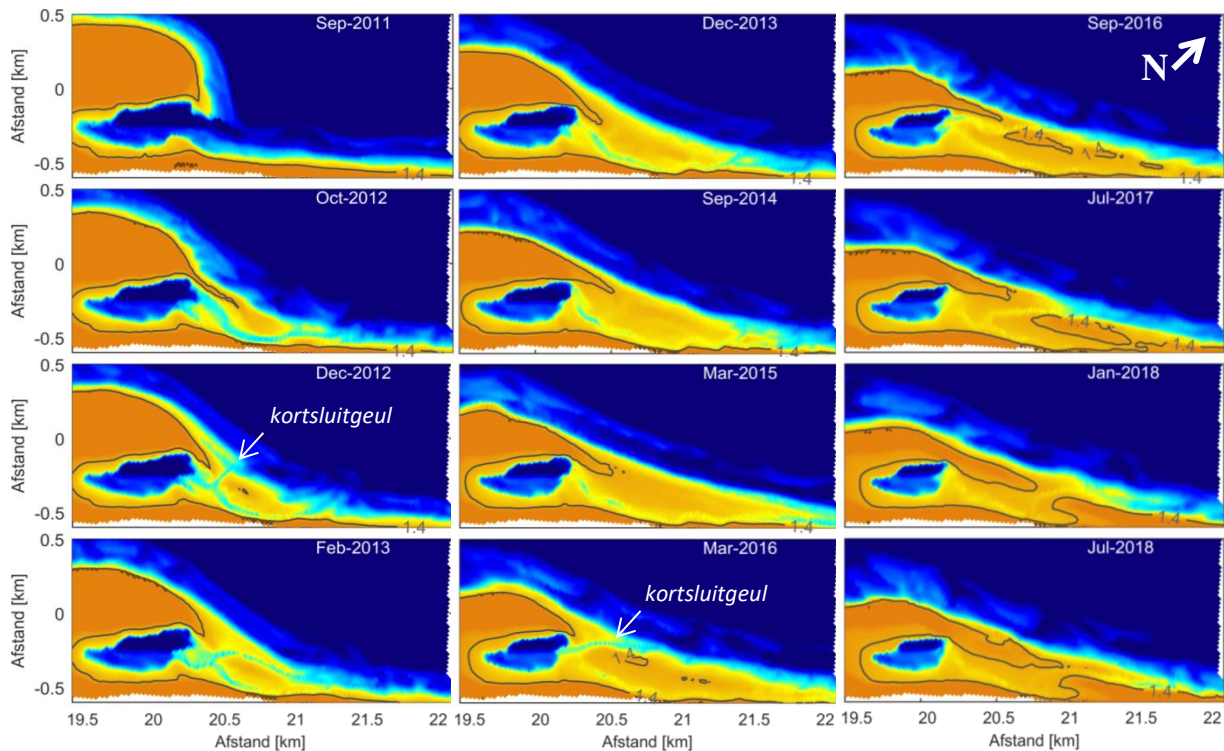
De zeewaartse zijde van de duinen bij 's Gravenzande is in 2018 (ter plaatse van de 'duincompensatie Maasvlakte 2') aanzienlijk geërodeerd is ten opzichte van 2011 (Figuur 2.6). Verwacht wordt dat dit het resultaat is van additionele duinerosie na stormen, omdat dit gebied aanzienlijk zeewaartse is uitgebouwd. Echter direct achter de eerste duinen trad aanzienlijke sedimentatie op, wat er op duidt dat er niet enkel verlies was door stormerosie, maar ook landwaarts transport. Het landwaartse eolische transport is dus zonder uitzondering waar te nemen langs de hele Delflandse kust

Opvallend is dat de aangroeisnelheid van de bestaande duinen bij de Zandmotor niet wezenlijk anders is dan voor de omliggende kust. De reden hiervoor is dat een deel van het windtransport wordt ingevangen het duinmeer en in de lagune (Hoonhout & De Vries, 2017). Als dit ingevangen zand wordt meegenomen in de balans dan blijkt het windtransport bij de Zandmotor groter dan voor de rest van de Delflandse kust (~27 m<sup>3</sup>/m/jaar). Overigens wordt verwacht dat dit relatief fijne zand in de lagune en het duinmeer in de toekomst (~10 à 20 jaar) weer beschikbaar komt voor transport naar de duinen zodra de haak van de Zandmotor is geërodeerd en het sediment door getijden en golven weer beschikbaar komt in het intergetijdengebied.

#### **2.2.4 Duinmeer en lagune**

Het duinmeer en de lagune zijn in de eerste jaren langzaam veranderd door instuiving van zand. Hierdoor verondiepen de lagune en het duinmeer langzaam en neemt het oppervlak af. De bron van het ingestoven zand blijkt te liggen in de intergetijdzone van het strand van de Zandmotor, van waaruit fijn zand beschikbaar komt om meegenomen te worden door de wind richting de lagune en het duinmeer (Hoonhout et al., 2017). Het oppervlak van de Zandmotor boven de hoogwaterlijn levert een relatief geringe bijdrage aan het transport van zand naar de lagune en het duinmeer, omdat deze zo hoog ligt dat hier door uitstuiving een schelpenvloer is ontstaan. Deze schelpenvloer verhindert in zekere zin dat verstufbaar zand door de wind kan worden opgepakt.

De verbinding tussen de lagune en de zee bestaat na de aansluiting van de landtong op de kust uit een smalle geul (Figuur 2.7). Elk getij verloopt het vullen en ledigen van de lagune via deze geul. Deze geul loopt langs het reeds bestaande strand noordelijk van de Zandmotor. In het eerste jaar na aanleg is de geul smal, diep en relatief kort. Met het uitspreiden van het sediment van de Zandmotor wordt de geul langer (1200 m in oktober 2012, 1500 m in maart 2015 en 2000 m in juli 2018) en steeds ondieper, waarna er op zeker moment een kortsluitgeul ontstaat. De contourlijn in Figuur 2.7 is op het niveau van hoogwater (springtij) en laat zien dat er tot aan juli 2018 water door de geul stroomt bij hoogwater. Door de langere geullengte en het ondieper worden van de geul zijn de waterstandsvariaties in de lagune sterk afgenomen.



Figuur 2.7 Ontwikkeling van de geul aan de noordflank van de Zandmotor in de afgelopen 7 jaar. De contourlijn geeft de hoogwater niveau aan (Huisman et al., 2018b).

Op twee momenten in de afgelopen zeven jaar is te zien dat er een tweede (kortere) geul ontstaat die de lagune met de zee verbindt (zie december 2012 en maart 2016 in Figuur 2.7). In beide gevallen migreert de tweede geul vervolgens noordwaarts richting het strand en verdwijnt ten slotte wanneer deze te dicht bij de dicht bij het strand liggende hoofdgeul komt.

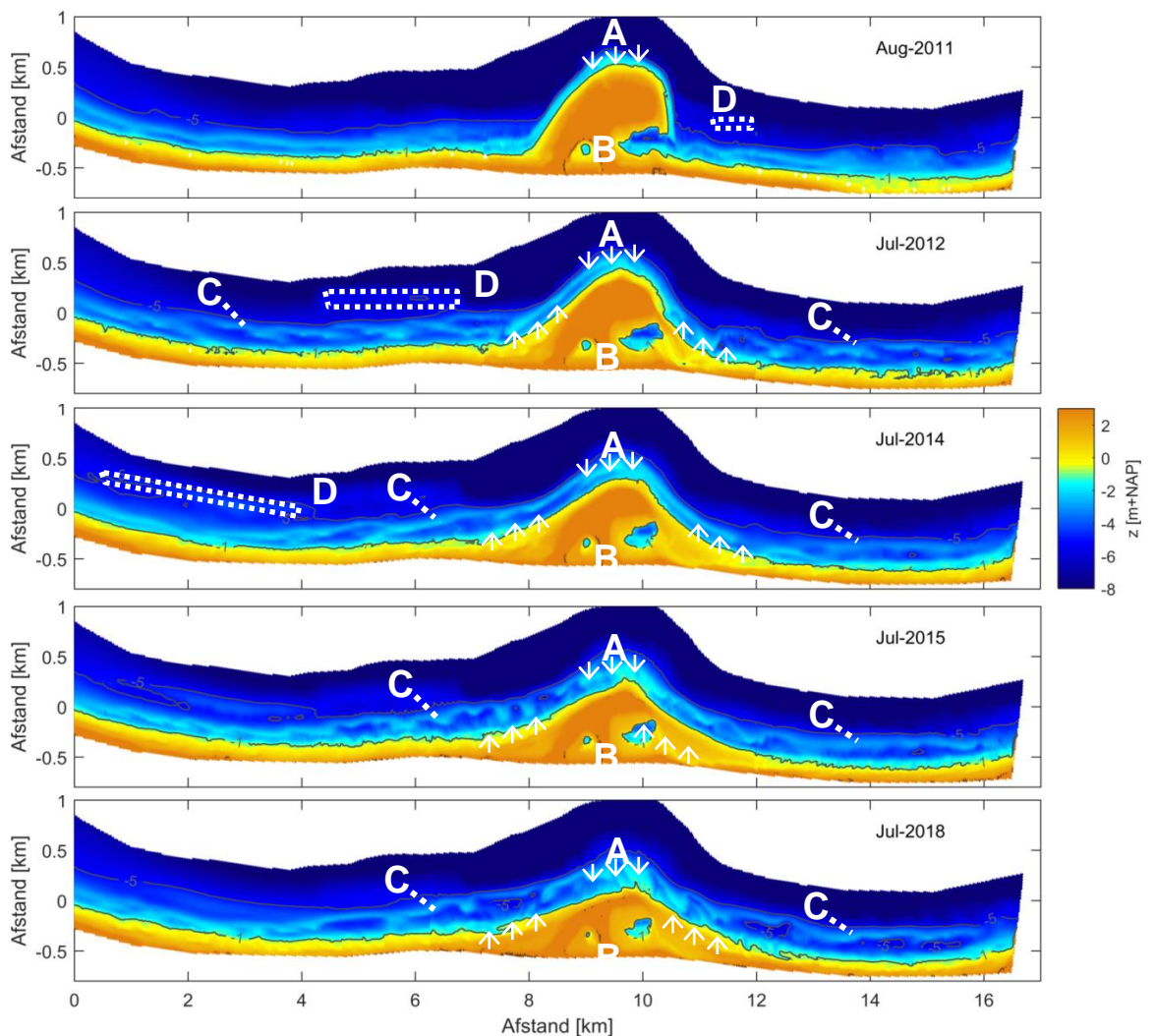
## 2.2.5 Dynamiek zandbanken

In aanvulling op de erosie van de Zandmotor (A in Figuur 2.8) en ontwikkeling van de lagune (B) kunnen ook ontwikkelingen onder water worden onderscheiden. Dit betreft het ontstaan van complexe zandbanken op circa 4 meter waterdiepte (C) en de verspreiding van onderwater geplaatste kunstmatige zandbanken voor kustversterking (D) ook wel vooroeversuppleties genoemd.

Na de aanleg van de Zandmotor wordt een complexer zandbanken patroon waargenomen, met meer variatie in de vorm langs de kust. Dit is een trend die al eerder gestart is. Radermacher et al. (2018) laat namelijk zien dat er als gevolg van zandsuppleties in de afgelopen 40 jaar steeds meer zandbanken zijn op de Delflandse kust. Voor het suppletieprogramma waren er vrijwel geen zandbanken. Ook de Zandmotor heeft hier een (mogelijk tijdelijk) versterkend effect op de zandbanken.

Door de tijd heen verandert het type zandbank een aantal keer van een langgerekte kustlangse zandbank naar meer onregelmatige vormen met meer variatie. Op de zuidelijke flank van de Zandmotor is in de eerste jaren na aanleg van de Zandmotor (2012 tot 2014) bijvoorbeeld een langgerekte kustlangse bank te zien (Figuur 2.8), terwijl het bankpatroon aan de noordflank in de eerste twee jaren meer onregelmatig is. In juli 2014 is er echter zowel aan de noord- als zuidflank een kustlangs uniforme zandbank te zien. Vanaf juli 2015 verandert dit vervolgens in een bankenpatroon met veel kustlangse variabiliteit voor beide flanken, afgezien van de zuidflank in juli 2017.

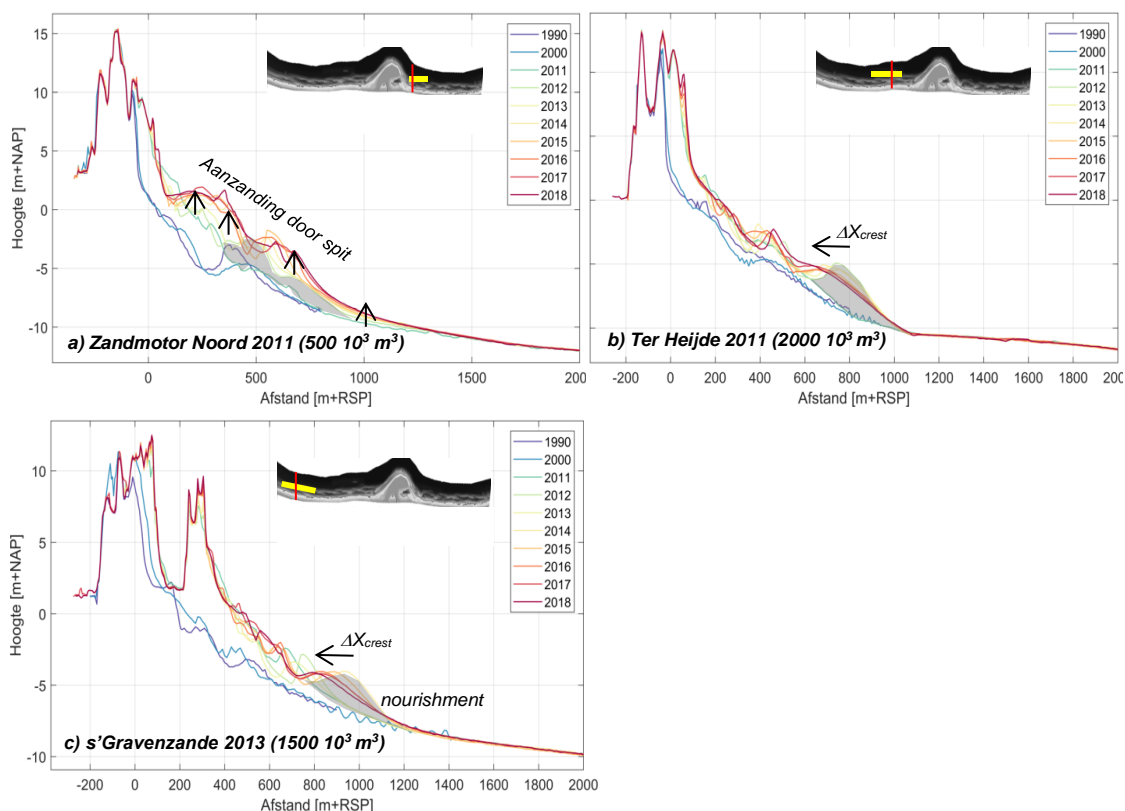
Een verklaring voor dit complexe bankengedrag rondom de Zandmotor wordt gegeven door Rutten et al. (2018) op basis van camerabeelden van het gedrag van de zandbanken rondom de Zandmotor voor de periode tussen maart 2013 en juli 2015. Rutten et al. (2018) concluderen dat de variatie van de banken (vorm, diepte en afstand tot de kustlijn) voornamelijk wordt bepaald door de invalshoek waarmee de zwaardere golven tijdens een storm binnen komen ten opzichte van de oriëntatie van de kustlijn. De kustlangse variabiliteit van banken aan de noordflank nam toe gedurende een langere periode met vanuit het noorden komende golven in de zomer (i.e. loodrecht op de noordelijke flank), terwijl aan de zuidflank de variabiliteit toenam na enkele kortdurende zuidwestelijke stormen. Bij zijdelings invallende golven nam de kustlangse variabiliteit aan beide flanken af. Opvallend genoeg is de golfrichting dus erg belangrijk voor het bankenpatroon, terwijl de golfrichting een kleine invloed heeft op de levensduur of erosie van de Zandmotor (Tonnon et al., 2018).



Figuur 2.8 Bodemligging Delflandse Kust tussen -8m en 3m NAP (dieptezone strand en brandingszone) vlak na aanleg van de Zandmotor (augustus 2011) tot en met juli 2018 (Huisman et al., 2018b).

## 2.3 Morfologie van vooroeversuppleties

De zandige kustversterkingen ter plaatse van de zandbanken ('vooroeversuppleties'; D in Figuur 2.8) zijn op drie plaatsen geplaatst om de omliggende kust te beschermen tegen verwachte erosie die door natuurlijke erosie zuidelijk van de Zandmotor zou plaats vinden en ter compensatie van een mogelijke tijdelijke erosie direct noordelijk van de Zandmotor. De vooroeversuppleties naast de Zandmotor in 2011 (noord 0.5 miljoen m<sup>3</sup> en zuid 2.0 miljoen m<sup>3</sup>) en de vooroeversuppletie bij 's Gravenzande in 2013 (1.5 miljoen m<sup>3</sup>) zorgden voor een sterke toename in volume in de ondiepe kustzone (zie IV in Figuur 2.3). De vooroeversuppletie bij 's Gravenzande werd uitgevoerd om de basiskustlijn op deze plek te handhaven.



Figuur 2.9 Dwarsprofielen ter hoogte van de uitgevoerde vooroeversuppleties. Het grijs gearceerde gebied geeft het toegevoegde sediment van de suppletie weer voor de desbetreffende dwarsraai. De rode lijn in het overzichtskaartje is een indicatie van de locatie van de dwarsraai, terwijl de vooroeversuppletie indicatief is weergegeven met een gele markering (Huisman et al., 2018b).

Deze vooroeversuppleties zijn zeewaarts aangelegd van de bestaande banken én duwen de bestaande banken richting de kust (Figuur 2.9b en Figuur 2.9c). Ook valt te zien dat de kruin van zowel de suppletie bij Ter Heijde (najaar 2011) en 's Gravenzande (najaar 2013) richting de kust migreert. Bij de Zandmotor is dus sprake van een overwegend kustlangse verspreiding van zand, terwijl vooroeversuppleties juist zorgen voor een kustdwarse zandverplaatsing (Huisman, 2019).

De vooroeversuppletie die noordelijk van de Zandmotor werd geplaatst werd al op korte termijn begraven onder sediment dat aangevoerd werd vanaf de kop van de Zandmotor (Figuur 2.9a). Deze suppletie vormde in feite een ondiepe zone waarover de landtong ('spit') van de Zandmotor zich vanaf 2012 heeft kunnen ontwikkelen.

Op basis van literatuurkennis wordt verwacht dat de vooroeversuppleties een geleidelijke bijdrage leveren aan de zandbalans van de ondiepe brandingszone (Van Duin et al., 2004; Huisman et al., 2019). Voor de korte-termijn ontwikkeling van vooroeversuppleties is het daarom belangrijk om het dwarstransport naar de kust toe mee te nemen. Ook zien we dat er tijdelijk minder kustlangse variabiliteit is in het bankenpatroon op de plaats waar een vooroeversuppletie is neergelegd.

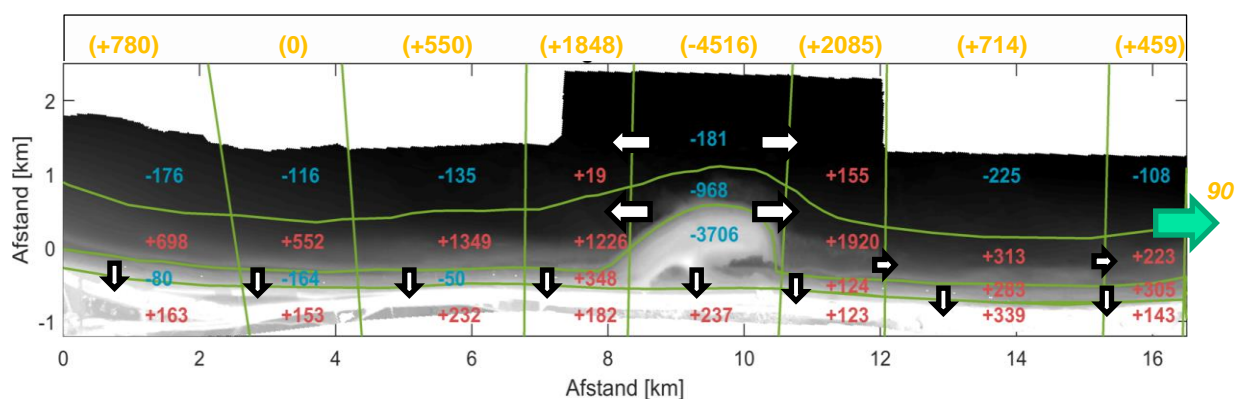
## 2.4 Sedimentbalans Delflandse kust

Het totaalbeeld van de volumeveranderingen tussen 2011 (na aanleg van de Zandmotor) en 2018 langs de Delflandse kust, per deelgebied en dieptezone, is weergegeven in Figuur 2.10 (Huisman et al., 2018b). Deze volumes zijn gecompenseerd voor de vooroeversuppleties ter hoogte van Ter Heijde, Zandmotor-Noord en 's Gravenzande, welke zijn afgetrokken van de volumeverandering in de strand- & brandingszone. Wanneer de sedimentbalans over alle dieptezones en deelgebieden wordt gemaakt, resulteert dit in een relatief beperkte toename van het volume van 370,000 m<sup>3</sup> over de beschouwde 8 jaar (zie Tabel 2.1). Opgemerkt wordt dat deze toename in het volume van de Delflandse kust verklaard dient te worden vanuit de nauwkeurigheid van de metingen op de diepe voorover en eventuele onnauwkeurigheden in de suppletievolumes.

Tabel 2.1 Volumeverandering binnen het Delflandse kustvak tussen 2018 en 2011

<i>volumeverandering 2018-2011</i>	<i>Volume excl. suppleties [10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>]</i>
duinen	1570
strand+brandingszone	-430
Diepe voorover	-770
alle dieptezones	370

Op basis van de kustlijnmodellering is ingeschat dat het transport bij Scheveningen 90,000 m<sup>3</sup>/jaar bedroeg voor de beschouwde periode (zie oranje pijl in Figuur 2.10), alhoewel dit per jaar wel sterk kan verschillen. Verwacht wordt dat dit een goede schatting is, omdat de berekende volumeveranderingen per deelgebied in het kustlijnmodel (voor de som van alle kustdwars zones) goed overeenkomen met de bodemhoogte metingen (zie oranje getallen in Figuur 2.10).



Figuur 2.10 Volumeverandering tussen 2011 en 2018 voor elk deelgebied en per dieptezone (in 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>). Toename in volume in rood en afname in blauw. De gemiddelde volumeverandering (kustdwars geïntegreerd; in 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>) en berekend netto langstransport (in 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/jaar) zijn weergegeven in oranje (Huisman et al., 2018b).

## 2.5 Zandtoename in primaire waterkering, basiskustlijn en kustfundament

Op basis van de sedimentbalans kunnen de drie sub-vragen over natuurlijke duingroei en kustveiligheid beantwoord worden. Deze vragen richten zich op 1) de invloed van de Zandmotor op natuurlijke groei van de duinen ('primaire waterkering'), 2) de bijdrage aan het handhaven van de kustlijn en 3) behoud van zand binnen het actieve deel van de kust ('kustfundament').

*EF1-1a: Hoe groot is de zandtoename in de kernzone van de primaire waterkering in ruimte en tijd sinds de aanleg van de Zandmotor?*

Uit de data-analyse van de volumeontwikkeling van de duinen komt naar voren dat er sprake is van een aangroei van circa 1.6 miljoen m<sup>3</sup> in de duinen van Delfland over de periode van augustus 2011 tot juli 2018. Gemiddeld gezien is sprake van een transport van 13.6 m<sup>3</sup>/m/jaar. Deze aanzanding vindt met name plaats bovenop en landwaarts van de eerste duinrij. De duinvoet verplaatste echter langzaam landwaarts (-0.78 m/jaar) over de periode 2012 tot 2018 als gevolg van transport naar de duinen waardoor deze hoger zijn geworden. De effecten op de veiligheid zijn echter klein, omdat het afslagpunt in de jaren 2009 tot 2011 aanzienlijk zeewaarts is verplaatst (i.e. +40 tot +80 m) als gevolg van de versterkingen in het kader van de kustversterking Delflandse kust (in 2008 en 2009) en aanleg van de Zandmotor (in 2011). Deze vraag is op basis van de beschikbare kennis dus goed te beantwoorden.

*EF1-1b: Welk deel van de extra hoeveelheid zand die is toegevoegd via de Zandmotor is nog aanwezig in het gebied en draagt nu en in de toekomst bij aan de handhaving van de basiskustlijn?*

De kustlijn is in de periode 2008 tot augustus 2011 gemiddeld 154 meter zeewaarts verplaatst (voor de gedefinieerde deelgebieden) door de aanleg van de 'kustversterking Delflandse kust' (in het kader van de Zwakke Schakels). Als gevolg van de Zandmotor is de MKL-positie lokaal (gemiddeld over het deelgebied Zandmotor-Midden) een additionele 500 meter zeewaarts verplaatst. Na de aanleg van de Zandmotor is sprake van een sterke teruggang van de MKL-positie ter plaatse van deelgebied Zandmotor-Midden van circa 50 m/jaar én een vooruitgang op de aanliggende deelgebieden Zandmotor-Noord en Zandmotor-Zuid van 5 tot 15 m/jaar. De MKL-positie bij Kijkduin is in de periode 2011 tot 2018 enigszins landwaarts verplaatst (2 m/jaar), maar verwacht wordt dat er in de komende jaren aanzanding zal plaats vinden als gevolg van toevoer van zand vanaf de Zandmotor. Voor de zuidelijke deelgebieden (Van Dixhoorndriehoek, 's Gravenzande en Ter Heijde) wordt ook in de komende jaren slechts een beperkte invloed verwacht van de zandmotor op de momentane kustlijnpositie, aangezien het sediment zich met name noordwaarts verplaatst. De lokale kustlijn is door de 'kustversterking Delflandse kust' echter dusdanig zeewaarts gelegd dat de basiskustlijn in de komende jaren in alle deelgebieden ook zonder additionele supplementies gehandhaafd blijft.

Van het sediment dat is gesuppleerd voor de Zandmotor (circa 17 miljoen m<sup>3</sup>) is een deel naar de duinen getransporteerd door eolische processen. Dit betrof circa 1.6 miljoen m<sup>3</sup> over de periode 2011 tot 2018, waarvan circa 540,000 m<sup>3</sup> ten goede is gekomen van duingebieden bij de Zandmotor (i.e. Zandmotor Zuid, Midden en Noord). Zandtransport naar dieper water lijkt zeer beperkt te zijn, aangezien de metingen suggereren dat er eerder een transport naar de kust toe plaats vindt. Tevens wordt op basis van de morfologische ontwikkelingen van de Zandmotor niet verwacht dat zand van de Zandmotor tot voorbij Scheveningen is getransporteerd. Ingeschat wordt daarom dat 90% tot 97% van het sediment van de haak van de Zandmotor (i.e. 17 miljoen m<sup>3</sup>) zich nog in de brandingszone en op het (aanliggende) strand bevindt én dus hoofdzakelijk kustlangs verplaatst is, terwijl het resterende deel naar de duinen

is getransporteerd. Deze vraag is op basis van de beschikbare kennis dus goed te beantwoorden.

*EF1-1c: Welk deel van de extra hoeveelheid zand die is toegevoegd via de Zandmotor is nog aanwezig in het kustfundament en hoe is dit daarbinnen verdeeld?*

Op basis van de gemeten bodemhoogteveranderingen is een sedimentbalans samengesteld voor de Delflandse kust over de periode van augustus 2011 tot juli 2018. Uit de sedimentbalans komt een bescheiden aanzanding naar voren van +0.37 miljoen m<sup>3</sup> voor de Delflandse kust over de beschouwde periode. Numerieke modellering van het golfgedreven langstransport geeft een transport van 90,000 m<sup>3</sup>/jaar (schatting van 0 tot 200,000 m<sup>3</sup>/jaar) naar het noorden bij Scheveningen. Dit natuurlijke noordwaartse transport van sediment bij Scheveningen komt daarna echter grotendeels ten goede van het kustfundament van de Rijnlandse kust (en van het strand noordelijk van Scheveningen). Zelfs het deel van het (natuurlijke) noordwaartse transport dat zal sedimenteren in de vaargeul van de haven van Scheveningen wordt weer teruggestort binnen het kustfundament, waardoor er netto geen verlies is. Vrijwel al het gesuppleerde zand van de Zandmotor is daarom nog aanwezig in het kustfundament van de Delflandse en Rijnlandse kust (i.e. in de duinen, strand, brandingszone en diepe vooroever). Deze vraag is op basis van de beschikbare kennis dus goed te beantwoorden.

## 3 Meerwaarde voor natuur en recreatie

### 3.1 Introductie

De Zandmotor is er op gericht om naast natuurlijke duinaangroei ook (tijdelijke) ruimte te creëren voor natuur en recreatie. Doel van dit hoofdstuk is om 1) te begrijpen wat de ontwikkeling van de natuur en recreatie is geweest in relatie tot de relevante fysieke omgeving op en rond de Zandmotor en 2) wat de meerwaarde is ten opzichte van andere wijzen van versterken van de kustlijn. De tweede en derde MER doelstelling benoemen deze meerwaarde en de ontwikkeling van recreatie- en natuurgebied:

*Doel 2 (MER): Het genereren van kennisontwikkeling en innovatie om de vraag te beantwoorden in welke mate deze vorm van kustonderhoud meerwaarde voor recreatie en natuur kan opleveren.*

*Doel 3 (MER): Het toevoegen van aantrekkelijk recreatie- en natuurgebied aan de Delflandse kust.*

Allereerst wordt in dit hoofdstuk de mogelijke meerwaarde van een grootschalige suppletie voor de natuur benoemd (EF2-2), wat in de deelvragen nader wordt toegespitst op het kunnen suppleren met een zo klein mogelijke impact op de bodemsamenstelling en bodemdiersamenstelling. Ook de vragen over natuur en recreatie voor MER doel 3 (EF3-1) sluiten nauw aan bij de kennisontwikkeling voor MER doel 2 en worden daarom in samenhang met de vragen van EF2-2 meegenomen.

*EF2-2: Heeft een megasuppletie als de Zandmotor een meerwaarde voor de natuur ten opzichte van reguliere suppleties? En waardoor wordt deze meerwaarde veroorzaakt?*

*EF3-1a: Zorgt de Zandmotor voor toevoeging van een aantrekkelijk natuurgebied op de Zandmotor zelf en in de jonge duinen tegen het bestaand duin?*

*EF3-1b: Hoe ontwikkelt de tijdelijke nieuwe natuur in het intergetijdengebied en de lagune van de Zandmotor zich? (i.e. nieuwe duinen, strandnatuur en lagune)*

Vervolgens wordt de eerste deelvraag voor MER doel 2 beantwoord waarin ingegaan wordt op lessen (fysieke kennis) voor de planning van toekomstige suppleties, waarbij rekening wordt gehouden met natuur en recreatie functies, zwemveiligheid en ruimtelijke ordening (EF2-1). In aanvulling hierop kan ook beantwoord worden wat de spin-off is geweest van de Zandmotor voor kennis en innovatie in de kustwaterbouw (EF2-3).

*EF2-1: Levert de Zandmotor nieuwe fysieke kennis op waarmee kustonderhoud en een meerwaarde voor recreatie en natuur gezamenlijk te realiseren zijn?*

*EF2-3 : Wat is de spin-off van de Zandmotor voor kennis en innovatie?*



## 3.2 Ontwikkeling van de vooroever

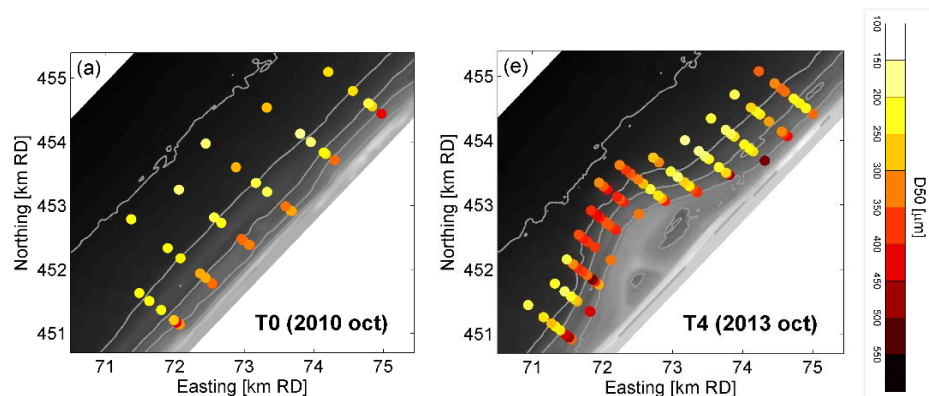
De meerwaarde van de Zandmotor voor de natuur wordt getoetst door de ontwikkeling van 1) de sedimentsamenstelling (EF3-1b1 en EF2-2a) en 2) bodemdiërsamenstelling op de vooroever van de Zandmotor te beoordelen (EF2-2b). Opgemerkt wordt dat evaluatievraag EF3-1b1 zich niet alleen richt op de diversiteit in sedimentsamenstelling van de vooroever die hier besproken wordt, maar ook op de lagune die in paragraaf 3.4 naar voren komt. De onderzoeken naar de vooroever hebben ook geleid tot spin-off voor kennisontwikkeling voor toekomstige maatregelen (EF2-3).

### 3.2.1 Sedimentsamenstelling

In het algemeen is er op de Hollandse kust een natuurlijke verfijning van het sediment in zeewaartse richting, met uitzondering van locaties waar een duidelijke geologische oorzaak is voor een andere korrelgrootteverdeling zoals bij oude rivier delta's (Eisma, 1968). De effecten van een megasuppletie zoals de Zandmotor vertalen zich in een toename in ruimtelijke variatie van de korrelgrootte om de suppletie heen, zoals terug te zien is in de metingen van bodemsedimentsamenstelling bij de Zandmotor (Huisman et al., 2016). De waargenomen ontwikkeling van de sedimentsamenstelling op de vooroever worden hier besproken.

*EF3-1b1: Hoe heeft de diversiteit in sedimentsamenstelling zich ontwikkeld op de vooroever? (zie Paragraaf 3.4.1 voor de sedimentsamenstelling in de lagune)*

Monitoring van de sedimentsamenstelling op de vooroever bij de Zandmotor (Huisman et al., 2016) heeft laten zien dat de mediane korrelgrootte ( $D_{50}$ ) na aanleg van de Zandmotor in 2011 aanzienlijk grover is dan de situatie hieraan voorafgaand in 2010 (Figuur 3.1). De korreldiameter ( $D_{50}$ ) is lokaal tot meer dan 200  $\mu\text{m}$  grover bij de kop van de Zandmotor, terwijl er aan de noord- en zuidzijde van de Zandmotor juist depositie van relatief fijner sediment optreedt. Hierdoor is de mediane korreldiameter circa 50  $\mu\text{m}$  fijner voor het diepere deel van het kustdwarse profiel aan de noordzijde van de Zandmotor. Ook aan de zuidzijde is sprake van een beperkte verfijning van de korrelgrootte van het bodemsediment. In de lagune bij de Zandmotor zijn geen metingen uitgevoerd, maar modelsimulaties komen overeen met waarnemingen dat in de lagune zeer fijn sediment aanwezig is door het afgeschermd, kalme milieu, terwijl er in de geul die de lagune verbindt met de zee juist relatief grof sediment aanwezig is door de toename in stroomsnelheden onder de getij-fluctuaties. Deze vraag is op basis van de beschikbare kennis dus goed te beantwoorden.



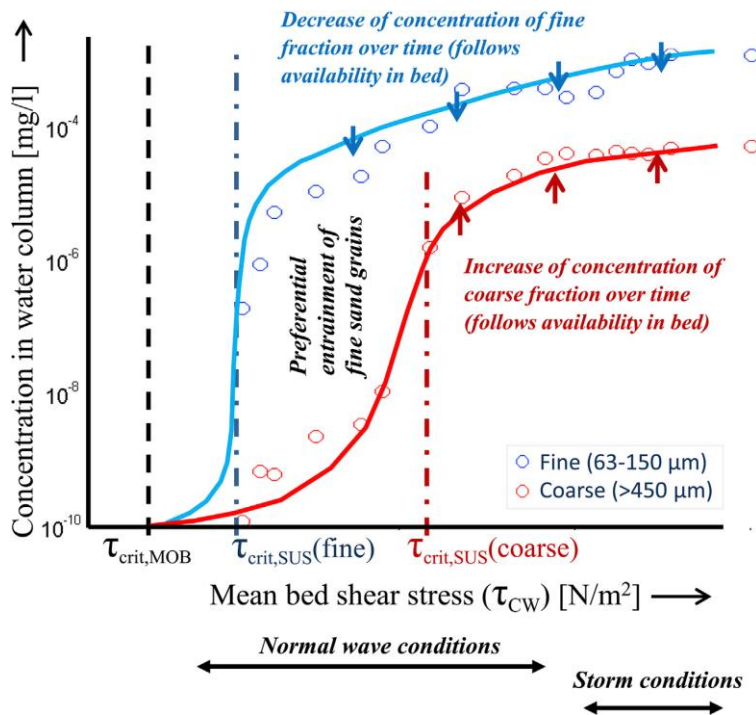
Figuur 3.1 Mediane korreldiameter voor de situatie voor en na aanleg van de Zandmotor (Huisman et al., 2016).

Er zijn ook uitspraken mogelijk over de verwachte lange-termijn ontwikkeling van de bodemsamenstelling in relatie tot het verspreiden van het gesuppleerde sediment van de

Zandmotor. Verwacht wordt dat de hier beschreven effecten van de suppleties op de bodemsamenstelling van de kust relevant zullen zijn tijdens de levensduur van de Zandmotor (i.e. enkele tientallen jaren). Op langere tijdschaal wordt verwacht dat het suppletiemateriaal zich (na erosie van de Zandmotor) zal voegen naar de forcering (Richmond & Sallenger, 1984), en zich zodanig zal verspreiden dat opnieuw een natuurlijke verfijning in zeewaartse richting zal ontstaan op de Delflandse kust. Dit mechanisme, waarbij het zand zich over de dieptecontouren verdeeld afhankelijk van de samenstelling, is ook echt waargenomen bij Terschelling (Guillen & Hoekstra, 1996) en verklaart ook de natuurlijk zeewaartse verfijning van sediment langs de kust (Eisma, 1968). Dit betekent dat het relatief grove deel van de Zandmotor suppletie (~300 tot 400  $\mu\text{m}$ ) op zeer lange termijn met name ten goede komt aan de ondiepe kustzone rond de waterlijn en de brandingszone, terwijl het fijnere zand (100 tot 200  $\mu\text{m}$ ) zich zal verspreiden over de vooroever (tot MSL -14m voor de Hollandse kust).

*EF2-2a: Via welke mechanismen veroorzaakt de Zandmotor veranderingen in de gradiënten in sedimentsamenstelling (korrelgrootteverdeling en organisch stof gehalte) op het natte strand en de vooroever?*

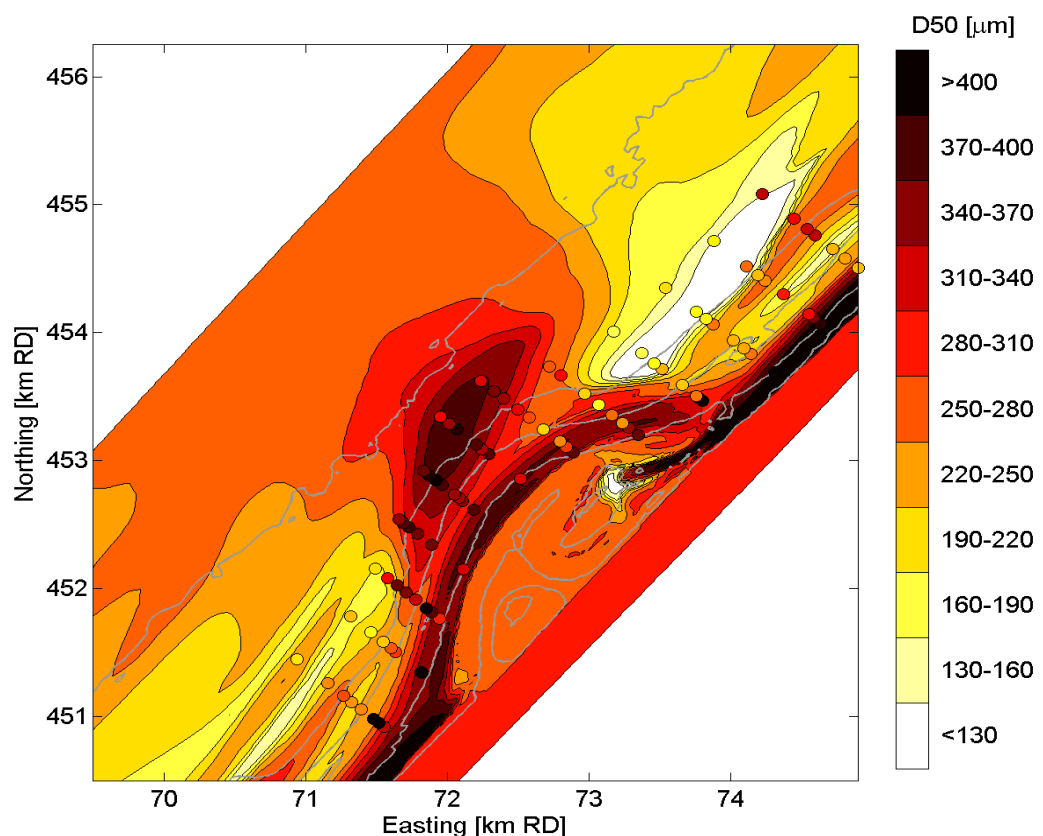
Megasuppleties beïnvloeden zowel de golven als de getijstroming sterk. De golfforcering en resulterende stromingen zorgen voor erosie in ondiep water, terwijl in dieper water met name de getijstroming wordt versneld waardoor sortering van sediment plaatsvindt. Modelresultaten tonen aan dat hoe groter de megasuppletie, hoe sterker de effecten op omliggende bodemsamenstelling worden: de ruimtelijke spreiding in korrelgrootte neemt toe (>150  $\mu\text{m}$ ), en de afstand vanaf de suppletie waarbij veranderingen zichtbaar zijn neemt toe van enkele honderden meters voor de relatief kleine megasuppletie (volume van  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) tot meer dan één km zeewaarts van de haak van de Zandmotor.



Figuur 3.2: Schematische representatie van het zand-opwoelingsgedrag van fijne en grove zandfracties onder gemiddelde en storm condities. De gemodelleerde tijdsgemiddelde zandconcentraties op een locatie zeewaarts van de Zandmotor megasuppletie (E71856m, N453237m RD op 11 m waterdiepte) van een 3D model (H2) simulatie, zijn gerepresenteerd door de cirkels voor de zandfracties. Merk op dat de typische schaal van bodemschuifspanning onder gemiddelde en stormcondities aangegeven wordt onder de grafiek (naar Figuur 16 van Huisman et al., 2018).

De uitsortering van de bodem ontwikkelt zich ongeveer in een jaar. Deze ruimtelijke variatie van bodemsamenstelling op de vooroever van de Zandmotor is het resultaat van het verschil in suspensiegedrag (opwoeling) van fijne en grove zandkorrels van hetzelfde zandmengsel op dezelfde hydrodynamische forcering (zie Figuur 3.2; Huisman et al., 2018). Fijne zandkorrels worden bij een lage bodemschuifspanning aanzienlijk meer gesuspendeerd dan middelgrote en grove zandkorrels. De fijne korrels worden daarom sneller geërodeerd en verspreiden zich relatief verder over het omliggende gebied. Een toename in ruimtelijke heterogeniteit van D50 kan worden veroorzaakt door hydrodynamische forcering wanneer kust-ingrepen, zoals suppleties, groot genoeg zijn om de stroming door golven of getij te beïnvloeden. Deze vraag is op basis van de beschikbare kennis dus goed te beantwoorden.

Op basis van metingen van sedimentsamenstelling bij de Zandmotor zijn modellen opgezet en afgeregeld die de waargenomen veranderingen in bodemsamenstelling in veel detail kunnen reproduceren (Figuur 3.3). Deze modellen zijn worden ingezet als evaluatiemethode voor toekomstige suppletie-maatregelen. Deze modellen zijn bijvoorbeeld gebruikt om 1) inzicht te krijgen in de drijvende hydrodynamische en sorteringsprocessen en 2) om de potentiële veranderingen in de bodemsamenstelling door te rekenen voor andere vormen van megasuppleties en vooroeversuppleties (De Bakker & Huisman, 2019). Met name de golfforcering is van invloed op de bodemsamenstelling bij deze vooroeversuppleties. Tevens spelen de initiële samenstelling van het zand en de diepte ligging een belangrijke rol bij vooroeversuppleties. Het effect van het getij op de sedimentverdeling op en rondom de vooroeversuppletie is echter klein.

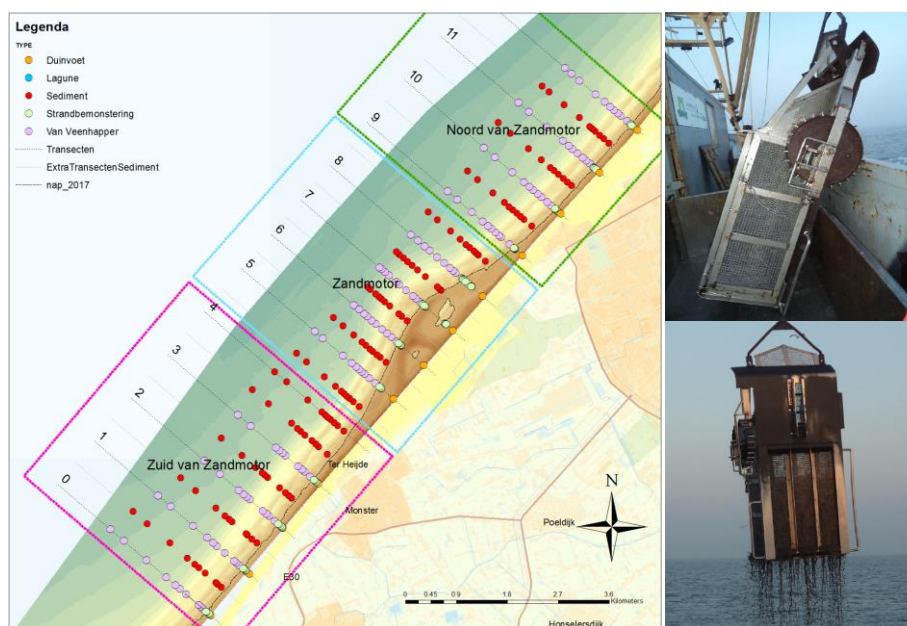


Figuur 3.3 Hindcast van de bodemsamenstelling op de Zandmotor (achtergrond kleur) in relatie tot de metingen van bodemsamenstelling (markers) voor Oktober 2013. (Huisman et al., 2018)

De bevindingen over sortering van zand op de vooroever van de Zandmotor zijn ook relevant voor andere ingrepen zoals havendammen, die ook een aanzienlijke getijcontractie kunnen veroorzaken. Verwacht wordt dat vergelijkbare veranderingen in bodemsamenstelling ( $D_{50}$ ) kunnen optreden bij deze constructies. In Huisman et al., (2018) zijn de effecten van deze waterbouwkundige constructies echter niet nader onderzocht. De bevindingen met betrekking tot sortering van zand op de vooroever van de Zandmotor zijn ook een trigger geweest voor meer onderzoek naar de invloed van bodemsediment op de geschiktheid van een habitat voor bodemdieren en platvissen (Post et al., 2017). Ook voor vooroeversuppleties zijn de nieuwverkregen inzichten een basis voor verder onderzoek.

### 3.2.2 Ecologie vooroever en natte strand

De bodemdiersamenstelling in de ondiepe kustzone wordt verondersteld een belangrijke graadmeter te zijn voor de invloed van een maatregel op de ecologie, aangezien de bodemdiergemeenschap sterk afhankelijk is van de (dynamiek in) omgevingscondities en zelf een belangrijke voedselbron is voor vogels, vissen en schaaldieren. Door het eenmalig neerleggen van een grote hoeveelheid zand zou sterfte van de bodemdieren als gevolg van het bedekken van de zeebodem met een laag zand minder vaak voorkomen dan bij reguliere suppleties, wat een voordeel zou kunnen zijn voor de trager herstellende soorten (k-strategen). Overigens zijn de meeste biota in de ondiepe kustzone snel koloniserend en kortlevend, welke zich dus relatief makkelijk aanpassen aan een nieuwe omgeving. Tevens zal een megasuppletie als de Zandmotor beter in staat zijn de omgevingscondities te beïnvloeden waardoor er specifieke habitats voor bodemdieren ontstaan zoals bijvoorbeeld de relatief beschutte lagune.

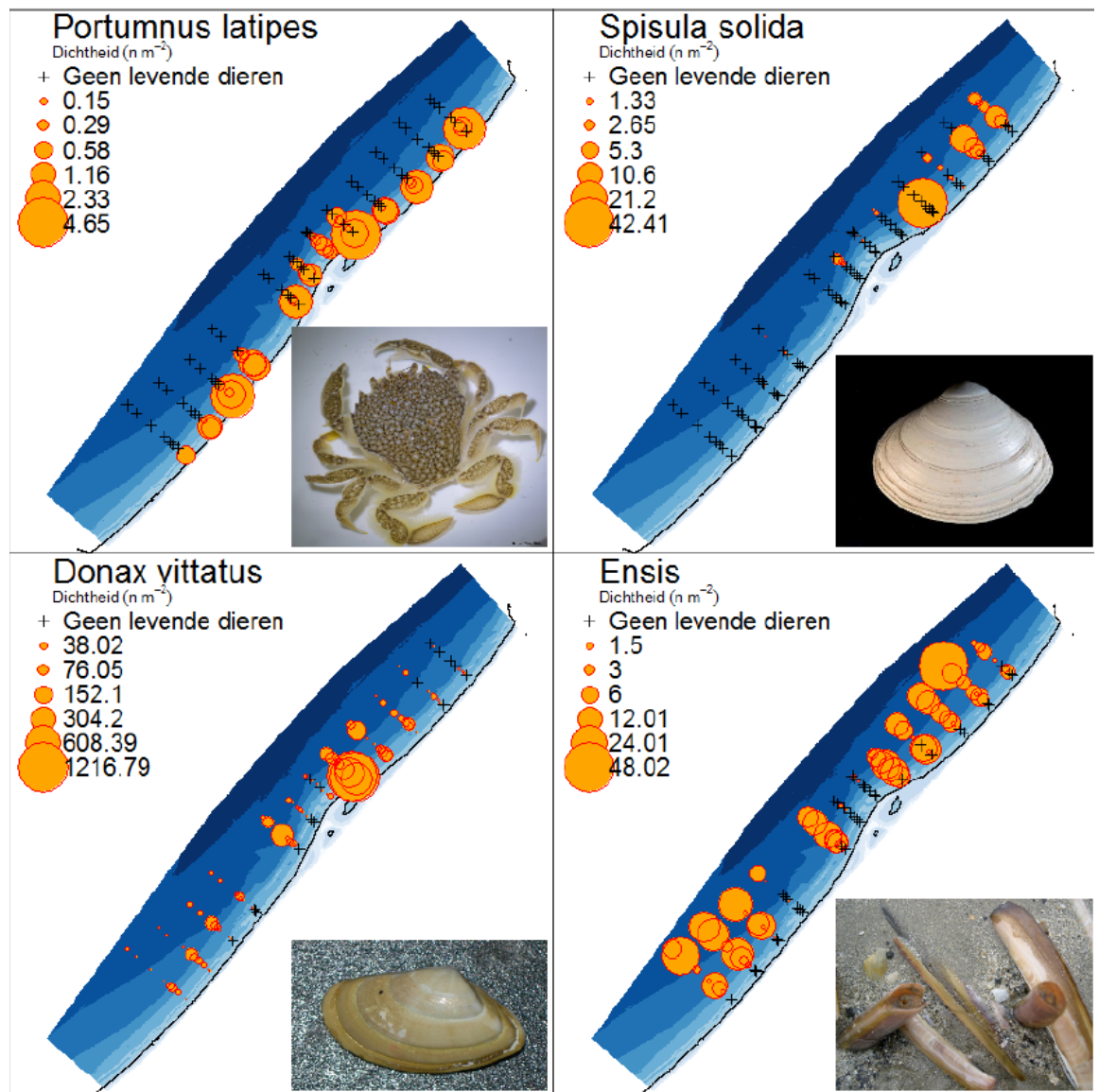


Figuur 3.4 Overzicht van meetlocaties en bodemschaaf (Wijsman et al., 2018)

Er zijn bodemonsters genomen, waarvoor de biomassa van de bodemdieren en het aantal soorten is bepaald. Dit gaat om een referentiemeting in 2010 en vervolgmetingen in het najaar van 2012, 2013, 2015, 2017 en 2019. Hiervoor is gebruik gemaakt van een bodemschaaf en van een Van Veen happer. In totaal zijn er ieder jaar ongeveer 120 locaties in de vooroever bemonsterd met zowel de bodemschaaf en de Van Veen happer. De meetlocaties zijn gelegen op 12 kustdwarse transecten (Figuur 3.4), waarbij de exacte ligging op het transect ieder jaar is bepaald aan de hand van een recente dieptekaart. Met de schaaaf wordt een groter

oppervlakte bemonsterd (ca 15 m<sup>2</sup>) dan met de Van Veen happer (0.1 m<sup>2</sup>). Omdat de vangst van de bodemschaaf wordt gezeefd op een 5 mm zeef is deze methode vooral geschikt voor schelpdieren en crustaceeën, terwijl met de Van Veen happer (1 mm zeef) de in de bodem levende borstelwormen beter worden bemonsterd. Op zowel de monsterlocaties van de bodemdieren als tussenliggende raaien (vanaf 2013) is tevens de sedimentsamenstelling van de bodem bepaald.

Op basis van de metingen met de bodemschaaf en Van Veen happer zijn door Wijsman et al. (2018) overzichten gemaakt van de verspreiding van bodemdieren. Een illustratie van de hieruit verkregen informatie wordt in Figuur 3.5 gegeven voor de resultaten van de bodemschaafbemonstering in 2017.

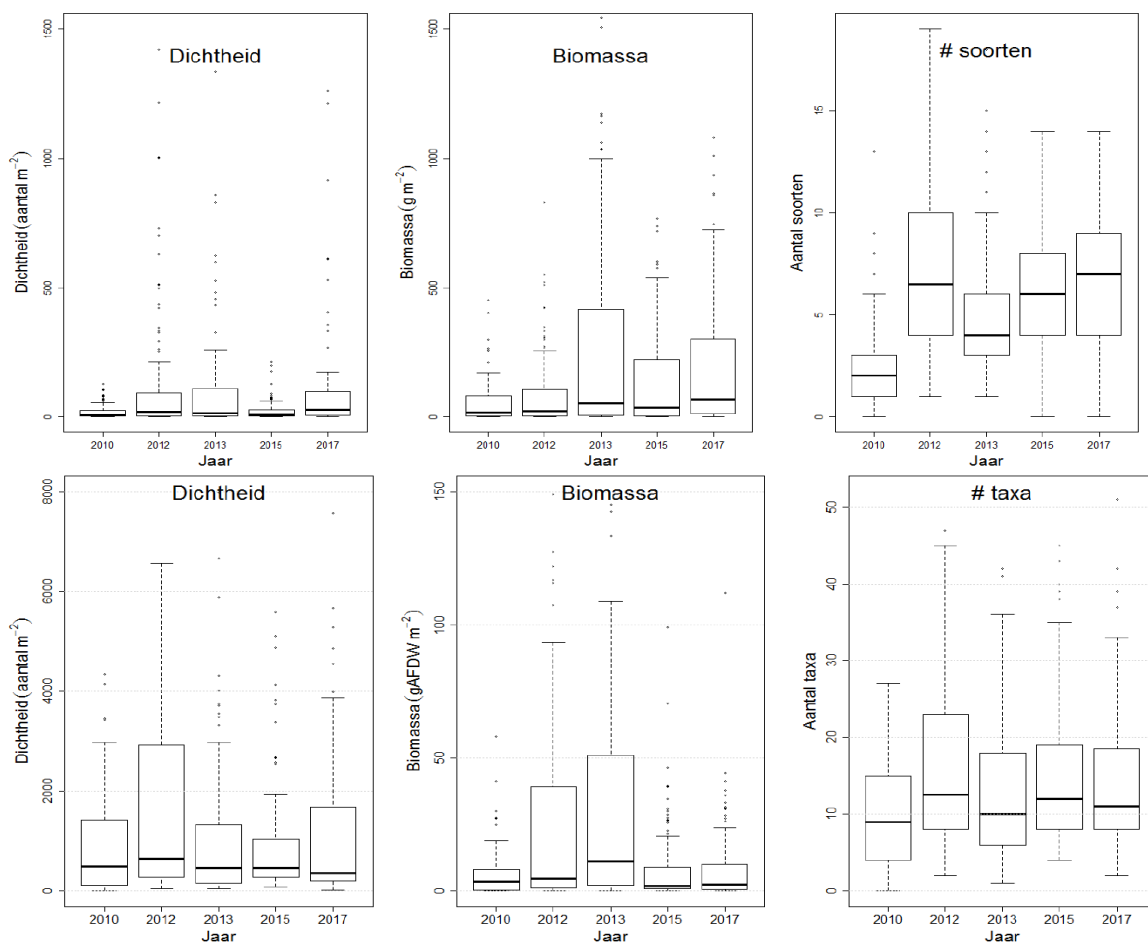


Figuur 3.5 Overzicht van verspreiding van dichtheden van de soorten *Portumnus latipes*, *Spisula solida*, *Donax vittatus* en *Ensis spp.* in 2017 op basis van de bodemschaaf (Wijsman et al., 2018)

*EF2-2b: Helpt het eenmalig neerleggen van een grote hoeveelheid zand om een natuurlijkere bodemdiersamenstelling in de ondiepe kustzone te krijgen in vergelijking met een regulier suppletieschema en leidt dit ook tot langer levende soorten?*

Herman et al. (2020) geeft op basis van een kwalitatieve beoordeling aan dat het eenmalig neerleggen van een grote hoeveelheid sediment een vergelijkbare invloed heeft op de lokale bodemdieren als de kleinere vooroever- en strandsuppleties waarvan er meer nodig zouden zijn. Bij de Zandmotor wordt relatief meer zand geplaatst per vierkante meter waardoor een kleinere gebied met bedekking van de bodemdieren ontstaat, maar dit zand doet er langer over om te eroderen dan bij de vooroever- of strandsuppleties.

De invloed van de Zandmotor op de ecologie in de nabije omgeving lijkt te bestaan uit een diversificatie van de bodemdieren. Uit de analyses komt naar voren dat de biomassa en de aantallen bodemdieren in de jaren na aanleg van de Zandmotor zijn toegenomen ten opzichte van het referentiejaar 2010, terwijl er op langere termijn vooral een verbreding van het aantal soorten heeft plaats gevonden (Wijsman et al., 2018; Herman et al., 2020; Figuur 3.6). De soorten-accumulatiecurve per sample laat voor alle jaren na aanleg een duidelijk groter aantal gevonden soorten zien, wat betekent dat er meer diversiteit is in de benthische gemeenschap. Verondersteld wordt dat dit komt omdat de abiotische omgeving van waaruit de samples gehaald worden veel diverser is geworden na aanleg van de Zandmotor dan in 2010.



*Figuur 3.6* Boxplots van de metingen met de bodemschaaf (boven) en Van Veen happer (onder) met de dichtheid, biomassa en aantal soorten per locatie voor de jaren 2010 tot 2017 (Wijsman et al., 2018).

De belangrijkste soort wat betreft aantallen en biomassa waren mesheften (*Ensis spp.*), die in de jaren 2010 tot en met 2013 het grootste deel van de biomassa bepaalde. Echter in 2015 en 2017 is *Ensis spp.* sterk teruggelopen en is een borstelworm soort (*Magelona johnstoni*) dominant in aantallen, alhoewel de biomassa van *Ensis spp.* nog steeds de grootste is in 2015. De schelpdieren *Donax vittatus* en *Spisula subtruncata* zijn in 2017 de belangrijkste soorten voor de biomassa. *Ensis Spp.* is dus minder dominant aanwezig na 2013.

Een oorzakelijk verband met de Zandmotor kan niet worden gevonden, alhoewel wel verondersteld wordt dat veranderde stromingspatronen mogelijk invloed hadden op de ontwikkeling van jonge *Ensis spp.*, terwijl de groei van de aanwezige *Ensis spp.* gewoon doorging.

Er zijn 82 nieuwe benthische soorten gevonden na aanleg van de Zandmotor, vergeleken met de referentie survey van 2010 (Herman et al., 2020). In veel gevallen ging het om zeldzame soorten die in dieper water werden waargenomen, terwijl de soortensamenstelling in de ondiepe kust langs de Zandmotor niet sterk veranderd is (Van Egmond et al., 2018). Opgemerkt dient te worden dat statistisch gezien voor slechts twee soorten kon worden aangetoond dat deze nieuw zijn, wat samenhangt met het beperktere aantal samples wat in de referentiesurvey is genomen. Er lijkt echter sprake te zijn van een verbetering van de situatie voor bodemdieren. Uit de analyse komen logische clusters van bodemdieren naar voren, die bijvoorbeeld beter gedijen in energetische condities, grof sediment of diep water.

De vraag blijft wat er zou zijn gebeurd als de Zandmotor niet was aangelegd in 2011. Er zijn immers ook veranderingen geweest door de Maasvlakte 2 ontwikkeling. Een deel van de waargenomen veranderingen zijn het gevolg van stochastische processen zoals broedval en weerscondities. Tevens zijn er morfologische en hydrodynamische ontwikkelingen als gevolg van de aanleg van Maasvlakte 2 en eerdere suppleties in het gebied waardoor deze vragen (o.a. met betrekking tot 'een natuurlijkere bodemdiersamenstelling' en 'langer levende soorten') niet eenvoudig kunnen worden beantwoord. Mogelijk kan extra informatie worden verkregen vanuit andere bronnen, zoals registraties van aangespoelde organismen (o.a. via Stichting Anemoon). De kennis is dus beschikbaar om iets te zeggen over de ontwikkeling van de bodemdieren na aanleg van de Zandmotor. De vergelijking met het reguliere suppletieprogramma kan echter niet zo makkelijk gemaakt worden, omdat daar geen vergelijkbare gegevens over bodemdieren voor beschikbaar zijn.

### 3.2.3 Habitats op de vooroever en het natte strand

*EF3-1b2: Heeft de Zandmotor nieuwe habitats en meer variatie in habitats gecreëerd. Leiden deze tot hogere natuurwaarden in intergetijdegebied en ondiepe kustzone? Is dit te kwantificeren voor bodemdieren, vissen, vogels en zeezoogdieren? (de beantwoording focust hier op het intergetijdegebied)*

Door aanleg van de Zandmotor is de habitat ondiepe kustzee groter geworden. De morfologie en samenstelling van de vooroever zijn diverser geworden, aangezien er nu weer banken voorkomen op de Delflandse kust (Radermacher et al., 2018). Die zijn goed voor de vestiging van benthos in soorten en maten in en tussen de banken. Ook zorgt de grotere diversiteit in sedimentsamenstelling op de vooroever voor meer onderscheidende omgevingscondities voor benthos. De ondiepe wateroever is dus veranderd en meer gevarieerd geraakt.

### 3.3 Ontwikkeling van strand en duinen

De ontwikkeling van de kwaliteit van de natuur van de duinen staat centraal in evaluatievraag EF3-1a. Waarin een onderverdeling wordt gemaakt naar de fysische ontwikkeling van de duinen, de kwaliteit van de duinen in relatie tot de dynamische wijze van aanleg en het recreatief gebruik.

#### 3.3.1 Ontwikkeling van de natuur in de nieuwe duinen

*EF3-1a1: In hoeverre ontwikkelen zich bredere, meer natuurlijke en dynamische duinen?*

Naast de aangroei van de bestaande duinen (zie Paragraaf 2.2.3), vind er op het strand van de Zandmotor ook nieuwe duingroei plaats ('embryonale duinen' H2110; zie Figuur 3.7). Deze embryonale duinen ontstaan wanneer door de wind getransporteerd zand wordt ingevangen door vegetatie (o.a. biestarwegras, helm en zandhaver). Zand is eerst door golven en getijstromen verplaatst, vervolgens op het strand afgezet en daarna door de wind opgestoven tot duintjes op plaatsen waar vegetatiegroei is gestart. De ontwikkeling van embryonale duinen in relatie tot vegetatie op de Zandmotor over de eerste vijf jaar na aanleg wordt ook beschreven door Van Puijenbroek et al. (2017). De perceptie is dat de ontwikkeling van nieuwe duinen op en rond de Zandmotor aanvankelijk zeer traag ging en zich duidelijk heeft versneld sinds 2016.

Vooraf op het zuidelijk deel van de Zandmotor en op het aangroestrand direct ten zuiden ervan zijn veel nieuwe duintjes ontstaan (o.a. Van der Weerd & Wijnberg, 2016; Figuur 3.7). Een deel ligt in een zone direct voor de duinversterking, een deel meer zeewaarts, enigszins verspreid op de aansluiting van de haak met de kust. Lokaal zijn hier de vele individuele duintjes en kleine stukken met aangesloten duintjes aan elkaar gegroeid tot grotere complexen van lage duintjes die inmiddels als 'Witte duinen' kunnen worden gekarakteriseerd (H2120). De zone met nieuwe duintjes is hier 'bruto' enkele honderden meters breed (parallel aan de zeereep) met daarbinnen complexen van tientallen meters breed en duintjes met een hoogte tot 2 meter. Bij het duinmeer liggen de meest zeewaartse duintjes ruim 350 m zeewaarts van de duinvoet van de kustversterking. De hier gevormde duinen zijn relatief natuurlijk en zeer dynamisch. De wat grotere en hogere duincomplexen worden minder beïnvloed door betreden en berijden dan in voorgaande jaren waardoor de duinen hier natuurlijker ogen dan voorheen. De begrenzing van enkele grotere complexen was zeker in de eerste jaren wel beïnvloed door spoorvorming, waardoor deze soms recht en kunstmatig zijn. In het zuidwesten zijn duintjes ontstaan die met biestarwegras zijn begroeid. Meer dan voorheen volgt de duinontwikkeling hier in de laatste jaren de klassieke vegetatiesuccessie, met aan de zeezijde biestarwegras als eerste dominante duinvormer. Waarschijnlijk is dit een gevolg van het feit dat de kust- en duinaangroei hier relatief natuurlijk verlopen.



*Figuur 3.7 Embryonale duingroei aan zuidzijde van de Zandmotor (links) en gedeeltelijke bedekking met schelpen (rechts) Foto's : Bas Arens.*



In het midden en noorden van de Zandmotor blijft de duinontwikkeling achter. In het midden is de Zandmotor relatief hoog aangelegd en heeft het zand een grote fractie schelpen (Figuur 3.7). De structuur van de toplaag van het strand en mechanismen van zandtransport bij de Zandmotor zijn bestudeerd door Williams et al. (2018). Door de voortgaande erosie zijn er aan de zeewaartse zijde van de haak ook steilranden gevormd die een blokkade vormen voor zand dat door golven en wind vanuit het intergetijdengebied naar de Zandmotor wordt getransporteerd. Aan de zeezijde zijn hier nauwelijks duintjes die eerder kleiner lijken te worden in de periode van 2016 tot en met 2019. Bovendien is het oppervlak deels bedekt met een schelpenvloertje, waardoor hier door de wind maar weinig zand aan onttrokken kan worden en er daarom weinig zand beschikbaar is voor duinvorming (Figuur 3.7). Door de hoge ligging is het oppervlak buiten bereik van de golven, terwijl een paar kleine zeewaarts gelegen gebieden met (in de beginjaren) duingroei op de haak al in zee verdwenen zijn. Alleen in de luwte op de overgang naar het lager gelegen duinmeer is sprake van enige duinvorming. Ter hoogte van het duinmeer en van de lagune is ook aan de landzijde op kleine schaal sprake van duinvorming. Er is hier echter maar weinig aanvoer van zand omdat dit vooral wordt ingevangen door het duinmeer en de lagune. Het huidige ontwerp van de Zandmotor (met lagune en duinmeer) zorgt er door het afvangen van eolisch transport voor dat de groei van de embryonale duinen tegen de zeeoep van de kustversterking 2008-2009 sterk wordt beperkt.

Verder naar het noorden, richting Kijkduin, is het duinvolume van de nieuwe duintjes gering en verloopt de duinontwikkeling traag. De vegetatie bestaat uit helm en, meer lokaal, biestarwegras. De begroeiing is relatief ijl en soms weinig vitaal, waarschijnlijk mede als gevolg van de droge groeiseizoenen van de afgelopen twee jaar. Ook de vestiging van andere plantensoorten verloopt hierdoor relatief traag. Verder richting Kijkduin, waar de spit van de Zandmotor (i.e. aan de noordzijde) aansluit op het strand, is er wel weer een toename van duinvorming op het strand, mogelijk als gevolg van beschikbaarheid van zand in het intergetijdengebied van de noordelijke spit. Deze vraag is op basis van de beschikbare kennis dus goed te beantwoorden.

### 3.3.2 Dynamische eolische ontwikkeling in relatie tot natuurkwaliteit

*EF3-1a2: Wat is de invloed van dynamische wijze van aanleg en beheer op de kwaliteit?*

Het relatief natuurlijke en dynamische karakter van de nieuwe duinen (H2110 en H2120) is een positief kwaliteitsaspect. Over de biotische kwaliteitsaspecten is echter nog weinig te zeggen. Door de nog hoge mate van dynamiek en de droogte van de afgelopen jaren is het aantal soorten planten, mossen en korstmossen nog gering. Ook de aantallen en diversiteit van typische buitenduinpaddenstoelen zijn voor zover na te gaan nog relatief gering. Over het insectenleven zijn geen gegevens beschikbaar maar ook dit lijkt nog nauwelijks tot ontwikkeling gekomen.

Opvallend is dat de dynamische wijze van aanleg vooral ten zuiden van de Zandmotor goed uitpakt. Erosie en verplaatsing van zand vanuit het zuiden over het strand en minder vanaf de Zandmotor leidt hier tot strandaangroei en vervolgens, via winddynamiek, tot duinvorming. De ontwikkeling van duinen verloopt hier zowel kwantitatief als kwalitatief het best (Figuur 3.8). De ontwikkeling van duinen op de Zandmotor is duidelijk minder dan het geval is aan de Zuid-West zijde van de Zandmotor. Ook de aanwezigheid van het duinmeer en de lagune hebben een remmend effect op de natuurlijke duinaangroei. In het centrale deel is de hoogte in feite te hoog om van een "normaal" strand te spreken. Dit in combinatie met de grote hoeveelheid schelpen in het sediment zorgt (al 8 jaar) voor een zeer onnatuurlijk ogend oppervlak, waar noodzakelijke dynamiek voor omwoelen en sorteren van zand ontbreekt. In feite kan gesteld worden dat de meeste en de beste duinen niet op de Zandmotor zelf liggen, maar zuidwestelijk

van de Zandmotor op de aansluiting met de bestaande kust. De invloed van de dynamische wijze van aanleg op de duingroei en pioniervegetatie is in redelijke mate te beantwoorden, maar het effect op de meer zeldzame planten, (korst)mossen en paddenstoelen is nog niet te evalueren.



*Figuur 3.8 Verandering in natuurlijkheid van de kustversterking aan de zuidzijde van de Zandmotor op een moment kort na aanleg (links) en na 8 jaar (rechts). Foto's : Bas Arens.*

#### *EF3-1a3: Wat is de invloed van het recreatiebeheer ('flexibel zoneren')?*

De invloed van recreatiebeheer op het strand is niet bekend, aangezien er geen beheer van de recreatie is ingesteld. Tevens zal het niet eenvoudig zijn om recreatiebeheer in de praktijk te handhaven. In algemene zin wordt echter wel verwacht dat het vaststellen van een toegangsverbod voor een deel van de Zandmotor zou kunnen leiden tot meer vegetatieontwikkeling en daarmee duingroei. Verondersteld wordt ook dat vooral de mate van berijding hiervoor van belang zal zijn. Het effect van de berijding is echter niet aangetoond vanuit de metingen van duingroei en vegetatiegroei. Op basis van expert-beoordeling wordt wel verwacht dat een gedeeltelijke afsluiting van de embryonale duinen goed zou zijn voor (broed)vogels. Deze vraag is niet voldoende te beantwoorden met de beschikbare informatie.

### **3.3.3 Habitats op het strand en in de duinen**

*EF3-1b2: Heeft de Zandmotor nieuwe habitats en meer variatie in habitats gecreëerd. Leiden deze tot hogere natuurwaarden in intergetijdegebied en ondiepe kustzone? Is dit te kwantificeren voor bodemdieren, vissen, vogels en zeezoogdieren? (de beantwoording focust hier op het strand en de duinen)*

Door aanleg van de Zandmotor zijn nieuwe habitats ontstaan met embryonale duinen (H2110) op het hoogstrand en witte duinen (H2120) door instuiving van zand in de zeereep. Hierdoor is zowel het duin als het strand meer gevarieerd geworden.

De sleutel is: er is meer laterale ruimte, als gevolg waarvan zich nieuwe natuur en meer gevarieerde natuur heeft ontwikkeld. De embryonale duinen worden bemeten en onderzocht (zie ook Paragraaf 4.5). De kennis over de witte duinen die ontstaan is nog beperkt.

### 3.4 Ontwikkeling van de lagune

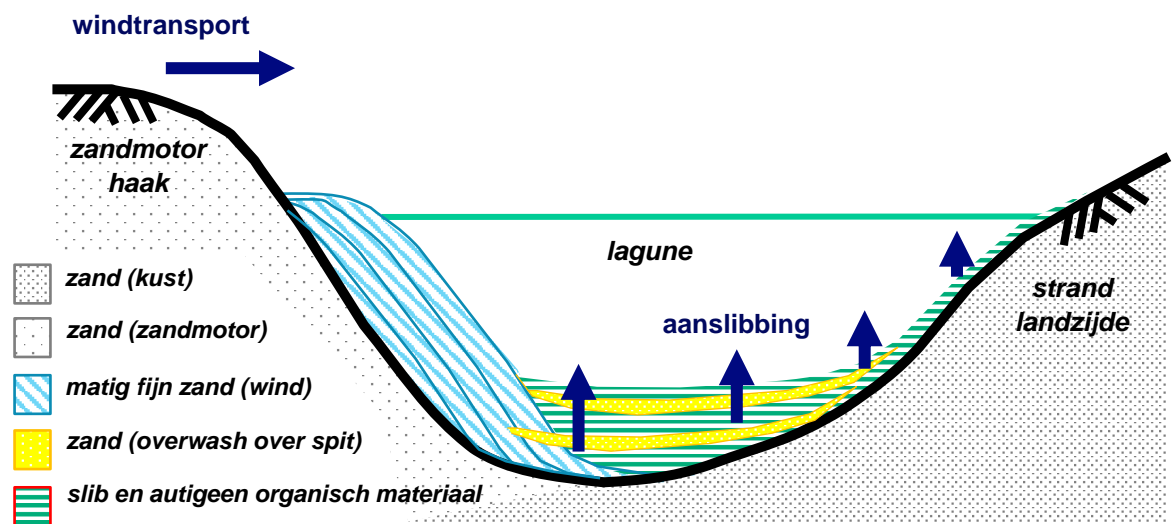
De wijze waarop de tijdelijke nieuwe natuur in de lagune van de Zandmotor zich ontwikkeld is een belangrijke graadmeter voor de ecologische diversiteit die gecreëerd wordt bij de Zandmotor.

#### 3.4.1 Sedimentsamenstelling van de lagune

De sedimentsamenstelling in de lagune is een belangrijke parameter voor de lokale bodemdieren. Hier wordt de ontwikkeling van de lagune besproken.

*EF3-1b1: Hoe heeft de diversiteit in sedimentsamenstelling zich ontwikkeld in de lagune? (zie Paragraaf 3.2.1 voor de sedimentsamenstelling op de vooroever)*

De sedimentsamenstelling in de lagune is maar op een beperkt aantal locaties en momenten in de tijd gemeten. Voor het intergetijdengebied en droge strand zijn wel metingen uitgevoerd door Hoonhout (2018). Hieruit komt naar voren dat het sediment lokaal fijn zand of slibrijk is (Figuur 3.9). De redenen hiervoor kunnen gevonden worden in 1) de instuiving van fijn zand door de wind aan de zeewaartse kant van de lagune (o.a. Hoonhout, 2018) en 2) een geleidelijke aanslibbing van het midden en landwaartse deel van de lagune met een combinatie van slib en organisch materiaal dat deels vanaf de zee wordt aangevoerd. Verder wordt verondersteld dat er tijdens stormen zand over de spit heen gespoeld wordt door golven, wat incidenteel aan de noordzijde zorgt voor een zandige afzetting op de bodem van de lagune. Deze vraag is beperkt te beantwoorden, aangezien er weinig meetgegevens zijn in de lagune.



Figuur 3.9 Interpretatie van de verandering in bodemsamenstelling in de lagune (Interpretatie : B.J.A. Huisman en L. Van der Valk).

### 3.4.2 Bodemdiergemeenschap van de lagune

*EF3-1b3: Hoe heeft de bodemdiergemeenschap zich ontwikkeld in de lagune en de vooroever? (zie Paragraaf 3.2.2 voor de bodemdiergemeenschap op de vooroever)*

Het toegenomen areaal intergetijdengebied aan de randen van de lagune van de Zandmotor zorgen voor verbeterde omstandigheden voor bodemdieren (Herman et al., 2020). Initieel na aanleg van de Zandmotor was sprake van een verrijking van het aantal soorten van hogere macroinvertebraten in het intergetijdengebied bij de Zandmotor vergeleken met andere zandsuppleties, maar deze kwamen wel voor in lagere aantallen. De rekolonisatie van soorten na de bedekking met zand lijkt niet beperkend te zijn geweest voor de rijkheid aan soorten van de macroinvertebraten (Van Egmond et al., 2018). De soortenrijkdom van de bodemdieren in het intergetijdengebied van deze grootschalige suppletie veranderde in de door Van Egmond et al. (2018) beschouwde periode van vier jaar niet naar een zelfde gemeenschap als voor het ongesupleerde strand.

De delen van het strand die werden beschermd tegen de golven (i.e. in de lagune) boden bescherming aan heel andere gemeenschappen van grote bodemdieren dan de aan de golven blootgestelde intergetijdengebieden. In feite creëert een grootschalige suppletie een nieuwe habitat voor in het intergetijdengebied levende macroinvertebraten door het vergroten van de relatief luwe gebieden op het zandige strand.



*Figuur 3.10 Foto van de lagune van de Zandmotor in Augustus 2018 aan het eind van een zeer droge periode (foto : L. Van der Valk)*

Om een beeld te krijgen van de ontwikkeling van de schelpdierfauna in de lagune zijn aangespoelde tweekleppige mollusken als proxy gebruikt (Van der Valk, 2019; Figuur 3.10), waarmee het mogelijk wordt om iets te zeggen over die ontwikkeling. De habitus van die aangespoelde schelpdier kleppen was zodanig vers (zonder uitzondering met opperhuid, zeer vaak met vlees/vleesresten) dat aangenomen kan worden dat de dieren met die schelpen in de lagune leefden, mogelijk met uitzondering van een deel van de *Amerikaanse Zwaardschede* (*Ensis directus*) schelpdieren. Aanwijzingen dat de *Amerikaanse Zwaardschede* in de lagune voorkomt zijn dat de opperhuid van de bij de lagune gevonden exemplaren meestal nog intact is, terwijl dit niet het geval is voor exemplaren op het strand.

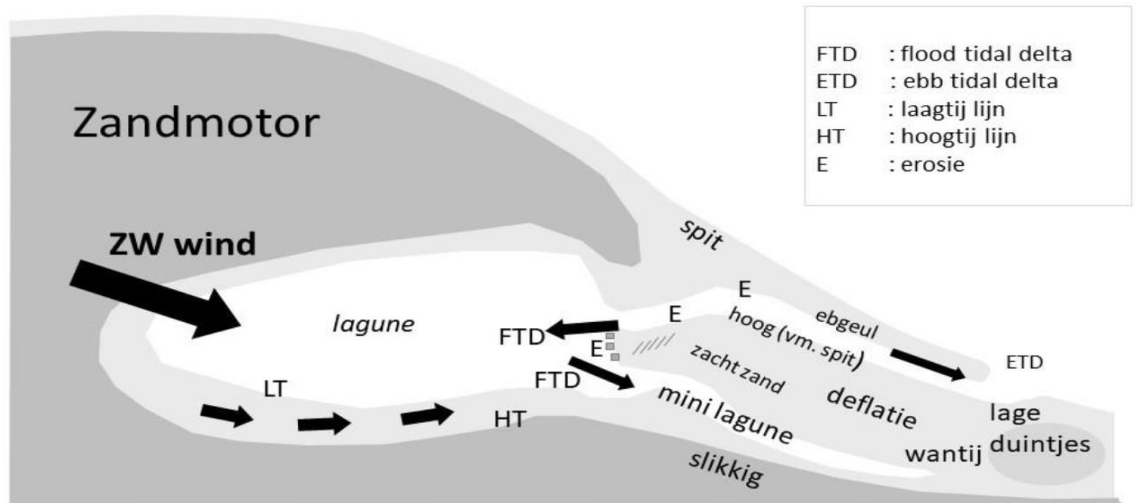
Ook de eigenschappen van de bij de lagune gevonden *Amerikaanse Zwaardschede* zijn anders (i.e. bredere meer fragiele schelp en donkerbruine kleur met zwarte reductievlekken; i.e. *Ensis Leei*).

Daarnaast zijn twee bemonstering uitgevoerd van de benthos in de lagune in 2013 en 2015. Beide keren zijn er in sublitoraal 9 Van Veen monsters genomen. De litorale delen rond de lagune zijn ook in andere jaren bemonsterd (in 2010, 2012 en 2017).



Figuur 3.11 Selectie van gevonden schelpdieren bij de lagune (links : Gewone Kokkel, Nonnetje, Strandgaper en Amerikaanse zwaardschede; rechts : Filipijnse tapijtschelp vondstdatum maart 2018; foto : L. Van der Valk)

De meest voorkomende soorten die gevonden werden zijn de *Gewone kokkel*, *Nonnetje*, *Strandgaper*, *Amerikaanse zwaardschede*, *Platte slijkgaper* en de *Filipijnse tapijtschelp* (Figuur 3.11; Figuur 3.12). In kleine aantallen zijn ook andere soorten gevonden die waarschijnlijk als 'vogelbuit' richting de lagune zijn gebracht, zoals *Mossels*, *Halfgeknotte strandschelp*, *Tere platschelp*, *Otterschelp* en *Amerikaanse boormossel*.



#### Laagstrand (LS)

- Strandgaper	++
- Am. zwaardschede...	+
- Nonnetje	++
- Philipp.tapijtschelp	1x
- Kokkel	+/-

#### Hoogstrand (HS)

- Kokkel	++
- Strandgaper	+
- Am. zwaardschede	+

Figuur 3.12 Schets van het mondingsgebied van de geul in de lagune van de Zandmotor kort na de in januari 2016 opgetreden geulverkorting. Tekening L. van der Valk / B. Huisman, niet op schaal (Van der Valk, 2019).

De *Gewone kokkel* en het *Nonnetje* waren aanvankelijk ruim aanwezig. Echter in 2018 waren deze soorten bijna verdwenen, wat toegeschreven wordt aan de toename van organisch materiaal. De *Strandgaper* was daarom de meest succesvolle soort, en is aanwezig in zowel de lagune als de geul. De *Amerikaanse zwaardschede* komt zowel voor op de ondiepe vooroever als de lagune en dan vooral in de vloedgetijdendelta. De soorten in de lagune waren iets breder en donkerder dan op de vooroever in verband met de andere omgevingseigenschappen. De *Platte slijkgaper* bevond zich in kleine aantallen in slibhoudend rustig water van de lagune. De *Filipijnse tapijtschelp* komt in grote aantallen voor, en er kunnen meestal meerdere jaarklassen voor worden gevonden.

Het aantal soorten en soortenrijkdom van aanspoelde tweekleppigen is toegenomen van een zeer laag aantal in 2012 met 1 soort (*Gewone kokkel*) tot een maximum van 6 soorten in 2018. Ook het aantal gevonden schelpen nam toe in de tijd. Door de tijd heen vindt ook schelpgroei en voortplanting plaats in de lagune, aangezien steeds meer jaarklassen gevonden konden worden. Na 2016 lijkt zowel de groei als de afmeting van de schelpen niet meer toe te nemen, maar neemt deze af. Ook is er na 2016 sprake van een afname van het aantal gevonden schelpdoubletten van de *Gewone kokkel*, het *Nonnetje*, en de *Strandgaper*. Bij de waarneming in november 2018 bleek dat er veel lagere aantallen schelpen per soort aangespoeld waren dan de zeer hoge aantallen in augustus 2018.

Tabel 3.1 Ontwikkeling schelpdierfauna in de lagune (Van der Valk, 2019)

Ontwikkeling schelpdierfauna in de lagune		2012-2016	2016-2018	opmerkingen
aantal soorten		langzame toename	stabiel	sommige soorten lang onder de radar
afmetingen		toename	afname	verschillend per soort
jaarklassen		groeiend en daarna stabiel aantal	afname	meeste soorten: 3
vitaliteit populatie als geheel	weekdier-	toename	afname	

De ontwikkeling van de schelpdierfauna wordt verklaard op basis van de morfologische ontwikkeling van de lagune, die door de tijd heen steeds verder opvult door eolisch transport van zand en (in mindere mate) ook overspoeling van zand over de landtong tijdens stormen. Ook is de getijdegeul is door de tijd heen steeds langer en ondieper geworden, waardoor de getijslag binnen de lagune door de tijd heen is verkleind. Dit heeft implicaties op de voedselbeschikbaarheid, het zuurstofgehalte in het water én de temperatuur van het water in de lagune.

In feite kan deze vraag relatief goed beantwoord worden voor de schelpdieren, maar is maar beperkte informatie beschikbaar over de andere bodemdieren. Additionele informatie over de ontwikkeling van benthos in de lagune is waarschijnlijk te verkrijgen bij *Stichting Anemoon* en het *Centraal Systeem van de Strandwerkgemeenschap (SWG/het Zeepaard)*, maar is in het kader van deze analyse nog niet opgevraagd.

### 3.4.3 Habitats van de lagune

*EF3-1b2: Heeft de Zandmotor nieuwe habitats en meer variatie in habitats gecreëerd. Leiden deze tot hogere natuurwaarden in intergetijdegebied en ondiepe kustzone? Is dit te kwantificeren voor bodemdieren, vissen, vogels en zeezoogdieren? (de beantwoording focust hier op de lagune)*

Door aanleg van de Zandmotor neemt de variatie in habitats toe door de aanwezigheid van de lagune en het duinmeer. De aanwezige habitats in het duinmeer en de lagune zijn met name:

- 'nat strand' (intergetijdegebied);
- luw ondiep kustwater (lagune);
- brak / zoet 'duinmeer'.

Voor de Delflandse kust is het habitat "duinmeer" nieuw, beter te omschrijven als een ingesloten zeer natte strandvlakte met initieel relatief diep staand water. In het brakke duinmeer groeit sinds enkele jaren *Snavelruppia*, een zeldzame, kenmerkende plantensoort. Het duinmeer wordt geleidelijk kleiner en zal op termijn waarschijnlijk verdwijnen door het dichtwaaien met zand. Ook na het dichtwaaien, kan dit deelgebied zich echter ontwikkelen als een strandvlakte van hoge kwaliteit (H2190, eolisch geselecteerd zand, zoet, 20 cm boven regionaal grondwaterpeil, inwaaiend zout door salt spray). Ook dit gebied is tijdelijke natuur die op lange termijn zal dichtwaaien en/of eroderen.

De lagune is ook een nieuwe habitat voor deze kust. Deze heeft zich ontwikkeld van een beschermt, niet opgespoten ondiep deel van de Noordzee tot een steeds sterker beschutte lagune met beperkte instroming en uitstroming van zeewater. Op termijn gaat deze lagune afgesloten raken van de aanvoer van zout water met de daarin voorkomende organismen. Op de langere termijn zal ook deze lagune gaan verzoeten en eventueel aanleiding geven tot de ontwikkeling van een strandvlakte. Mogelijk zal er wel een tussenfase gaan bestaan met tijdelijk stagnerend water met eventueel stankoverlast door de hoge concentratie organisch materiaal (ingespoeld en autochtoon geproduceerd).

Gevolg van de hier boven beschreven verbeteringen in de habitats is dat er ook hogere natuurwaarden zijn ontstaan. Voor de bodemdieren en vogels is dat ook meetbaar, aangezien hier gegevens voor zijn verzameld door het nemen van monsters en tellen van aantallen. Er kan hiermee een redelijk beeld verkregen worden van de verspreiding en aantallen. Echter voor vissen en zeezoogdieren is de invloed van de Zandmotor niet aantoonbaar in verband met de beperkte aantallen die voorkomen op de Zandmotor en de moeilijkheid van het uitvoeren van een meting.

### 3.5 Vissen, vogels en zoogdieren op de Zandmotor

De wijze waarop de vissen, vogels en zoogdieren zich ontwikkelen op de Zandmotor is een belangrijke graadmeter voor de ecologische diversiteit die gecreëerd wordt bij de Zandmotor.

#### 3.5.1 Vissen

*EF3-1b4: Hoe heeft de kinderkamerfunctie van het gebied zich ontwikkeld?*

De ontwikkeling van de visstand op de vooroever van de Zandmotor en in de lagune is gemonitord in de eerste jaren na aanleg. Hierbij is specifiek gezocht naar met name de jonge vissen. Echter de aantallen vissen die werden gevangen waren zeer beperkt. Hierdoor is geen directe beoordeling te geven over de invloed van de Zandmotor op juveniele vissen. De toename in de aantallen en biomassa van bodemdieren zou echter als een indicator gezien kunnen worden voor de aanwezigheid van juveniele vissen. Deze vraag is echter niet goed te beantwoorden op basis van de beschikbare informatie.

#### 3.5.2 Vogels (broeden)

*EF3-1b5a: Welke ontwikkelingen vertonen broedvogels in het gebied?*

In de eerste 5 jaar kwamen in het geheel geen vogels tot broeden door te sterke verstoring. In 2017 was er een eerste broedgeval van *bontbekplevier*. In 2019 broedden drie paar *bontbekplevier* die en ook enkele jongen groot hebben gebracht. Dit is te danken aan de toegenomen schuilmogelijkheden tussen de zich uitbreidende helmbegroeiing. Ook worden de duintjes op de Zandmotor in toenemende mate gebruikt als onderdeel (foerageergebied) van het broedterritoria van *graspieper* in het aangrenzende buitenduin van Solleveld. Het aantal waargenomen broedvogels op de Zandmotor is dus laag over de afgelopen jaren, maar de conclusie is ook dat de Zandmotor geleidelijk geschikter wordt voor broedvogels. Bij verdere ontwikkeling van de vegetatie zal dit verder toenemen. Verstoring door bezoekers (en huisdieren) heeft echter een substantieel negatief effect. Verwacht wordt dat een gedeeltelijke afscherming van de embryonale duinen gunstig zal zijn voor de broedvogels. Deze vraag valt op basis van expert-beoordeling te beantwoorden.



### 3.5.3 Vogels (foerageren)

EF3-1b5b: Welke ontwikkelingen vertonen steltlopers en zeevogels in het gebied?

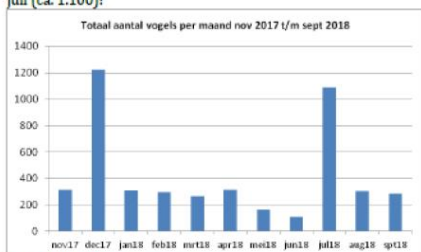
De betekenis van het intergetijdengebied en ondiepe kustzone voor kustvogels lijkt te zijn toegenomen direct na aanleg van de Zandmotor, alhoewel het in absolute zin om een beperkte verandering gaat. Het totaal aantal niet-broedvogels (alle soorten) is daarna weer afgenomen van circa 920 exemplaren gemiddeld per maand in de jaren 2013 en 2014 tot circa 405 in de jaren 2017 en 2018. Meeuwen zijn de meeste talrijke groep. De afname is vooral veroorzaakt door afname in de aantallen meeuwensoorten, met de *Kokmeeuw* als sterkste 'daler'. Ook de *aalscholver* nam sterk af van gemiddeld/maand 140 in 2013-2014 tot 27 in 2017-2018. Het aantal *sterns* (visdief en grote stern) bleef ongeveer gelijk (gemiddeld circa 70 in 2013-14, en respectievelijk circa 60 in 2017-2018). *Drieteenstrandlopers* namen toe van circa 10 (2013-2014) tot circa 25 (2017-2018). *Scholekster* nam licht af: gemiddeld circa 15 in 2013-2015 respectievelijk circa 11 in 2017-2018.

De oorzaken zijn niet met zekerheid vast te stellen. Het aantal meeuwen fluctueert in het algemeen sterk. De *Aalscholver* wordt mogelijk beïnvloed door aantalsveranderingen in de broedkolonie in de aangrenzende duinen. Overigens vist de *Aalscholver* met name op zee, waardoor de invloed van de Zandmotor op de populatie beperkt zal zijn. De habitats op de Zandmotor lijken niet (veel) te zijn verbeterd of verslechterd, al zou de verstoring door bezoekers kunnen zijn toegenomen doordat het gebied meer bekendheid krijgt. Mogelijk dat een deel van de teruggang in het aantal foeragerende vogels gerelateerd is aan de teruggang in het areaal van het gebied als gevolg van de erosie van de haak. De vraag over steltlopers en zeevogels valt redelijk goed te beantwoorden op basis van de beschikbare informatie.

- in totaal 5.856 vogels geteld, verdeeld over 42 soorten
- meest talrijke soorten (maandgemiddelde nov17-sept18):

1.	Zilvermeeuw	97,5	per mnd
2.	Stormmeeuw	88,2	per mnd
3.	Kleine mantelmeeuw	78,8	per mnd
4.	Kokmeeuw	30,8	per mnd
5.	Visdief	21,1	per mnd
6.	Grote stern	20,8	per mnd
7.	Grote mantelmeeuw	18,8	per mnd
8.	Aalscholver	14,5	per mnd
9.	Drieteenstrandloper	13,5	per mnd
10.	Scholekster	10,8	per mnd

- totaal per maand 100-300 vogels, met uitschieters in december (> 1.200) en juli (ca. 1.100):



- meest bijzondere waarnemingen:
  - geelpootmeeuw
  - sneeuwgorst
- broedvogels: 2 territoria bontbekplevier



Figuur 3.13 Overzicht van vogeltellingen en telgebieden op de Zandmotor voor de periode nov 2017 tot sep 2018. Informatiebron : Kees Vertegaal.

### 3.5.4 Zeezoogdieren

EF3-1b6: Levert de Zandmotor een foerageer en rustgebied voor zeezoogdieren?

Zeezoogdieren worden niet gemonitord op en rond de Zandmotor. De waarnemingen zijn zodanig anekdotisch en incidenteel dat het niet mogelijk is op basis hiervan een beoordeling

te geven. Meldingen op waarneming.nl laten zien dat sinds 2013/2014 de aantallen zeehonden beperkt zijn tot incidentele waarnemingen, vaak van zieke of gewonde dieren. De betekenis van de Zandmotor voor deze soortgroep wijkt niet of nauwelijks af van stranden elders langs de Hollandse kust. Deze vraag is dus eenvoudig te beantwoorden.

## 3.6 Kennisontwikkeling voor het plannen van megasuppleties

### 3.6.1 Ontwerp in relatie tot natuur en recreatie

*EF2-1a: Welke lessen zijn er voor het plannen en ontwerpen van (mega)suppleties te halen uit de morfologische ontwikkeling van de Zandmotor, in het bijzonder voor die suppleties waarbij tevens een meerwaarde voor natuur en recreatie wordt beoogd?*

De levensduur van de Zandmotor hangt samen met de vorm waarin een suppletie wordt aangelegd. Een kustlangs meer verdeelde suppletie zal minder snel verspreiden dan een meer geconcentreerde suppletie (Tonnon et al., 2018). De voorkeur voor een meer of minder kustlangs verdeeld zandprofiel zal echter met name afhangen van het belang dat gehecht wordt aan de aanzandingsgebieden op beide flanken (o.a. de landtong) die groter zullen zijn voor de meer geconcentreerde sneller eroderende suppletievorm. Een andere belangrijker parameter voor de ontwikkeling van een megasuppletie is de kruinhoogte. Deze kruinhoogte is op de Zandmotor vrij hoog waardoor de kruin een relatief passief met schelpen bedekt deelgebied is. Ook konden hierdoor de steilranden/kliffen ontstaan. Indien er een lagere kruinhoogte zou worden toegepast dan zou er extra dynamiek zijn tijdens extreme condities (in combinatie met hoogwater) als golven over de kruin heen zouden kunnen spoelen, waardoor zand van de kruin in landwaartse richting wordt getransporteerd en schelpenlagen worden opgeruimd.

Het windgedreven (eolisch) transport zorgt op de Zandmotor voor de groei van zowel de bestaande duinen (Huisman et al., 2018b) als nieuwe embryonale duinen (Van Puijenbroek et al., 2017). Ongeveer 3 tot 10 procent van het totale transport verplaatst zich over het land. Op het strand aan de zuidzijde van de Zandmotor ontstaan daarom embryonale duinen op plaatsen waar ook vegetatie begint te groeien. Dit wordt gezien als waardevolle nieuwe natuur (o.a. voor broedvogels). De groei van deze duinen is ongeveer 5 jaar na aanleg versneld (met name in de jaren 2016 tot 2019). Het huidige ontwerp van de Zandmotor zorgt er voor dat de groei van de embryonale duinen wordt beperkt als gevolg van het afvangen van eolisch transport in de lagune en het duinmeer. Indien meer duingroei gewenst is in de eerste jaren, dan zou er geen lagune of duinmeer moeten worden meegenomen in het ontwerp.

Echter de lagune en het duinmeer zijn in zichzelf waardevol als beschutte ondiepe kustzone met zout tot brak water, waardoor het geschikt is voor andere soorten bodemdieren (schelpen in de lagune) dan de vooroever en onderwatervegetatie (o.a. *Snavelruppia* in het duinmeer). Ook de morfologische verandering van de lagune en het duinmeer wordt sterk beïnvloedt door windtransport (Hoonhout & De Vries, 2017), welke zorgt voor aanzanding aan de westelijke zijde van de lagune en het duinmeer.

Het ligt in de lijn der verwachting dat er door het geleidelijk invangen van zand door de lagune en het duinmeer een vochtige duinvallei zal ontstaan met hoge ecologische waarde. Dit kan echter de nodige tijd kosten, in verband met de diepte van het water in de lagune en het duinmeer. Een ontwerp met een ondiepe lagune en/of duinmeer zou (indien gewenst) sneller kunnen leiden tot de ontwikkeling van een vochtige strandvlakten of duinvalleien.

Ten behoeve van recreatie op de Zandmotor is het wenselijk om ruimte te maken voor verschillende soorten recreanten, zoals nu het geval is bij de Zandmotor. Wandelaars en

paardrijders hebben behoefte aan ruimte waarvoor de haak van de Zandmotor zeer geschikt is, terwijl badgasten gebaat zijn bij een niet al te grote kustdwarse afstand vanaf de duinen (en parkeerplaats) naar de waterlijn én bij goede kwaliteit zand en water. Voor hen zou een minder kustdwars geprononceerde Zandmotor beter zijn. Een beschutte lagune heeft een duidelijke meerwaarde voor recreatie, aangezien dit de enige locatie is op de Hollandse kust waar beginnende en lichtgevorderde kite surfers kunnen oefenen.

Voor ecologische ontwikkeling op de Zandmotor is het wenselijk als de berijding en betreding van de natuur beperkt zijn. Met name de haak van de Zandmotor biedt condities die rustig genoeg zijn, omdat de afstand voor veel strandbezoekers groot is. Op de aansluiting van de Zandmotor met de kust speelt berijding echter een belangrijke rol waardoor vegetatiegroei wordt belemmerd. Mogelijk kan er in het ontwerp van toekomstige maatregelen rekening gehouden worden met vastgelegde zones voor berijding of betreding.

Door de Zandmotor zijn de stromingen, morfologie en bodemsamenstelling op de onderwateroever minder gelijkmatig dan deze waren voor aanleg van de Zandmotor. Er is sprake van een vergroting van de stroomsnelheden van het getij voor de Zandmotor waardoor er aanzienlijk grover sediment ligt op de vooroever zeewaarts van de Zandmotor, en fijner sediment net noordelijk van de Zandmotor. Verder worden er op de kustlijn sinds aanleg meer complexe zandbanken waargenomen (Radermacher et al., 2018). De grotere ruimtelijke en temporele variabiliteit van de zandbanken, getijstromingen en sortering van sediment op de vooroever (Huisman et al., 2018) zorgen voor meer diversificatie in de omgevingscondities, waardoor mogelijk ook de samenstelling van de onderwaternatuur diverser is geworden (i.e. meer soorten; Herman et al., 2020). Indien meer ruimtelijke variatie in omgevingscondities gewenst is, kan een grootschalige suppletie met een aanzienlijke kustdwarse afstand worden gerealiseerd, terwijl een meer kustlangs verdeelde suppletie zou zorgen voor een minder groot effect op de variatie in omgevingscondities.

*EF2-1b: Welke lessen zijn er voor het plannen en ontwerpen van (mega) suppleties te halen uit de morfologische ontwikkeling van de Zandmotor, zodat zwemveiligheid bij suppleties optimaal is geregeld?*

Deze vraag over recreatieveiligheid is beantwoord op basis van de beheersvraag over zwemveiligheid in hoofdstuk 4. Hier komt naar voren dat zwemveiligheid bij de Zandmotor wordt bepaald door zowel de risico's als het aantal strandgebruikers (Radermacher, 2018). Veel zwemveiligheid gerelateerde risico's (o.a. muistromen, versnelling van het getij en circulaties) blijken op te treden op slecht toegankelijke locaties (op de haak) of tijdens extreme weerscondities, en daarmee niet samen te gaan met grote aantallen strandgebruikers. De grote loopafstand tot de haak in het huidige ontwerp heeft bijgedragen aan de zwemveiligheid. Het huidige Zandmotor ontwerp had (met name in de eerste twee jaar) als risico dat er relatief grote stroomsnelheden konden voorkomen in de toegangseu van de lagune. Hierdoor was er een kans dat badgasten, die de toegangseu tijdens vloed overstaken, de lagune in werden gespoeld op dagen met goed weer. De toegangseu is echter een natuurlijke ontwikkeling die niet gestuurd kan worden, waardoor alleen een ontwerp zonder lagune dit risico volledig kan wegnemen.

Verder blijkt uit recent veldonderzoek dat muistromen werden waargenomen bij de strekdammen op de omliggende Delflandse kust, maar niet bij de Zandmotor (Shore, 2019). De Zandmotor is dus zeker niet onveiliger dan de omliggende kust. De belangrijkste lessen voor de zwemveiligheid bij een toekomstige grootschalige suppletie is dat er gelet moet worden op het samengaan van risicovolle situaties (i.e. muistromen, sterke stroming door een 'neer' of vloedstroom in een toegangseu) en het aantal strandgebruikers dat op die plaats op dit moment te verwachten is.

*EF2-1c: Welke lessen zijn er voor het plannen en ontwerpen van (mega)suppleties te halen, gegeven inzichten over de meerwaarde van de Zandmotor voor andere functies (waaronder cultuurhistorie, ruimtelijke ordening en economie).*

De beantwoording van deze vraag over ruimtelijke ordening en economie is gerelateerd aan de kennisvragen over beleving en waardering van de Zandmotor (EF3-2). Deze vraag dient beantwoord te worden in een bruikbaarheidsanalyse. Of de vraag ook beantwoord kan worden is niet duidelijk, omdat er ten behoeve van de beantwoording van deze vraag geen gegevens zijn verzameld.

### **3.6.2 Spin-off voor kennis en innovatie**

*EF2-3a: In hoeverre is de ontwikkelde kennis en methodologie breder toepasbaar voor het ontwikkelen van zandige strategieën en innovaties daarin?*

Er zijn veel studies uitgevoerd die generieke kennis hebben opgeleverd over hydrodynamica, morfologie, sediment, ecologie, grondwater en duinvorming op en nabij de Zandmotor. Ook zijn de modellen die gebruikt zijn toepasbaar voor andere typen suppleties en andere kusten. Een voorbeeld is de ontwikkeling van windtransportmodel Aeolis (Hoonhout, 2017) wat bruikbaar is voor veel complexe kusten, maar ook de sediment sedimentsortingsmodellen zijn bruikbaar voor vooroeversuppleties en andere vormen van de Zandmotor (De Bakker & Huisman, 2019). Op basis van de ontwikkeling van de Zandmotor konden voorspellingen gemaakt worden van de levensduur van megasuppleties (Tonnon et al., 2019). Om de reddingsbrigades te helpen bij het positioneren van mogelijke muistromen bij de Zandmotor zijn numerieke voorspellende modellen opgezet. Met een app voor de telefoon kunnen medewerkers van de reddingsbrigade de actuele stromingscondities bij de Zandmotor zien. Hiermee kunnen ze de situatie beter inschatten. Qua meettechnieken is er bij de Zandmotor geëxperimenteerd met innovatieve methoden om het strand te fotograferen en in te scannen (qua hoogte) met een drone. Er is dus veel kennis verzameld, maar een goede beschrijving en vertaling van de bevindingen voor een breder publiek is nog niet gemaakt.

*EF2-3b In hoeverre wordt de ontwikkelde kennis toegepast bij innovatieve aanpakken in binnen- en buitenland?*

De kennis die is opgedaan over de Zandmotor is gebruikt om te onderzoeken of alternatief kustbeheer met zandige maatregelen mogelijk is in Negril beach (Jamaica) of Bacton (Verenigd koninkrijk; zie Luijendijk & Van Oudenhoven, 2019). Hier zijn de morfologische modellen van de Zandmotor gebruikt om de levensduur en verspreiding van zand te onderzoeken. Ook wordt de Zandmotor gebruikt als voorbeeld van innovatief kustonderhoud als delegaties uit zeer verschillende van landen over de wereld naar Nederland komen. In Nederland is de Zandmotor gebruikt als inspiratie voor een grootschalige suppletie bij de Hondsbossche en Pettemerzeewering, waar gekozen is voor een langere suppletie. Opgemerkt moet worden dat de kustlijn bij de Hondsbossche en Pettemerzeewering actief onderhouden wordt met zandsuppleties, waardoor van een vrij vervormende suppletie (zoals bij de Zandmotor) geen sprake is. Een overzicht van studies waarvoor de Zandmotor als kennisbasis diende is echter niet beschikbaar.

*EF2-3c In hoeverre heeft kennisverspreiding plaatsgevonden, zowel nationaal als internationaal?*

Er zijn veel publicaties verschenen over de Zandmotor. In de referentielijst is een deel hiervan opgenomen, maar om compleet te zijn zou een nog veel grotere lijst van publicaties meegenomen moeten worden. De meeste van deze publicaties richten zich echter op het fysische systeem (hydrodynamica, morfologie, sediment, ecologie, grondwater, duinvorming).

Over de waardering en beleving van de Zandmotor en andere gamma-onderwerpen is weinig onderzoek verricht en daarvoor heeft dan ook vrijwel geen kennisverspreiding plaats gevonden.

### 3.7 Beleving en waardering van de Zandmotor

De beleving en de waardering van de kust tussen Hoek van Holland en Scheveningen is een van de belangrijkste drijfveren geweest voor de aanleg van de Zandmotor.

*EF3-2a: Welke bijdrage levert de Zandmotor aan aantrekkelijker wonen en verblijven in de Haagse/Westlandse regio en waaruit bestaat deze?*

Deze vraag dient beantwoord te worden in een bruikbaarheidsanalyse. Of de vraag ook beantwoord kan worden is niet duidelijk, omdat er ten behoeve van de beantwoording van deze vraag geen gegevens zijn verzameld.

*EF3-2b: Welke bijdrage levert de Zandmotor aan welvaart voor de regio tussen Scheveningen en Hoek van Holland (economische ontwikkeling, beter vestigingsklimaat) en waaruit bestaat deze?*

Deze vraag dient beantwoord te worden in een bruikbaarheidsanalyse. Of de vraag ook beantwoord kan worden is niet duidelijk, omdat er ten behoeve van de beantwoording van deze vraag geen gegevens zijn verzameld.

*EF3-2c: Welke bijdrage levert de Zandmotor in het recreatieve gebruik van de kust tussen Hoek van Holland en Scheveningen en waaruit bestaat deze?*

Deze vraag dient beantwoord te worden in een bruikbaarheidsanalyse. Of de vraag ook beantwoord kan worden is niet duidelijk, omdat er ten behoeve van de beantwoording van deze vraag geen gegevens zijn verzameld.

Verondersteld wordt dat het recreatief strandgebruik in kaart gebracht kan worden door analyse van de gegevens van de ARGUS camera's, maar een dergelijke analyse is (nog) niet uitgevoerd.

## 4 Beheer, gebruik en invloed op de omgeving

### 4.1 Introductie

De beheerders van de Zandmotor stellen vragen die relateren aan het gebruik ten behoeve van recreatie, natuur en grondwaterhuishouding.

*EF4-1: Zijn er negatieve effecten van de Zandmotor voor de recreatieveiligheid en kunnen deze worden voorkomen met beheersmaatregelen en was het beheerprotocol daarbij afdoende?*

*EF4-2: In welke mate zijn recreatie- en natuurdoelstellingen op en rond de Zandmotor te verenigen?*

*EF4-3: Kunnen ongewenste invloeden van de Zandmotor op het grondwater worden voorkomen?*

Ook zijn de effecten op de bestaande natuur in de duinen en natte infrastructuur relevant, alsmede de mogelijke beheersmaatregelen die getroffen kunnen worden.

*EF4-4: Kunnen (negatieve) invloeden van het nieuwe duingebied op natuurwaarden in het bestaande duingebied worden voorkomen?*

*EF4-5: Zijn er ongewenste effecten van de Zandmotor voor de natte infrastructuur en kunnen deze worden voorkomen met beheersmaatregelen?*

### 4.2 Recreatieveiligheid

De eerste vraag gaat over mogelijke negatieve effecten van de Zandmotor voor de recreatieveiligheid. En eventuele beheersmaatregelen (en beheersprotocol) waarmee deze kunnen worden voorkomen.

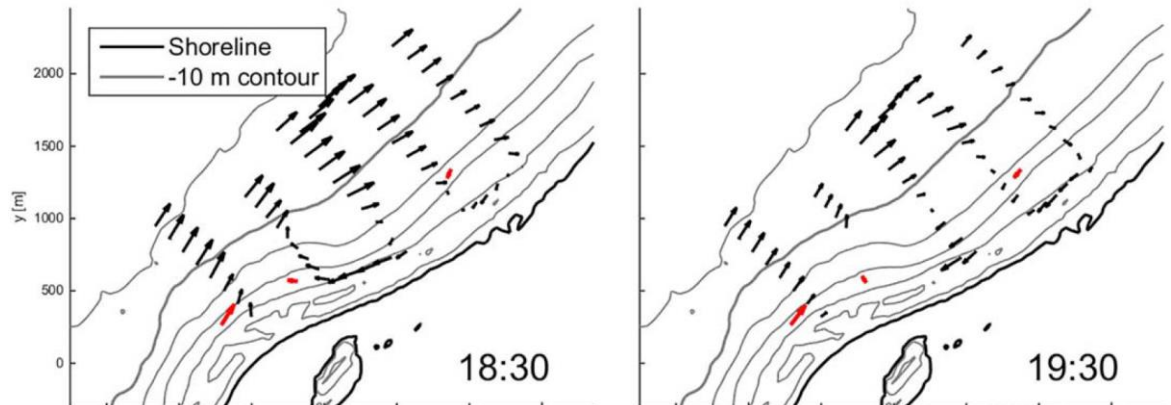
*EF4-1a: Was de zwemveiligheid rondom de Zandmotor beheersbaar?*

De zwemveiligheid bij de Zandmotor heeft doorlopend aandacht gehad van de reddingsdiensten, Rijkswaterstaat, de Provincie Zuid-Holland en onderzoekers van kennisinstituten en universiteiten. Dit heeft geresulteerd in onderzoek naar drie verschillende processen die invloed kunnen hebben op zwemveiligheid, namelijk:

- 1) grootschalige stromingspatronen (i.e. versnelling van getijstroming en circulaties),
- 2) het vullen en ledigen van de lagune; en
- 3) muistromen door golfopzet.

Ter plaatse van de Zandmotor ontstaat een versnelling van de getijstroming omdat de Zandmotor een obstructie vormt voor het getij (Radermacher et al., 2016). Daarnaast zorgt de vernauwing van de stroming er ook voor dat er een grootschalige circulatie (een 'neer') ontstaat op de noordflank tijdens vloed, en waarschijnlijk ook op de zuidzijde tijdens eb. Deze circulatie kan op de noordelijke flank dichtbij de kust zorgen voor de omkering van de getijstroming tijdens vloed (Figuur 4.1). Dit zorgt niet direct voor onveiligere stromingscondities op ondiep water waar muistromen meer van belang zijn.

Echter indien een zwemmer op de kop van de Zandmotor door muistromen naar dieper water wordt meegenomen, dan zou deze circulatie zwemmers verder richting zee kunnen verplaatsen. In de praktijk wordt het effect hiervan op de zwemveiligheid door Radermacher (2018) echter als beperkt bestempeld, aangezien er op deze locatie op grote afstand van de kust maar heel zelden zwemmers zijn. Door de tijd heen is het effect van de Zandmotor bovendien afgenomen als gevolg van het uitvlakken van de kustverstoring van de Zandmotor door natuurlijke processen.



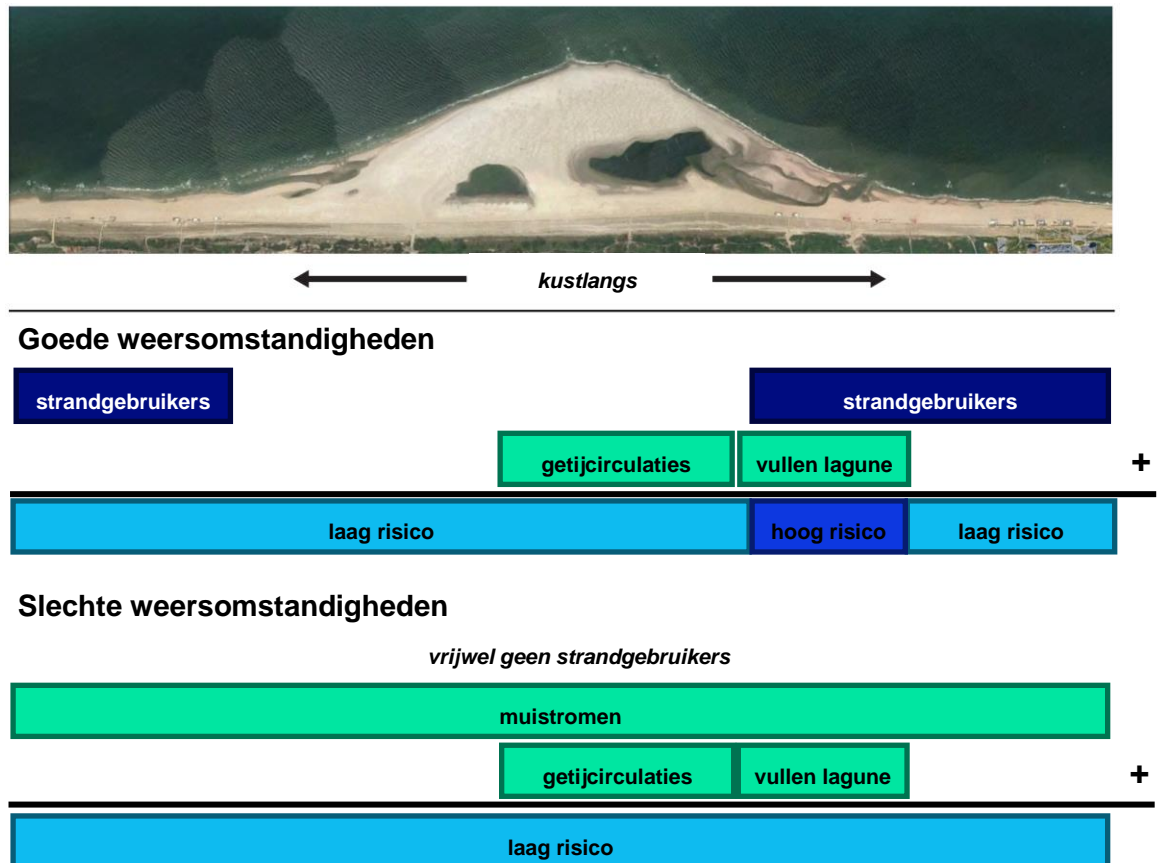
Figuur 4.1 Waarneming van stroming op de noordflank van de Zandmotor tijdens de vloedfase met een varende ADCP (Radermacher et al., 2016)

Ter plaatse van de lagune en toegangseuil zijn aanzienlijk meer bezoekers. Ter plaatse kan het vullen en ledigen van de lagune via het toegangskanaal risicovol zijn voor deze bezoekers. Er zijn een aantal situaties geweest waarbij bezoekers tijdens laag water naar de landtong zijn toegelopen, waarna men zich op de landtong bij opkomend tij door het water in de toegangseuil afgesloten waande van de kust, omdat men zich niet bewust was van (en zich niet geïnformeerd hadden over) het getijverschil. Ondanks de verbinding van de landtong met de haak van de Zandmotor, was het door de grote afstanden niet duidelijk dat er een uitweg was. Verschillende groepen mensen zijn daarom tijdens opkomend water door de reddingsdienst 'gered' op de landtong, via mobiele telefoon konden zij de hulpdiensten inschakelen. Anderen probeerden terug te waden door de toegangseuil van de lagune richting de kust, maar werden soms door de sterke vloedstroming in deze toegangseuil meegenomen richting de lagune. In de lagune zijn de stromingen zeer beperkt. Opgemerkt moet worden dat de getijstroming in deze gevallen niet naar zee toe was, waardoor de risico's ook voor deze situatie beperkt zijn. Door de tijd heen zijn de stroomsnelheden in de toegangseuil afgenomen door verzanding van de lagune en het verlengen van deze geul.

De zwemveiligheidsrisico's door naar de zee toe gerichte stromingen door golfwerking (ook wel 'muistromen') zijn onderzocht door drijvers met GPS los te laten bij de Zandmotor. In 2014 is een meting uitgevoerd door de Technische Universiteit Delft en in september 2019 door Rijkswaterstaat (binnen het project Zandmotor Monitoring). De metingen laten zien dat gevaarlijke muistromen kunnen optreden tijdens zwaardere condities (i.e. bij een significante golfhoogte van tenminste 1 meter), maar dat er in die situaties bijna geen strandgebruikers zullen zijn (Radermacher, 2018). In 2019 werden zelfs geen muistromen gevonden bij de Zandmotor, maar enkel op de omliggende kust ter plaatse van een strekdam. Deze strekdammen op de omliggende Delflandse kust lijken een groter risico mee te brengen voor muistromen dan de Zandmotor (Shore, 2019). De locaties bij de strekdammen zijn echter wel goed voorspelbaar. Om de reddingsbrigades te helpen bij het positioneren van mogelijke muistromen bij de Zandmotor zijn numerieke voorspellende modellen opgezet.

Met een app voor de telefoon kunnen medewerkers van de reddingsbrigade de actuele stromingscondities bij de Zandmotor zien. Hiermee kunnen ze de actuele situatie beter inschatten.

Samenvattend wordt door Radermacher (2018) het zwemveiligheidsrisico gerelateerd aan strandgebruik, waaruit naar voren komt dat de bezoekers zich vaak op de minder risicovolle flanken bevinden. Met name het vullen van de lagune wordt tijdens goede weersomstandigheden als risico aangemerkt, vanwege het risico op het naar binnen spoelen van strandgebruikers die de geul oversteken tijdens opkomend tij. Echter voor een goede beantwoording van deze vraag is het nodig om ook de reddingsbrigade en de veiligheidsregio's te raadplegen, omdat zij het beste kunnen oordelen over de beheersbaarheid van de risico's.



Figuur 4.2 Overzicht van de locatie van risicovolle stromingen, strandgebruikers en hieruit voortkomend risico voor goede en slechte weersomstandigheden (Radermacher, 2018; vertaald naar het Nederlands)

*EF4-1b: Waren de risico's voor de gezondheid door verslechterde zwemwaterkwaliteit in de lagune en/of het duinmeer beheersbaar?*

Verwacht wordt dat de waterkwaliteit van de lagune op termijn slechter zal worden door een steeds kleiner wordende uitwisseling van water met de zee via de geul. De lagune zal op termijn namelijk dichtzanden, vooral door eolische activiteit en in mindere mate door overslag van zand over de spit ten noorden. Op termijn zal alleen nog met springtij het vloedwater de lagune ingevoerd worden of zelfs alleen tijdens storm condities.

De verwachting is dat de lagune ook in jaren na 2018 met name in het zomerseizoen anoxische condities zal ondergaan. Ook zal de lagune een mindere waterkwaliteit hebben door de



jarenlange import van slib en organisch detritus met daarin veel voedingsstoffen waardoor reducerende omstandigheden ontstaan en steeds langer zullen voortduren. De waterkwaliteit van het duinmeer is goed, omdat dit gevuld wordt door regenwater.

Er zijn geen metingen gedaan van de ervaringen van strandgebruikers. Via een doelgerichte set van vraagstellingen aan relevante organisaties zou deze vraag echter te beantwoorden moeten zijn (enquête richting Reddingsbrigade, GG en GD, Surfscholen, IVN afdeling Den Haag, Stadsdeelkantoor Loosduinen, paviljoenhouders etc.).

Voor een goede beantwoording van deze vraag is het nodig om ook de strandbeheerders te raadplegen, omdat zij het beste kunnen oordelen over de beheersbaarheid van de risico's.

#### *EF4-1c: Was de recreatieveiligheid mbt drijfzand beheersbaar?*

Bij de Zandmotor zijn geen grote problemen geweest met drijfzand. Wel waren er waarnemingen van ruiters te paard die typisch plaatsvonden nadat een storm via windtransport grote hoeveelheden zand naar de lagune en het duinmeer zijn getransporteerd. Het lijkt er op dat de manier waarop de Zandmotor gerealiseerd is niet geleid heeft tot gevaarlijke situaties met drijfzand, maar het is niet duidelijk wat er precies voor gezorgd heeft dat de situatie veilig was. Theoretisch kan drijfzand verklaard worden in relatie tot de pakking van het zand en de druk van water in de poriën. Het is echter lastig om met zekerheid een uitspraak te doen waar en wanneer het zich in de toekomst gaat voordoen. Deze vraag is deels te beantwoorden, maar zou eigenlijk afgestemd moeten worden met de strandbeheerder.

#### *EF4-1d: Was de recreatieveiligheid mbt kliffen en/of steilranden beheersbaar?*

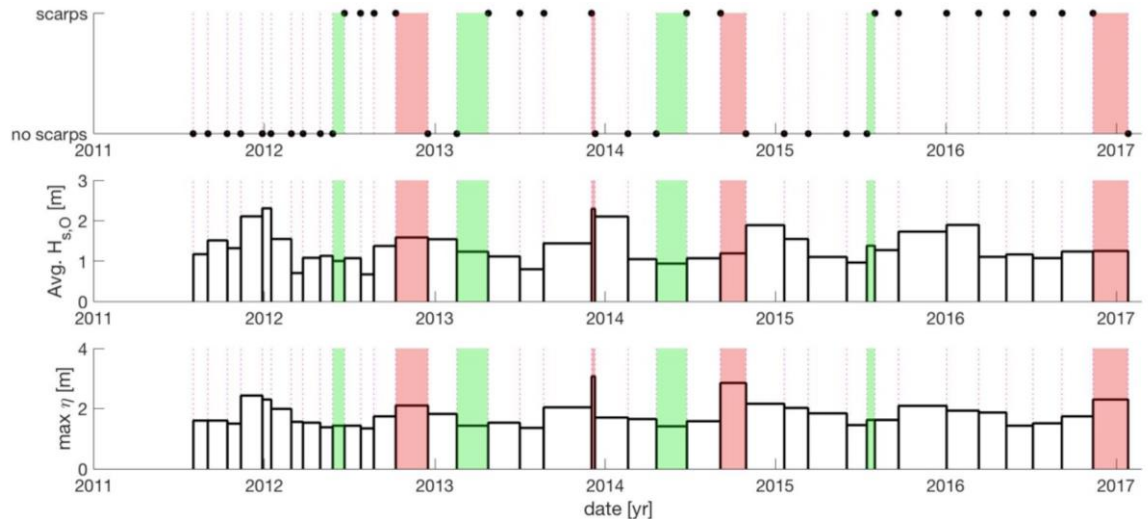
Op de zeewaartse rand van de haak van de Zandmotor ontstonden soms steilranden (of zandkliffen) met een typische hoogte van ongeveer 1 meter, maar deze hoogte kon incidenteel oplopen naar 2 à 3 meter (Figuur 4.3). Deze steilranden brengt in principe een risico mee voor strandgebruikers die vanaf deze randen naar beneden zouden kunnen vallen of rijden.



*Figuur 4.3 Steilrand op de zeewaartse zijde van de Zandmotor (De Schipper et al., 2017; Luchtfoto : Rijkswaterstaat - Joop van Houdt)*

De Schipper et al. (2017) en Van Bemmelen et al. (2020) laten zien dat het ontstaan van deze steilranden gerelateerd is aan licht erosieve condities tijdens zomerstormen, waarbij de golven niet voldoende oploophoogte hebben om ook het bovenste deel van het zandprofiel te

eroderen, terwijl de steilranden opgeruimd worden door de meer extreme winterstormen. In Figuur 4.4 valt dit te zien aan de momenten met steilranden (Engels : 'scarps') die ontstaan tijdens milde condities (groen gearceerd) en weer eroderen tijdens extreme condities met meer golfloop (rood gearceerd). Veldexperimenten met verschillende kleinschalige artificiële heuvels op het strand hebben (zoals verwacht) laten zien dat er eerder een steilrand zal ontstaan bij een initieel steil strandprofiel. Een inschatting van de locatie van de voet van een steilrand kan gemaakt worden met de gebruikelijke golfloop formuleringen waarmee de 2% kans op overschrijding van een niveau berekend kan worden.



Figuur 4.4 Optreden van steilranden (Engels: 'Scarps') bij de Zandmotor in samenhang met de periode gemiddelde golfhoogte ( $H_{s,0}$ ) en golfploophoogte ( $\eta$ ). De momenten dat de steilranden ontstonden zijn groen gearceerd, en de condities waaronder ze erodeerden zijn rood (De Schipper et al., 2017).

*EF4-1e: Heeft aanslibbing in de lagune en de ontwikkeling daaruit van een groen strand de aantrekkelijkheid voor recreanten negatief beïnvloed?*

De ontwikkeling van een groen strand heeft nog niet plaats gevonden, omdat er veel aanzanding heeft plaats gevonden van eolisch getransporteerd zand. Over groen strand en de aantrekkelijkheid voor recreanten is verder geen informatie beschikbaar. Op basis van ervaringen van mensen in het veld (o.a. Shore monitoring) en strandbezoekers kan waarschijnlijk een oordeel gevormd worden. Voor een goede beantwoording van deze vraag is het nodig om ook de reddingsbrigade en de veiligheidsregio's te raadplegen, omdat zij het beste kunnen oordelen over de beheersbaarheid van de risico's.

### 4.3 Verenigbaarheid recreatie en natuur

De mate waarin recreatie- en natuurdoelstellingen op en rond de Zandmotor zijn te verenigen is heel bepalend voor de beoordeling van de kwaliteit van beide functies voor de kust (EF4-2).

*EF4-2a: Wat is de invloed van recreatiebeheer via zonering op natuur op de Zandmotor?*

Over de invloed van recreatiezonering is geen informatie beschikbaar. Deze vraag is dus niet te beantwoorden met de beschikbare informatie.

*EF4-2b: Wat is de invloed van extra bezoekers in het Solleveld op de natuur van de duinen?*

Er zijn geen gegevens over de invloed van extra bezoekers op de natuur van de duinen van Solleveld. Ook worden er geen extra bezoekers toegelaten tot dit gebied door Dunea, namelijk een vast aantal van 5000 bezoekers krijgen jaarlijks toegang.

*EF4-2c: Welk effect heeft berijding/betreding van de Zandmotor op de natuur op het strand en duin?*

De ontwikkeling van bredere, natuurlijk duinen wordt vooral aan de landzijde gefrustreerd door de aanwezigheid van diverse brede banen die vrij intensief door auto's worden bereden. De sporen zijn waarschijnlijk voor het grootste deel afkomstig van "bevoegde instanties". Het is zeer de vraag of al deze rijbewegingen noodzakelijk zijn. Ook Brière et al. (2017) stelt dat berijding door auto's en het schoonmaken van het strand (o.a. met tractoren met zeven) invloed heeft op de ontwikkeling van planten en embryonale duinen op het strand van de Zandmotor.

Ruimtelijk gezien neemt de invloed van autoverkeer af; zones met meer substantiële duinvorming raken onbegaanbaar voor auto's, waardoor het verkeer is teruggedrongen tot een kleiner aantal routes/zandbanen. In deze banen is de invloed juist toegenomen zodat de kans dat hier alsnog duinen ontstaan afneemt. Mogelijk kan het aantal rijbanen nog verder worden terug gebracht, zodat duinvorming verder kan uitbreiden.

De invloed van betreding door bezoekers in de nu gevormde duinen in het zuidelijk deel van de Zandmotor en het aangrenzende strand lijkt minder groot. Duinvorming en vegetatieontwikkeling worden niet zichtbaar beïnvloed. De verstoring van (broed)vogels is nog wel groot omdat bezoekers en honden het hele jaar door vrijwel overal komen. Dankzij de toenemende begroeiing is het effect echter minder dramatisch dan in de eerste 4-5 jaar, toen op de Zandmotor geen enkele vogel tot broeden kwam.

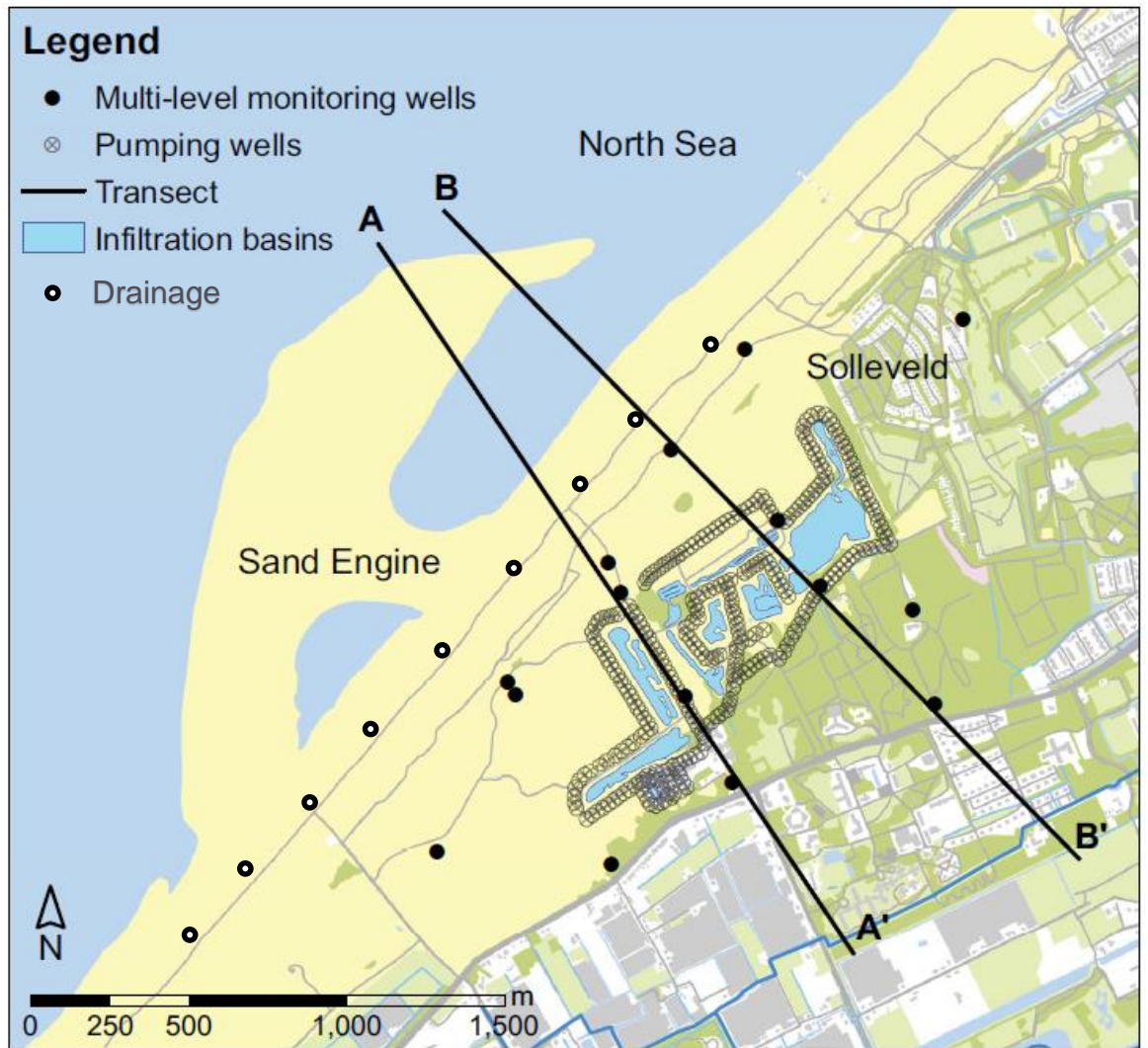
Geconcludeerd kan worden dat berijding en betreding nog steeds een substantieel negatief effect hebben op de ontwikkeling van natuurwaarden op het strand en in de duintjes van de Zandmotor (met name voor broedvogels). Het blijft daarom wenselijk goede afspraken te maken over het gebruik van de Zandmotor door auto's en andere voertuigen. Het strand aan de zeezijde heeft daarbij de voorkeur zodat de banen aan de landzijde kunnen worden afgesloten. Dit deel van de Zandmotor is het meest kansrijk is voor ontwikkeling van brede, natuurlijke, met het bestaande duin geïntegreerde nieuwe duinen. Ook zouden in het broedseizoen geschikte delen van de Zandmotor afsloten kunnen worden voor bezoekers. Ook een laag hekje kan vaak al substantieel helpen.

*EF4-2d: In welke mate wordt de ecologie van het duinmeer beïnvloed door recreatie?*

Er zijn geen metingen uitgevoerd van de ecologie van het duinmeer. Ook is de invloed van recreatie hierop niet onderzocht.

#### 4.4 Grondwater

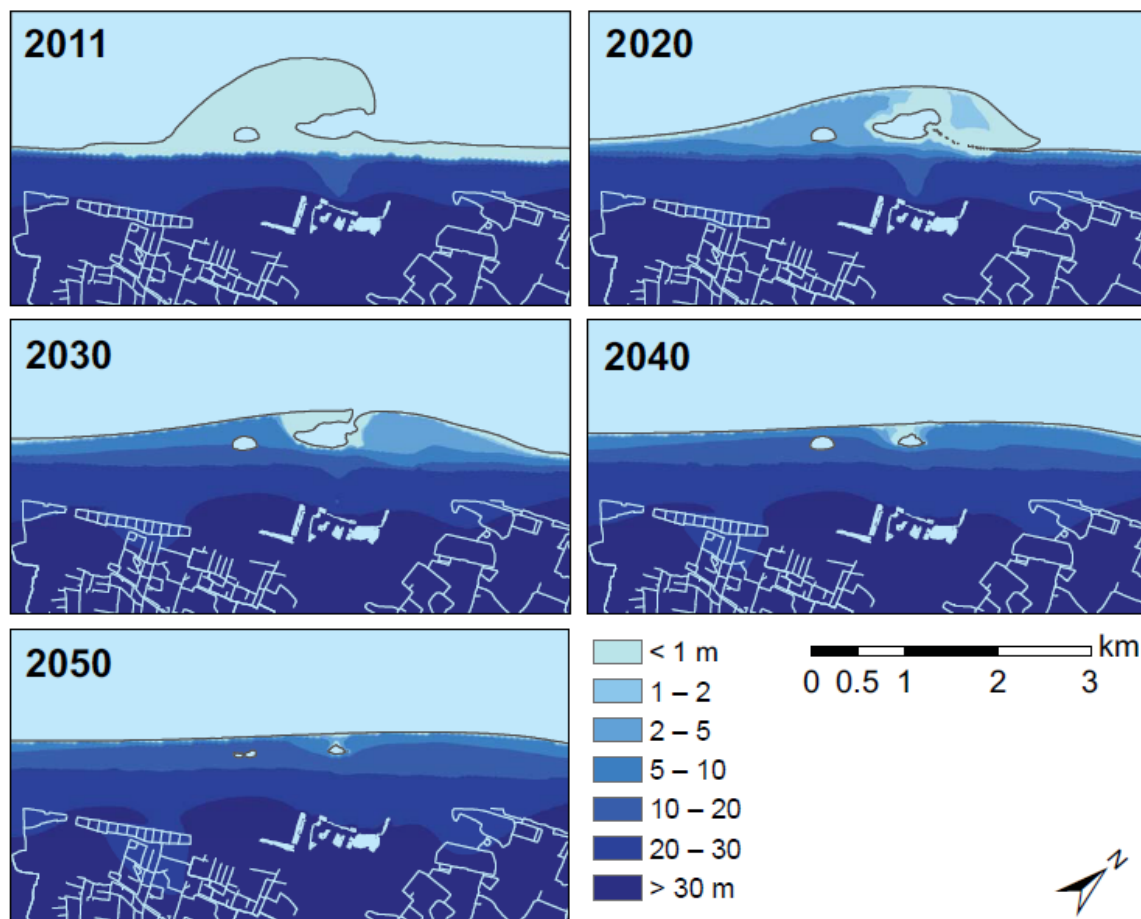
Het voorkomen van eventuele ongewenste invloeden van de Zandmotor op het grondwater van de bestaande duinen (Solleveld) is belangrijk, omdat er anders een negatieve impact zou kunnen zijn op bestaande bebouwing achter het duin of op de winning van drinkwater in de duinen. Over de invloed van de Zandmotor op het grondwater zijn geen meetgegevens verzameld binnen het project Monitoring Zandmotor 2017-2021 (i.e. door Deltares en RWS), maar door Dunea wordt het grondwater wel gemonitord, zoals geïllustreerd in Figuur 4.5.



Figuur 4.5 Overzicht van infiltratiegebieden, pomplocaties voor drinkwatervoorziening en monitoring locaties (figuur op basis van Huizer et al., 2016).

Door Huizer et al. (2016) en Pantelli (2017) is gepubliceerd over de ontwikkeling van de grondwaterhuishouding bij de Zandmotor. Zij geven aan dat de Zandmotor zal zorgen voor een vergroting van de beschikbare voorraad zoetwater van 300 tot 500 duizend kubieke meter per jaar. De zoetwaterbel breidt zich uit onder de Zandmotor (i.e. vergroting van het gebied met zoetwater), maar zorgt er niet voor dat de bestaande zoetwater voorraad tot grotere diepte het zoute water verdringt. In algemene kan een stijging van de voorraad zoet grondwater dus gerealiseerd worden met een grootschalige zandsuppletie.

In de praktijk zijn er echter voorzorgsmaatregelen genomen om een stijging van het grondwater bij de Zandmotor te voorkomen, en daarmee een eventuele vervuiling van de drinkwaterwingebieden met zout grondwater vanaf de Zandmotor. Als gevolg van drainage net zeewaarts van de eerste duinenrij is de grondwaterstand bij de Zandmotor niet noemenswaardig gestegen.



Figuur 4.6 Dikte van de zoetwater grondwaterlaag voor verschillende toekomstige fases van de Zandmotor (Huizer et al., 2016).

Door de zeer beperkte invloed van de Zandmotor op de grondwaterstand is het moeilijk om onderstaande vragen te beantwoorden. Hiervoor dient overleg plaats te vinden met Dunea, de Provincie Zuid-Holland en de onderzoekers bij de universiteit van Utrecht.

*EF4-3a: Is permanente bronnering als preventieve maatregel wel / niet toereikend om verzilting en verontreiniging in deelgebied 1 van het waterwingebied Solleveld (vak 16) te voorkomen?*

*EF4-3b: Is permanente bronnering als preventieve maatregel wel / niet toereikend om verspreiding van verontreinigingen in vak 17 (richting Kijkduinpark) te voorkomen?*

Verondersteld wordt dat de drainagebuizen die net buiten de zeereep van de kustversterking 2008-2009 zijn geplaatst er voor gezorgd hebben dat de grondwaterstand niet verhoogd is, maar hierdoor kan ook geen antwoord meer worden gegeven op de vraag wat zou zijn gebeurd zonder deze drainage.

*EF4-3c: Is tijdelijke bronnering nodig en afdoende om te voorkomen dat nieuw ingebracht zout terecht komt in de putten van Dunea in deelgebied 2 van het waterwingebied Solleveld (vak 14/15)?*

De fase waarin nieuw zout een bijdrage levert is inmiddels voorbij omdat ook op de Zandmotor een verzoeting van het grondwater heeft plaats gevonden.

EF4-3d: Is tijdelijke bronnering nodig en afdoende om te voorkomen dat 'oud zout' boven de kleilaag op NAP -16 m zich in deelgebied 2 dusdanig verspreidt dat het de ruwwaterkwaliteit negatief beïnvloedt (vak 14/15)?

Op basis van Huizer et al. (2016) lijkt er geen reden te zijn om te veronderstellen dat oud-zout de ruwwaterkwaliteit negatief beïnvloedt.

EF4-3e: Is er op termijn sprake van een structurele grondwaterstandverhoging, met risico's op grondwateroverlast langs de binnenduinrand? (deelgebied 3, vak 13)

EF4-3f: Wat is de invloed van veranderingen in (grond) waterstanden in duingebied Dunea achter de derde duinregel?

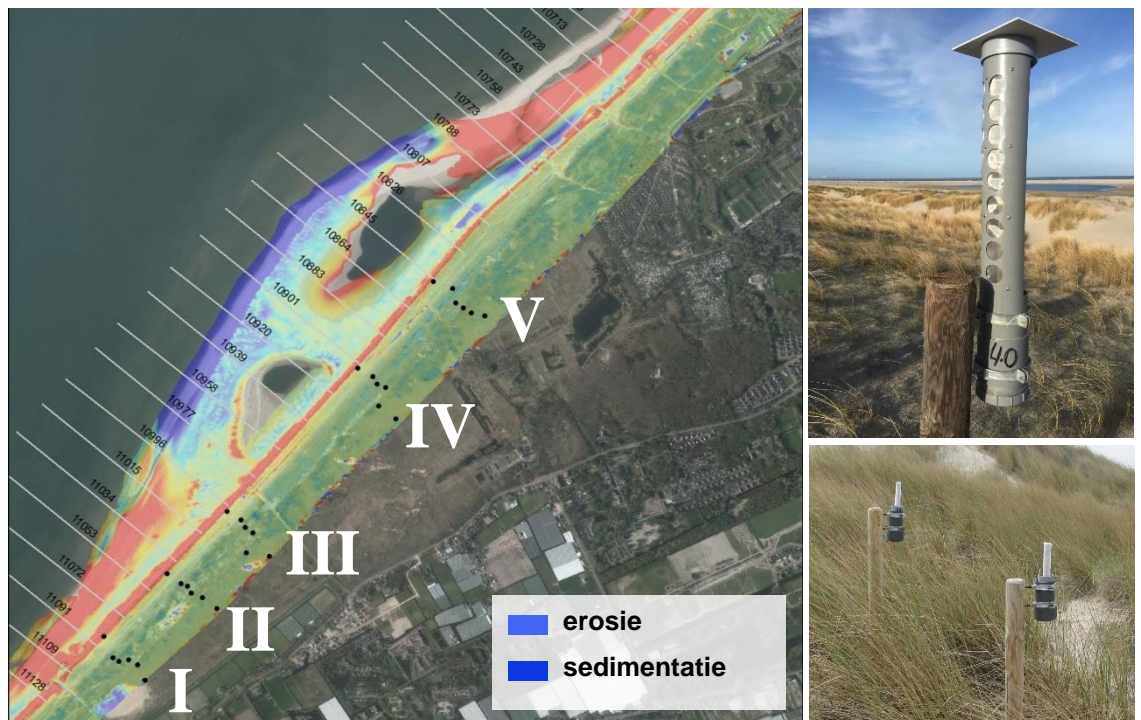
Door de aangebrachte drainage was geen sprake van een verhoging van de grondwaterstand.

#### 4.5 Invloed op natuur bestaande duinen

EF4-4: Kunnen (negatieve) invloeden van het nieuwe duingebied op natuurwaarden in het bestaande duingebied worden voorkomen?

EF4-4a: Wat is de invloed van veranderingen in sandspray in de bestaande buitenduinen?

Het door de wind getransporteerde zand wordt grotendeels ingevangen door de eerste duinrij (i.e. kustversterking 2008-2009) en op de Zandmotor ook grotendeels door de lagune, het duinmeer en de embryonale duinen op het strand. Als gevolg is het transport vanaf de Zandmotor naar de achterliggende duinen van Solleveld verwaarloosbaar.



Figuur 4.7 Meetlocaties van overstuiving van zand (rechtsboven) en zout (rechtsonder) op de transecten I t/m V in combinatie met de erosie en sedimentatie (links). Foto's: Bas Arens.

De instuiving in de eerste duinrij is het hoogst aan de zuidzijde van de Zandmotor (op aansluiting van de Zandmotor met de bestaande kust; transect I t/m III), aanzienlijk minder voor het centrale deel (tussen duinmeer en lagune; transect IV) en zeer laag aan de noordzijde van de Zandmotor (landwaarts van de lagune; transect V). De dynamiek van de duinen is in het zuiden dus groter dan in het noorden. Ook in de vegetatie valt te zien dat de meest vitale en meest overstoven Helm zich aan de zuidzijde van het Zandmotor gebied bevindt.

*EF4-4b: Wat is de invloed van veranderingen in saltspray in de bestaande buitenduinen en wat is de invloed van beheer (begrazing, maaien, verwijderen struwelen) hierop?*

De zout spray naar de bestaande duinen is landwaarts van de zandmotor (transecten IV en V) duidelijk lager dan bij de zuidelijke aansluiting van de Zandmotor met de kust (transecten I tot en met III). Dit geldt voor alle kustdwarse meetlocaties. Opvallend is dat in het meest noordelijke deel van de Zandmotor (transect V), waar de saltspray lager is, aan de voorzijde van de kustversterking al duindoorn opkomt, terwijl dit elders nog niet het geval is. In transect IV, waar de salt spray even hoog is als in transect V is geen duindoorn opgekomen. Mogelijk hangt dit samen met de aanvoer van zand door de wind die op het centrale deel van de Zandmotor (transect IV) aanzienlijk hoger is dan voor het strand landwaarts van de lagune (transect V).

Recente metingen geven een iets hogere zout spray voor het centrale en noordelijke deel van de Zandmotor (transecten IV en V) ten opzichte van de zuidelijke aansluiting van de Zandmotor met de bestaande kust (transecten I en III) dan voorheen. Het zou kunnen dat door de versmalling van de Zandmotor met inmiddels 350 meter de afname van zoutspray in de transecten IV en V kleiner wordt.

*EF4-4c: Wat is de invloed van veranderingen in sand- en saltspray in duingebied Dunea achter de huidige derde duinregel?*

Hier is op dit moment nog niets over te zeggen. Uit de PQ's zal moeten blijken of de uiterst geringe aanvoer van zand en het verschil in salt spray tussen transecten I tot III en IV tot V tot uiting komen in veranderingen in de vegetatiesamenstelling. Overigens is één van de verwachte effecten van een afname in salt spray een toename van verstruweling, maar zijn er veel maatregelen genomen om verstruweling tegen te gaan (ruimen van Duindoorn, begrazing, aanleg van kleine kerven door het Hoogheemraadschap van Delfland).

Momenteel wordt onderzoek gedaan naar embryonale duinen aan de Universiteit Twente. Verwacht wordt dat de gegevens die binnen het project Monitoring Zandmotor worden ingewonnen over embryonale duinen een bijdrage kunnen leveren aan het onderzoek in Twente. Aan de Technische universiteit Delft wordt gewerkt aan de ontwikkeling van modellen die zandbeschikbaarheid in het intergetijdegebied voorspellen (o.a. Nature Coast). Zodoende wordt op het gebied van windtransport vlak bij het duin nog actief onderzoek gedaan. De doorstuiving van zand en zout naar de bestaande duinen en de invloed op de vegetatie (EF4-4) zijn in de onderzoeken nog niet meegenomen en daarom mogelijk interessant. De uitkomsten van deze analyses zijn echter nog niet bekend.

Opgemerkt wordt dat het Hoogheemraadschap Delfland kleine kerfjes heeft aangebracht in een groot deel van de duinen noordelijk van de Zandmotor (i.e. tot aan Kijkduin), die van invloed (kunnen) zijn op de dynamiek van de duinen, wat het beoordelen van effecten van de Zandmotor moeilijker maakt. Ook een recent uitgevoerde verwijdering van duindoorn op de bestaande duinen rond de Zandmotor zal de beoordeling van de veranderingen in de dynamiek van de duinen moeilijker maken.

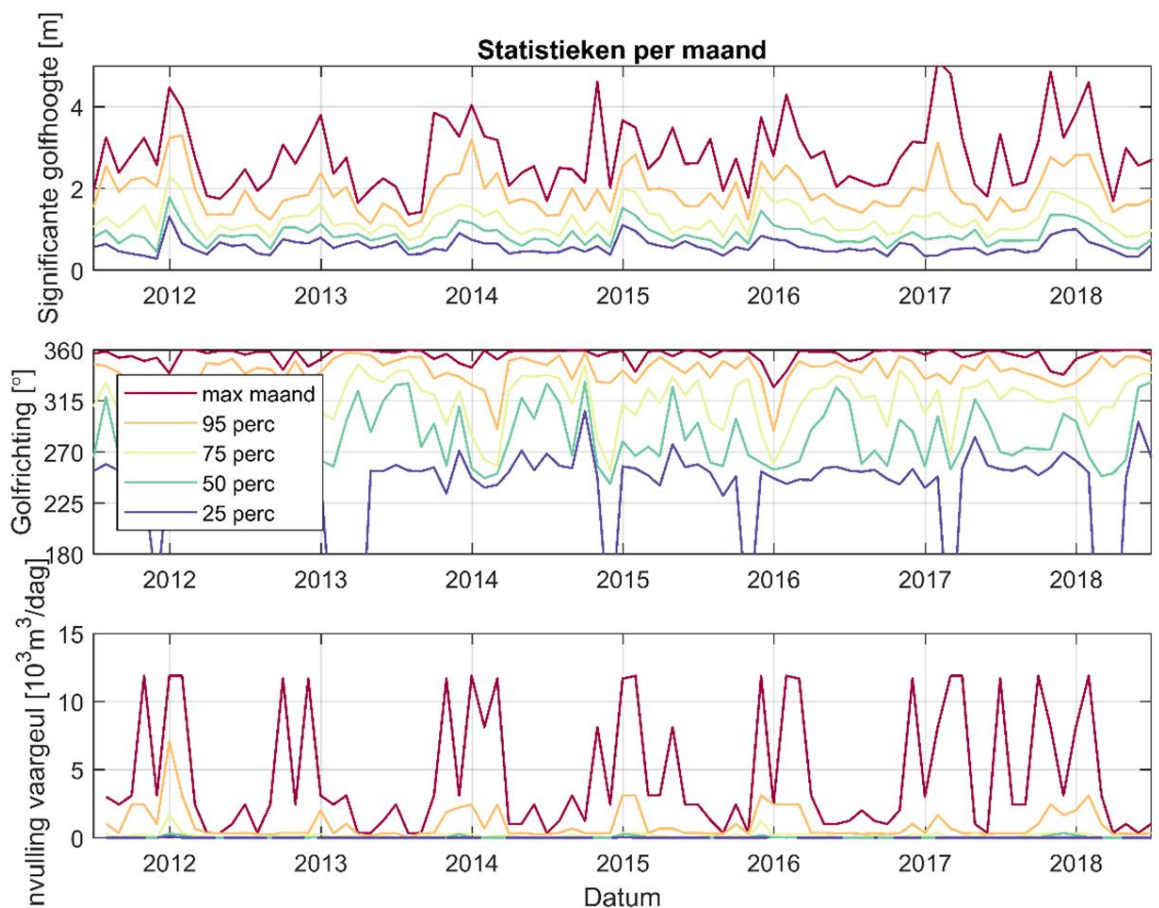
## 4.6 Natte infrastructuur

Eventuele effecten van de Zandmotor op de natte infrastructuur zijn ongewenst. En deze vraag richt zich daarom op de evaluatie van de mogelijke effecten en de haalbaarheid van het treffen beheersmaatregelen.

*EF4-5a: Is er extra aanzanding van de toegangsheulen van de havens van Rotterdam en Scheveningen die aan de Zandmotor toegeschreven kan worden?*

Een invloed van de Zandmotor op de verzanding van de havengeul van Rotterdam is zeer onwaarschijnlijk. De geul wordt afgeschermd door een zeer lange golfbreker en het transport is tevens overwegend in noordelijke richting. Als er al een invloed is, dan zal deze naar verwachting bepaald worden door sediment dat gestort wordt op de Loswal Noord en niet door de Zandmotor of andere kustversterkingen.

Door de aanleg van de Zandmotor is de aanzanding van de vaargeul van Scheveningen in de eerste vijf jaar na aanleg vrijwel niet toegenomen (Leijnse & Huisman, 2019). De invloed van de kustversterking 2008-2009 op de aanzanding van de vaargeul van Scheveningen was groter dan de invloed van de Zandmotor. Opgemerkt dient echter te worden dat de jaarlijkse variaties in golfcondities er voor zorgen dat er grote jaarlijkse verschillen zijn in de mate van aanzanding van de geulen. Deze invloed van de natuurlijke condities op de jaarlijkse aanzanding in de vaargeul van Scheveningen is aanzienlijk groter dan de invloed van de kustversterking of Zandmotor (zie 95% waarde van aanzanding in de vaargeul in Figuur 4.8).



*Figuur 4.8 Aanzanding van de vaargeul bij Scheveningen in relatie tot de optredende condities per maand (Leijnse & Huisman, 2019).*



*EF4-5b: Is er verzanding van de uitlaat van het J.J.J.M. van den Burg gemaal die aan de Zandmotor toegeschreven kan worden?*

Er is verzanding rondom de uitlaat van het J.J.J.M. van der Burg gemaal die aan de aanleg van met name de vooroeversuppletie van de Zandmotor toegeschreven kan worden (Leijnse & Huisman, 2019). Echter de veranderingen als gevolg van kustvoortgang door de kustversterking 2008-2009 waren veel groter dan de impact van de Zandmotor. Het wordt niet verwacht dat de Zandmotor ter plaatse van het gemaal voor veel extra kustvoortgang zal zorgen (Figuur 4.9), maar eerder zal dit dan komen door nieuwe suppleties bij Hoek van Holland, 's Gravenzande of Ter Heijde. Het is niet bekend of de spuicapaciteit beïnvloed wordt door de huidige kustligging.



*Figuur 4.9 J.J.J.M. van der Burg gemaal ten opzichte van de Zandmotor. Foto: Google Earth*

## 5 Conclusies

Dit rapport inventariseert de kennis die beschikbaar is over de ontwikkeling van de Zandmotor als basis voor de evaluatie van de Zandmotor in 2020. Er is gebruikt gemaakt van informatie uit de monitoring die is opgezet door Rijkswaterstaat en uitgevoerd wordt door Deltares, Wageningen Marine Research (WMR), Arens bureau voor duinonderzoek en Vertegaal ecologisch advies. Ook is gepubliceerde informatie van de universiteiten gebruikt. Per evaluatievraag is een beschrijving gegeven van beschikbare informatie. Eventuele nog te vullen lacunes in kennis worden geïdentificeerd. De belangrijkste bevindingen zijn dat:

- Kennisvragen omtrent duingroei en de verspreiding van zand door golven, stromingen en wind (EF1-1 en EF2-1) kunnen redelijk goed beantwoord worden. Hierover is veel gepubliceerd, en de gegevens en bevindingen kunnen ook al breder toegepast worden voor onderzoek naar andere suppleties (EF2-1a en EF2-3).
- De veranderingen in het natuurlijke systeem (lokale sortering van zand en ontwikkeling van de bodemdierpopulaties) op de vooroever van de Zandmotor zijn uitgebreid onderzocht. Over de ontwikkeling van de sedimentsamentelling en ecologie van de lagune is minder bekend, maar kan wel een beeld geschetst worden op basis van aangespoelde schelpdieren (EF2-2 en EF3-1b). Over de ontwikkeling van de habitats op de Zandmotor (i.e. vooroever, strand, lagune en duinmeer) kan op basis van waarnemingen voorzichtig een uitspraak gedaan worden (EF3-1b), maar een expliciete evaluatie is niet uitgevoerd.
- Over vogels is veel informatie verzameld (EF3-1b), maar hieruit kunnen geen kennisregels worden afgeleid in verband met de invloed van andere factoren (i.e. jaarlijkse variatie en andere maatregelen in de omgeving). Over vissen en zeezoogdieren is vrijwel geen informatie (EF3-1b). De invloed van de Zandmotor op deze dieren is ook niet eenvoudig vast te stellen.
- De groei van de bestaande en embryonale duinen door wind-gedreven transport is onderzocht in een aantal studies, waardoor veel bekend is over de processen die zorgen voor transport van zand over het strand én over de volumeontwikkeling van de duinen (EF1-1 en EF3-1a). Ook de effecten op zand en zout overstuiving naar de bestaande duinen en de aanwezige vegetatie worden intensief gemonitord (EF4-4). De groei van embryonale duinen wordt in relatie met vegetatie (EF3-1a) nader onderzocht binnen het project Zandmotor Monitoring (door Arens en Vertegaal) en ook door externe onderzoekers van de Universiteit Twente.
- Over de waardering en beleving van de Zandmotor door bezoekers en omwonenden is geen informatie (EF3-2). Het is niet eenvoudig om dit objectief te onderzoeken.
- Eventuele effecten van de Zandmotor op zwemveiligheid zijn onderzocht (EF4-1) en op basis hiervan kunnen uitspraken worden gedaan die relevant zijn voor over eventuele toekomstige suppleties (EF2-1b).
- Over de recreatie op de Zandmotor in relatie tot natuur is weinig bekend (EF4-2), omdat de recreatie op de Zandmotor niet gemonitord is. Mogelijk kan met gerichte interviews hier meer informatie over worden verkregen.
- Invloed van de Zandmotor op grondwater (EF4-3) lijkt zeer beperkt doordat drainageputten zijn toegepast tussen het strand en de duinen. Over de impact van andere beheersmaatregelen voor het grondwater valt dan ook weinig te zeggen.
- De vraag over een mogelijke invloed van de Zandmotor op de natte infrastructuur (EF4-5) is voldoende onderzocht.

## Referenties

- Arens, S.M., Van Puijvelde, S.P., Brière, C. (2010). Effecten van suppleties op duinontwikkeling. Rapportage geomorfologie. Rapport nr. 2010/OBN142-DK.
- Brière, C., Janssen, S.K.H., Oost, A.P., Taal, M., Tonnon, P.K. (2017). Usability of the climate-resilient nature-based Sand Motor pilot, The Netherlands. *Journal of Coastal Conservation*.
- De Boer, G. (2009). *On the interaction between tides and stratification in the Rhine Region of Freshwater Influence*. PhD thesis. Delft University of Technology.
- De Bakker, A.T.M., Huisman, B.J.A. (2019). Invloed suppleties op bodemsamenstelling. Modelleren van verandering in korrelgrootte. Deltares rapport 11201431-001-ZKS-0018.
- De Schipper, M. A., De Vries, S., Ruessink, G., De Zeeuw, R. C., Rutten, J., Van Gelder-Maas, C., Stive, M. J. F. (2016). Initial spreading of a mega feeder nourishment: Observations of the Sand Engine pilot project. *Coastal Engineering*, 111:23–38.
- De Schipper, M.A., Darnall, J., De Vries, S., Reniers, A.J.H.M. (2017). Beach scarp evolution and prediction. *Proceedings of the Coastal Dynamics conference 2017*.
- De Zeeuw, R.C., De Schipper, M.A., Roelvink, D., De Vries, S., Stive, M.J.F., 2012. Impact of nourishments on nearshore currents and swimmer safety on the Dutch coast, in: *Proceedings of ICCE, Santander, Spain*.
- DHV bv, H+N+S landschapsarchitecten en Alterra (2007). Waterbouwrapport Versterking Delflandse kust, Technische analyse t.b.v. versterking Delflandse kust. Rapport WG-SE20061125, 19 Februari 2007, versie definitief.
- DHV (2010). Monitoring en Evaluatie Plan Zandmotor. Juni 2010.
- Guillén, J., Hoekstra, P. (1996). The "equilibrium" distribution of grain size fractions and its implications for cross-shore sediment transport: A conceptual model. *Marine Geology*, 135:15–33.
- Holzhauser, H., Huisman, B.J.A. (2019). Ecologie in relatie tot bodemsediment. Deltares memo 11201431-003-ZKS-0006.
- Hoonhout, B., De Vries, S. (2016). A process-based model for aeolian sediment transport and spatiotemporal varying sediment availability. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121 (8), 1555-1575.
- Hoonhout, B., De Vries, S. (2017). Aeolian sediment supply at a mega nourishment. *Coastal Engineering* 123, pp. 11–20.
- Herman et al. (2020). In preparation.
- Huisman, B.J.A., De Schipper, M.A., Ruessink, B.G. (2016). Sediment sorting at the Sand Motor at storm and annual time scales. *Marine Geology*, 381: 209–226.

- Huisman, B.J.A. (2018). Herziening evaluatievragen Zandmotor monitoring 2017-2021. Deltares Memo 11201431-001-ZKS-0004, In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL.
- Huisman, B.J.A., Ruessink, B.G., De Schipper, M.A., Luijendijk, A.P., Stive, M.J.F. (2018). Modelling of bed sediment composition changes at the lower shoreface of the Sand Motor. *Coastal Engineering*, Vol. 132, pp. 33-49
- Huisman, B.J.A., Quataert, E., Alvarez Antolinez, J.A. (2018b). Sedimentbalans Delflandse kust. Analyse van morfologische verandering en sedimenttransport rond de Zandmotor in de periode 2011 tot 2018. Deltares rapport 11201431-001-ZKS-0008.
- Huisman B.J.A., Walstra D.J.R., Radermacher M, de Schipper M.A., Ruessink B.G., (2019). Observations and Modelling of Shoreface Nourishment Behaviour. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019; 7(3):59.
- Huizer, S., Oude Essink, G. H. P., Bierkens, M. F. P.: Fresh groundwater resources in a large sand replenishment, *Hydrological Earth Systems Science*, 20, 3149–3166, <https://doi.org/10.5194/hess-20-3149-2016>, 2016.
- Leijnse, T.W.B., Huisman, B.J.A. (2019). Morfologie vaargeul van Scheveningen. Sedimentatie in relatie tot suppleties en natuurlijke condities. Deltares rapport 11201431-001-ZKS-0019.
- Luijendijk, A.P., Ranasinghe, R., De Schipper, M.A., Huisman, B.J.A., Swinkels, C.M., Walstra, D.J.R., Stive, M.J.F., 2018. The initial morphological response of the Sand Engine: A process-based modelling study. *Coastal Engineering* 119, pp. 1-14.
- Luijendijk, A.P., Van Oudenhoven, A. (2019). The Sand Motor: A Nature-Based Response to Climate Change: Findings and Reflections of the Interdisciplinary Research Program NatureCoast. Delft: Delft University Publishers - TU Delft Library.
- Pantelli, N-M (2017). Global assessment of the potential effect of large sand replenishment on fresh groundwater resources. Additional thesis project.
- Post, M. H., Blom, E., Chen, C., Bolle, L. J., Baptist, M. J. (2017). Habitat selection of juvenile sole (*Solea solea* L.): Consequences for shoreface nourishment. *Journal of Sea Research*, 122:19–24.
- Radermacher, M., De Schipper, M.A., Swinkels, C., MacMahan, J.H., Reniers, A.J.H.M. (2017). Tidal flow separation at protruding beach nourishments, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 122.
- Radermacher, M. (2018). *Impact of sand nourishments on hydrodynamics and swimmer safety*. PhD thesis. Delft University of Technology.
- Radermacher, M., De Schipper, M.A., Price, T.D., Huisman, B.J.A., Aarninkhof, S.G.J., Reniers, A.J.H.M. (2018). Behaviour of subtidal sandbars in response to nourishments. *Geomorphology* 313, pp. 1–12.
- Radermacher, M., De Schipper, M.A., Reniers, A.J.H.M. (2018b). Sensitivity of rip current forecasts to errors in remotely-sensed bathymetry. *Coastal Engineering*, Volume 135, pp. 66–76.

- Rutten, J., Ruessink, B. G., Price, T. D. (2018). Observations on sandbar behaviour along a man-made curved coast. *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 43, pp. 134-149.
- Shore, 2019. Veldrapport Drifter Stromingsmetingen Zandmotor. Shore rapport N201905-02. Auteurs M. Verkerk en R.C. de Zeeuw. Oktober 2019.
- Taal, M.D., M.A.M. Löffler, C.T.M. Vertegaal, J.W.M. Wijsman, L. Van der Valk, P.K. Tonnon, 2016. Ontwikkeling van de Zandmotor. Samenvattende rapportage over de eerste vier jaar van het Monitoring- en Evaluatie Programma (MEP). Deltares.
- Taal, M.D., B. Arens, K. Kuijper, P.K. Tonnon, L. van der Valk, C.T.M. Vertegaal, J.W.M. Wijsman, 2017. Uitvoeringsprogramma Monitoring en Evaluatie Pilot Zandmotor, Fase 3: periode 2017 t/m 2021.
- Tonnon, P.K., L. van der Valk, H. Holzhauer, M.J. Baptist, J.W.M. Wijsman, C.T.M. Vertegaal, S.M. Arens, 2011. Uitvoeringsprogramma Monitoring en Evaluatie Pilot Zandmotor. *Deltares/IMARES*. Rapport 1203519-000.
- Tonnon, P.K., Huisman, B.J.A., Stam, G.N., Van Rijn, L.C., 2018. Numerical modelling of erosion rates, life span and maintenance volumes of mega nourishments. *Coastal Engineering*, Vol. 131, pp. 51-69.
- Van Bemmelen, C.W.T., De Schipper, M.A., Darnalla, J., Aarninkhof, S.G.J. (2020). Beach scarp dynamics at nourished beaches. *Coastal Engineering*, in review.
- Van der Valk, L. (2019). Schelpdierfauna in de lagune van de Zandmotor 2012-2019. Deltares memo 11201431-003-ZKS-0002.
- Van Egmond, E. M., van Bodegom, P. M., Berg, M. P., Wijsman, J. W. M., Leewis, L., Janssen, G. M., Aerts, R. (2018). A mega-nourishment creates novel habitat for intertidal macroinvertebrates by enhancing habitat relief of the sandy beach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 207, 232-241.
- Van Puijenbroek, M.E.B., Limpens, J., De Groot, A.V., Riksen, M.J.P.M., Gleichman, M., Slim, P.A., Van Dobben, H.F., Berendse, F. (2017). Embryo dune development drivers: beach morphology, growing season precipitation, and storms. *Earth surface processes and landforms*.
- Van der Weerd, A.J., Wijnberg, K.M. (2016). Aeolian Sediment Flux Derived from a Natural Sand Trap. Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia). *Journal of Coastal Research* (SI) 75, pp. 338-342.
- Wijsman, J., Van den Ende, D., Brummelhuis, E. (2018). Bodemdiergemeenschap in de vooroever en op het natte strand van de zandmotor in het najaar 2017. Datarapport : Wageningen University & Research rapport C073/18.
- Williams, I.A., Wijnberg, K.M., Hulscher, S.J.M.H. (2018). Detection of aeolian transport in coastal images. *Aeolian Research* 35, pp. 47-57.

## A Overzicht evaluatievragen

De evaluatievragen voor de Zandmotor zijn opgesteld binnen het Uitvoeringsprogramma van de Zandmotor monitoring (Tonnon et al, 2011) en na de tussenevaluatie in 2016 licht gewijzigd om ze beter toetsbaar te maken (Taal et al., 2017; Huisman, 2018). In het kort kunnen ze gegroepeerd worden op basis van 1) kustveiligheid, 2) fysische / ecologische kennisontwikkeling en innovatie, 3) het creëren van hoogwaardige natuur- en recreatiegebieden en 4) het beheer van het gebied (i.e. effecten van de Zandmotor op recreatieveiligheid, de natuurlijke omgeving, grondwater en infrastructuur).

EF 1-1: Zorgt de Zandmotor langjarig voor instandhouding van kustfundament en basiskustlijn en in welke mate in ruimte en tijd leidt dit tot natuurlijke duinaangroei, in het kustgebied van Hoek van Holland tot Scheveningen?

- EF1-1a: Hoe groot is de zandtoename in de kernzone van de primaire waterkering in ruimte en tijd sinds de aanleg van de Zandmotor?
- EF1-1b: Welk deel van de extra hoeveelheid zand die is toegevoegd via de Zandmotor is nog aanwezig in het gebied en draagt nu en in de toekomst bij aan de handhaving van de basiskustlijn?
- EF1-1c: Welk deel van de extra hoeveelheid zand die is toegevoegd via de Zandmotor is nog aanwezig in het kustfundament en hoe is dit daarbinnen verdeeld?

EF2-1: Levert de Zandmotor nieuwe fysische kennis op waarmee kustonderhoud en een meerwaarde voor recreatie en natuur gezamenlijk te realiseren zijn?

- EF2-1a: Welke lessen zijn er voor het plannen en ontwerpen van (mega)suppleties te halen uit de morfologische ontwikkeling van de Zandmotor, in het bijzonder voor die suppleties waarbij tevens een meerwaarde voor natuur en recreatie wordt beoogd?
- EF2-1b: Welke lessen zijn er voor het plannen en ontwerpen van (mega) suppleties te halen uit de morfologische ontwikkeling van de Zandmotor, zodat zwemveiligheid bij suppleties optimaal is geregeld?
- EF2-1c: Welke lessen zijn er voor het plannen en ontwerpen van (mega)suppleties te halen, gegeven inzichten over de meerwaarde van de Zandmotor voor andere functies (waaronder cultuurhistorie, ruimtelijke ordening en economie).

EF2-2: Heeft een megasuppletie als de Zandmotor een meerwaarde voor de natuur ten opzichte van reguliere suppleties? En waardoor wordt deze meerwaarde veroorzaakt?

- EF2-2a: Via welke mechanismen veroorzaakt de Zandmotor veranderingen in de gradiënten in sedimentsamenstelling (korrelgrootteverdeling en organisch stof gehalte) op het natte strand en de vooroever?
- EF2-2b: Helpt het eenmalig neerleggen van een grote hoeveelheid zand om een natuurlijkere bodemdiersamenstelling in de ondiepe kustzone te krijgen in vergelijking met een regulier suppletieschema en leidt dit ook tot langer levende soorten?

EF2-3 : Wat is de spin-off van de Zandmotor voor kennis en innovatie?

- EF2-3a: In hoeverre is de ontwikkelde kennis en methodologie breder toepasbaar voor het ontwikkelen van zandige strategieën en innovaties daarin?
- EF2-3b In hoeverre wordt de ontwikkelde kennis toegepast bij innovatieve aanpakken in binnen- en buitenland?
- EF2-3c In hoeverre heeft kennisverspreiding plaatsgevonden, zowel nationaal als internationaal?

EF3-1a: Zorgt de Zandmotor voor toevoeging van een aantrekkelijk natuurgebied op de Zandmotor zelf en in de jonge duinen tegen het bestaand duin?

- EF3-1a1: In hoeverre ontwikkelen zich bredere, meer natuurlijke en dynamische duinen?
- EF3-1a2: Wat is de invloed van dynamische wijze van aanleg en beheer op de kwaliteit?
- EF3-1a3: Wat is de invloed van het recreatiebeheer ('flexibel zoneren')?

EF 3-1b: Hoe ontwikkelt de tijdelijke nieuwe natuur in het intergetijdengebied en de lagune van de Zandmotor zich?

- EF3-1b1: Hoe heeft de diversiteit in sedimentsamenstelling zich ontwikkeld in de lagune en de vooroever?
- EF3-1b2: Heeft de Zandmotor nieuwe habitats en meer variatie in habitats gecreëerd. Leiden deze tot hogere natuurwaarden in intergetijdgebied en ondiepe kustzone? Is dit te kwantificeren voor bodemdieren, vissen, vogels en zeezoogdieren?
- EF3-1b3: Hoe heeft de bodemdiergemeenschap zich ontwikkeld in de lagune en de vooroever?
- EF3-1b4: Hoe heeft de kinderkamerfunctie van het gebied zich ontwikkeld?
- EF3-1b5a: Welke ontwikkelingen vertonen broedvogels in het gebied?
- EF3-1b5b: Welke ontwikkelingen vertonen steltlopers en zeevogels in het gebied?
- EF3-1b6: Levert de Zandmotor een foerageer en rustgebied voor zeezoogdieren?

EF3-2: Hoe is de beleving en de waardering van de kust tussen Hoek van Holland en Scheveningen veranderd door aanleg van de Zandmotor?

- EF3-2a: Welke bijdrage levert de Zandmotor aan aantrekkelijker wonen en verblijven in de Haagse/Westlandse regio en waaruit bestaat deze?
- EF3-2b: Welke bijdrage levert de Zandmotor aan welvaart voor de regio tussen Scheveningen en Hoek van Holland (economische ontwikkeling, beter vestigingsklimaat) en waaruit bestaat deze?
- EF3-2c: Welke bijdrage levert de Zandmotor in het recreatieve gebruik van de kust tussen Hoek van Holland en Scheveningen en waaruit bestaat deze?

EF4-1: Zijn er negatieve effecten van de Zandmotor voor de recreatieveiligheid en kunnen deze worden voorkomen met beheersmaatregelen en was het beheerprotocol daarbij afdoende?

- EF4-1a: Was de zwemveiligheid rondom de Zandmotor beheersbaar?
- EF4-1b: Waren de risico's voor de gezondheid door verslechterde zwemwaterkwaliteit in de lagune en/of het duinmeer beheersbaar?
- EF4-1c: Was de recreatieveiligheid mbt drijfzand beheersbaar?
- EF4-1d: Was de recreatieveiligheid mbt kliffen en/of steilranden beheersbaar?
- EF4-1e: Heeft aanslibbing in de lagune en de ontwikkeling daaruit van een groen strand de aantrekkelijkheid voor recreanten negatief beïnvloed?

EF4-2: In welke mate zijn recreatie- en natuurdoelstellingen op en rond de Zandmotor te verenigen?

- EF4-2a: Wat is de invloed van recreatiebeheer via zonering op natuur op de Zandmotor?
- EF4-2b: Wat is de invloed van extra bezoekers in het Solleveld op de natuur van de duinen?
- EF4-2c: Welk effect heeft berijding/betreding van de Zandmotor op de natuur op het strand en duin?
- EF4-2d: In welke mate wordt de ecologie van het duinmeer beïnvloed door recreatie?
- Dit onderdeel wordt door de Provincie ZH geëvalueerd.

EF4-3: Kunnen ongewenste invloeden van de Zandmotor op het grondwater worden voorkomen?

- EF4-3a: Is permanente bronnering als preventieve maatregel wel / niet toereikend om verzilting en verontreiniging in deelgebied 1 van het waterwingebied Solleveld (vak 16) te voorkomen?
- EF4-3b: Is permanente bronnering als preventieve maatregel wel / niet toereikend om verspreiding van verontreinigingen in vak 17 (richting Kijkduinpark) te voorkomen?
- EF4-3c: Is tijdelijke bronnering nodig en afdoende om te voorkomen dat nieuw ingebracht zout terecht komt in de putten van Dunea in deelgebied 2 van het waterwingebied Solleveld (vak 14/15)?
- EF4-3d: Is tijdelijke bronnering nodig en afdoende om te voorkomen dat 'oud zout' boven de kleilaag op NAP -16 m zich in deelgebied 2 dusdanig verspreidt dat het de ruwwaterkwaliteit negatief beïnvloedt (vak 14/15)?
- EF4-3e: Is er op termijn sprake van een structurele grondwaterstandstandverhoging, met risico's op grondwateroverlast langs de binnenduinrand? (deelgebied 3, vak 13)
- EF4-3f: Wat is de invloed van veranderingen in (grond) waterstanden in duingebied Dunea achter de derde duinregel?

EF4-4: Kunnen (negatieve) invloeden van het nieuwe duingebied op natuurwaarden in het bestaande duingebied worden voorkomen?

- EF4-4a: Wat is de invloed van veranderingen in sandspray in de bestaande buitenduinen?
- EF4-4b: Wat is de invloed van veranderingen in saltspray in de bestaande buitenduinen en wat is de invloed van beheer (begrazing, maaien, verwijderen struwelen) hierop?
- EF4-4c: Wat is de invloed van veranderingen in sand- en saltspray in duingebied Dunea achter de huidige derde duinregel?

EF4-5: Zijn er ongewenste effecten van de Zandmotor voor de natte infrastructuur en kunnen deze worden voorkomen met beheersmaatregelen?

- EF4-5a: Is er extra aanzanding van de toegangseulen van de havens van Rotterdam en Scheveningen die aan de Zandmotor toegeschreven kan worden?



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)