

Evaluatie van 10 jaar Zandmotor

Bevindingen uit het Monitoring- en Evaluatie Programma (MEP)
voor de periode 2011 tot 2021



Auteur(s)

B.J.A. Huisman
J.W.M. Wijsman
S.M. Arens
C.T.M. Vertegaal
L. van der Valk
S.C. van Donk
H.S.I. Vreugdenhil
M.D. Taal

Partners

Wageningen Marine Research
Arens Bureau voor Strand en Duinonderzoek
Vertegaal Ecologisch Advies en Onderzoek

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving

The logo for Deltares, featuring the word "Deltares" in a bold, blue, sans-serif font.The logo for Vertegaal, featuring the word "VERTEGAAL" in a serif font, with a green horizontal line passing through the middle of the letters. Below the word, the text "ECOLOGISCH ADVIES EN ONDERZOEK" is written in a smaller, sans-serif font.

Evaluatie van 10 jaar Zandmotor

Bevindingen uit het Monitoring- en Evaluatie Programma (MEP)
voor de periode 2011 tot 2021




Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	mevrouw C. van Gelder-Maas
Referenties	Offerte Monitoring en Evaluatie Zandmotor, 11201431, zaaknummer: 31131954
Trefwoorden	Zandmotor, Monitoring- en Evaluatie Programma, Kustonderhoud, Natuur, Recreatie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	01-11-2021
Projectnummer	11201431-003
Document ID	11201431-003-ZKS-0016
Pagina's	84
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

B.J.A. Huisman,
J.W.M. Wijsman
S.M. Arens
C.T.M. Vertegaal
L. van der Valk
S.C. van Donk
H.S.I. Vreugdenhil
M.D. Taal

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	B.J.A. Huisman 	W.P. de Boer 	A.G. Segeren 	

Samenvatting

In 2011 is de grootschalige zandsuppletie 'De Zandmotor' aangelegd (21,5 miljoen m³) met als doel om kennis op te doen over innovatieve suppleties én om de recreatieve, natuur- en kustonderhoudsfuncties van de Delflandse kust te versterken. Uniek aan de Zandmotor is dat dit 128 hectare grote gebied door de tijd heen mag veranderen door natuurlijke kustvormende processen. Golven, getijstromingen en wind verspreiden het zand langs de kust én landwaarts naar de duinen.

In dit rapport wordt de ontwikkeling van de Zandmotor over de periode 2011 tot 2021 beoordeeld in opdracht van Rijkswaterstaat. De vooraf vastgestelde doelstellingen in de Milieu Effect Rapportage (MER) en voor beheer zijn leidend voor de beoordeling, namelijk:

- I. Stimuleren van natuurlijke duinaangroei op de kust van Delfland ten behoeve van veiligheid, natuur en recreatie;
- II. Genereren van kennisontwikkeling en innovatie;
- III. Toevoegen aantrekkelijk (tijdelijk) recreatie- en natuurgebied.
- IV. Beheerdoelstellingen, die zich richten op de recreatieveiligheid (o.a. voor badgasten), invloed van recreatief gebruik op de ecologische ontwikkeling én de effecten van de Zandmotor op grondwater, vegetatie in de bestaande duinen én infrastructuur.



I : stimuleren natuurlijke duinaangroei

De Zandmotor heeft gezorgd voor natuurlijke duinaangroei op de kust. De eerste duinenrij groeide geleidelijk aan met 14 m³/m/jaar. Op de Zandmotor ontwikkelden zich sinds 2016 ook nieuwe duintjes ('embryonale duinen'). De groei van de embryonale duinen was (met name in de eerste jaren na aanleg) minder groot dan voorzien, wat veroorzaakt werd door het afvangen van zand in het duinmeer en de lagune. De haak lag te hoog om echt dynamisch te zijn. Door het aanbrengen van een grote zandbuffer in de kustzone draagt de Zandmotor bij aan de lange termijn kustveiligheid. Geleerd is dat een dergelijke megasuppletie de natuurlijke duinaangroei stimuleert, maar dat het ontwerp de mate waarin dit plaatsvindt sterk beïnvloedt. Indien het wenselijk is dat er zeer snelle duinaangroei is, dan kan deze beter lager en zonder binnenmeer of lagune worden aangelegd.

II : Genereren kennisontwikkeling en innovatie

Dankzij de Zandmotor werden een groot aantal kennisprogramma's opgezet. Dit leidde tot verdieping van de systeemkennis van grootschalige suppleties, innovaties in meettechnieken (o.a. met drones) en breed toepasbare rekenmodellen. Opgedane kennis is al toegepast in andere projecten, zoals voor de Hondsbossche Duinen. Ook de metingen kunnen nog jaren gebruikt worden ter versterking van de kennisbasis van het kuststelsel, en geven de mogelijkheid om ons op een gedegen manier voor te bereiden op toekomstige uitdagingen, in het bijzonder een versnelde zeespiegelstijging. Het gaat bij de Zandmotor dus niet alleen om de huidige kustveiligheid, maar vooral om het zekerstellen van de lange termijn kustveiligheid. Ook kon de Nederlandse watersector zich internationaal profileren dankzij de Zandmotor.

III : Toevoegen aantrekkelijk recreatie- en natuurgebied

De Zandmotor voegt extra recreatieve mogelijkheden toe aan de Delflandse kust. Wandelaars, hardlopers, badgasten en kitesurfers zijn de belangrijkste gebruikers. Zij waarderen de Zandmotor hoger dan een regulier strand in de omgeving. Opvallend was dat er ook onvoorzien gebruik was van de Zandmotor voor kunst en cultuur uitingen, door amateurarcheologen en paleontologen. Dit is spontaan ontstaan en geleerd is dat de afwezigheid van regie dit niet verhinderde of zelfs de kans op ontstaan verhoogde.

Op de Zandmotor is een landschap ontstaan met een hoge mate van natuurlijkheid, met name omdat helmgras zorgde voor duinvorming. De vegetatiegroei kwam na vijf jaar op gang. Ook is de groei van de vegetatie (en embryonale duintjes) vertraagd door berijding met auto's en door het schoonmaken van het strand.

De aantallen bodemdieren namen toe na aanleg van de Zandmotor. Er kon niet vastgesteld worden of dit door de Zandmotor kwam. Duidelijk is wel dat er meer variatie in de omgevingscondities ontstond (qua sediment en stroomsnelheden) waardoor de diversiteit in van de bodemdierleefgemeenschappen toenam. Een groot aantal rustende en foeragerende vogels bleek gebruik te maken van de Zandmotor, maar er werden, door verstoring, maar weinig broedvogels waargenomen. De conclusie is dat door de Zandmotor een aantrekkelijk natuur- en recreatiegebied is ontstaan. In het ontwerp en/of beheer kunnen keuzes gemaakt worden om natuur of recreatie meer ruimte te geven.

IV : Beheer

De Zandmotor moet beheerd worden om de recreatieveiligheid te waarborgen én de effecten van recreatie op de natuurontwikkeling (zoals vegetatiegroei op het strand) te reguleren. Beheer is ook nodig vanwege eventuele effecten van de Zandmotor op de natuur van de bestaande duinen, het grondwater en de aanzanding van vaargeulen.

De zwemveiligheid bij de Zandmotor was goed beheersbaar dankzij het werk van de reddingsbrigade. De situatie was qua risico's op muistromen zelfs veiliger dan op de omliggende kust. Hogere stroomsnelheden traden soms wel op, maar dit gebeurde overwegend op delen van de Zandmotor die verder van de strandopgangen lagen (zoals op de haak) of tijdens extreme omstandigheden. Hierdoor was het aantal recreanten in deze situaties beperkt en daarmee ook de risico's voor zwemveiligheid. Natuurbeheer op de Zandmotor is beperkt geweest, omdat de Zandmotor bedoeld was als een open gebied zonder dwingende opdeling in natuur- en recreatiegebieden. De ontwikkeling van de vegetatie en embryonale duinen op de Zandmotor verliep hierdoor minder snel, met name door de berijding met auto's. Ook het schoonmaken van het strand met tractoren heeft de vegetatiegroei vertraagd.

De omstandigheden in de duinen van Solleveld, landwaarts van de Zandmotor, zijn enigszins beïnvloed door de Zandmotor. De instuiving van zand en zout is verminderd, waardoor de groei van duindoorn is versneld. Het was mogelijk dit tegen te gaan door beheer in de duinen van Solleveld, zoals het weghalen van duindoorn en het maken van kerven. De Zandmotor heeft geen invloed gehad op de grondwaterstand in de duinen, omdat drainagebuizen zijn geplaatst. Ook op de aanzanding van de vaargeulen van Scheveningen en Rotterdam is geen significante invloed gevonden.

Inhoud

Samenvatting	4		
1 Inleiding	8		
1.1 Achtergrond van de Zandmotor	8		
1.2 Doelen Zandmotor & Evaluatievragen	8		
1.3 Context	9		
1.4 Leeswijzer	10		
2 Achtergrond van de Zandmotor	11		
2.1 Bescherming tegen het water	11		
2.2 Aanpak van het Nederlandse kustonderhoud	13		
2.3 De wijze van suppleren van zand	13		
2.4 Locatie van de Zandmotor	15		
2.5 Ontwerp	15		
2.6 Monitoring	16		
3 Kustdynamiek en duingroei	19		
3.1 Verwachtingen en doelen	19		
3.2 Landschapsdynamiek van de Zandmotor	20		
3.2.1 Kustlangse verspreiding van zand	20		
3.2.2 Golven als drijvende kracht	21		
3.2.3 Invloed op de getijstroming	22		
3.2.4 Zandbankdynamiek en stromingen	23		
3.2.5 Ontwikkeling van de lagune en van het duinmeer	24		
3.2.6 Vorming van kliffen op de haak	25		
3.3 Duinontwikkeling	26		
3.4 Vooroever van de Zandmotor	27		
3.4.1 Verandering van de vooroever	27		
3.4.2 Vooroever-suppleties	28		
3.4.3 Sedimentsamenstelling van de vooroever	29		
3.5 Zandbalans	30		
3.6 Evaluatie kust- en duinontwikkeling	32		
4 Natuurontwikkeling	35		
4.1 Verwachtingen en doelen	35		
4.2 De leefomgeving in de vooroever	36		
4.3 Natuur in de lagune en het duinmeer	39		
4.4 Duinvorming op het strand en op de duinversterking	41		
4.5 Duinen van Solleveld	45		
4.6 Vogels, vissen en zeezoogdieren	46		
4.7 Evaluatie natuurontwikkeling	48		
5 Beleving, waardering, beheer en omgevingseffecten	51		
5.1 Verwachtingen en doelen	51		
5.2 Beleving en waardering van de Zandmotor	52		
5.2.1 Recreatie	52		
5.2.2 Kunst, Cultuur en Archeologie	53		
5.3 Beheer en omgevingseffecten	54		
5.3.1 Recreatieveiligheid	54		
5.3.2 Invloed recreatie op natuur	56		
5.3.3 Grondwaterkwaliteit in de duinen	57		
5.3.4 Natuurbeheer duinen van Solleveld	57		
5.3.5 Effecten op natte infrastructuur	57		
5.4 Evaluatie beleving, waardering, beheer en omgevingseffecten	58		

6	Kennisontwikkeling	61
6.1	Verwachtingen en doelen	61
6.2	Generieke kennis	61
6.3	Toepassing van kennis	62
6.4	Kennisprogramma's en netwerken	63
6.5	Evaluatie van kennisontwikkeling	64
7	Conclusies	66
7.1	Bevindingen	66
7.2	Aanbevelingen	68
	Referenties	71
A	Beantwoording evaluatievragen	75
A.1	MER I : Het stimuleren van natuurlijke duinaangroei	75
A.2	MER II : Kennisontwikkeling en Innovatie	76
A.3	MER III : Natuur	78
A.4	Beheer	80

1 Inleiding

1.1 Achtergrond van de Zandmotor

In 2011 is de 'Zandmotor' zandsuppletie geplaatst op de Delflandse kust. Dit is een grote zandbuffer ter bescherming van de kustlijn (Figuur 1.1). De kust tussen Ter Heijde en Kijkduin is hierdoor over een lengte van twee kilometer aanzienlijk zeewaarts uitgebouwd. In totaal is 21,5 miljoen m³ zand op de kust geplaatst. 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.



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

Het extra verkregen oppervlak boven zeeniveau (bestemd voor recreatie en natuur) was na aanleg van de Zandmotor ongeveer 128 hectare. Aan de noordzijde van de Zandmotor is landwaarts van de 'haak' een lagune aanwezig. Door de beschutte ligging van de lagune, waarbij golven en stroming worden afgeschermd, ontstaat een ander type ecologisch habitat dan op de onbeschermde kust.

1.2 Doelen Zandmotor & Evaluatievragen

In de Projectnota / Milieu Effect Rapportage (MER) Zandmotor Delflandse Kust (DHV, 2010a) 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 (o.a. zwemveiligheid, klifvorming en drijfzand), verenigbaarheid van recreatie en natuur doelen en om het voorkomen van ongewenste invloed op het grondwater, natuurwaarden van het bestaande duingebied Solleveld of aanwezige natte infrastructuur.

Ten behoeve van de concrete toetsing van de effecten van de Zandmotor zijn evaluatievragen opgesteld (zie Tabel 1.1), waarvan de beantwoording wordt beschreven in deze rapportage in relatie tot de context van veranderingen in de omgeving, natuur en recreatie. Een korte en bondige beantwoording van de vragen is te vinden in Appendix A. De volgende hoofdvragen worden besproken:

Tabel 1.1 Overzicht van de evaluatievragen en behandeling in de hoofdstukken

Hoofdstuk:	3	4	5	6
MER 1 : Duinveiligheid 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?				
MER 2 : Kennisontwikkeling en innovatie 2-1: Levert de Zandmotor nieuwe fysische kennis op waarmee kustonderhoud en een meerwaarde voor recreatie en natuur gezamenlijk te realiseren zijn? 2-2: Heeft een megasuppletie als de Zandmotor een meerwaarde voor de natuur ten opzichte van reguliere suppleties? En waardoor wordt deze meerwaarde veroorzaakt? 2-3 : Wat is de spin-off van de Zandmotor voor kennis en innovatie?	a		b c	
MER 3 : Natuur en recreatie 3-1a: Zorgt de Zandmotor voor toevoeging van een aantrekkelijk natuurgebied op de Zandmotor zelf en in de jonge duinen tegen het bestaand duin? 3-1b: Hoe ontwikkelt de tijdelijke nieuwe natuur in het intergetijdengebied en de lagune van de Zandmotor zich? 3-2: Hoe is de beleving en waardering van de kust tussen Hoek van Holland en Scheveningen veranderd door aanleg van de Zandmotor?	a	b		
Beheer : 4-1: Zijn er negatieve effecten van de Zandmotor voor de recreatieveiligheid? Kunnen deze worden voorkomen met beheersmaatregelen? Was het beheerprotocol daarbij afdoende? 4-2: In welke mate zijn recreatie- en natuurdoelstellingen op en rond de Zandmotor te verenigen? 4-3: Kunnen ongewenste invloeden van de Zandmotor op het grondwater worden voorkomen? 4-4: Kunnen (negatieve) invloeden van het nieuwe duingebied op natuurwaarden in het bestaande duingebied worden voorkomen? 4-5: Zijn er ongewenste effecten van de Zandmotor voor de natte infrastructuur en kunnen deze worden voorkomen met beheersmaatregelen?				

Rijkswaterstaat, de Provincie Zuid-Holland en Dunea hebben in een convenant afgesproken om gezamenlijk de monitoring en evaluatie van de vragen volgend uit de MER en beheer op te pakken. De evaluaties van de fysische ontwikkeling van de Zandmotor en de ecologische ontwikkeling, zoals duingroei en verspreiding van zand, vallen onder verantwoordelijkheid van Rijkswaterstaat. De provincie Zuid-Holland is verantwoordelijk voor de vragen met betrekking tot recreatie (in relatie tot natuur) en de beheersvragen (o.a. zwemveiligheid en effecten op duinen van Solleveld). De effecten van de Zandmotor op grondwater worden door Dunea gemonitord.

1.3 Context

Dit rapport geeft een overzicht van de bevindingen van het monitoring en evaluatieprogramma (MEP). In dit document wordt de ontwikkeling van het kustlandschap in termen van veiligheid, natuur en recreatie beschreven over de periode 2011 tot 2021, waarvoor de informatie uit de monitoring wordt gebruikt (DHV, 2010b; Tonnon et al., 2011). Kennisontwikkeling en innovatie worden onder de aandacht gebracht. De basis voor dit werk is al gelegd in de evaluatie van de eerste 5 jaar van de ontwikkeling van de Zandmotor (Taal et al., 2016).

Voor gedetailleerde informatie over gemeten parameters en resultaten wordt verwezen naar de onderliggende monitoring- en evaluatierapporten per subonderdeel (Ecorys, 2020; Wijsman et al., 2020; Van donk et al., 2020; WUR, 2020; Arens, 2021; Huisman et al., 2021; IJff et al., 2021; Vertegaal, 2021). De nadruk ligt op het presenteren van de informatie over de fysieke ontwikkelingen. Er wordt geen beoordeling gegeven van het project als geheel.

Daarnaast is er in 2021 ook een beleidsevaluatie uitgevoerd die gelijktijdig verschijnt met dit rapport (Rebel Group, 2021). Hierin wordt een oordeel gegeven over de mate waarin de drie beleidsdoelen en het beheerdoel van de Zandmotor zijn behaald. Dit is grotendeels

gebaseerd op de resultaten uit dit monitoring- en evaluatieprogramma. Er is echter ook aandacht voor de meer projectmatige kant van de Zandmotor, zoals de totstandkoming van het project en de samenwerking tussen stakeholders.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd:

- Hoofdstuk 2 behandelt de achtergrond van de Zandmotor, het Nederlands waterbeleid en de keuzes die gemaakt zijn bij het vaststellen van de locatie en het ontwerp van de Zandmotor.
- Hoofdstuk 3 bevat informatie over de betekenis van de Zandmotor voor de kustontwikkeling, duinaangroei en landschapontwikkeling in het Zandmotor gebied.
- Hoofdstuk 4 beschrijft wat de Zandmotor betekent voor natuurontwikkeling.
- Hoofdstuk 5 gaat in op de beleving en waardering van de Zandmotor door recreanten, de maatschappelijke functies, het beheer en omgevingseffecten van de Zandmotor.
- Hoofdstuk 6 geeft een overzicht van de spin-off van de Zandmotor voor kennis en innovatie.

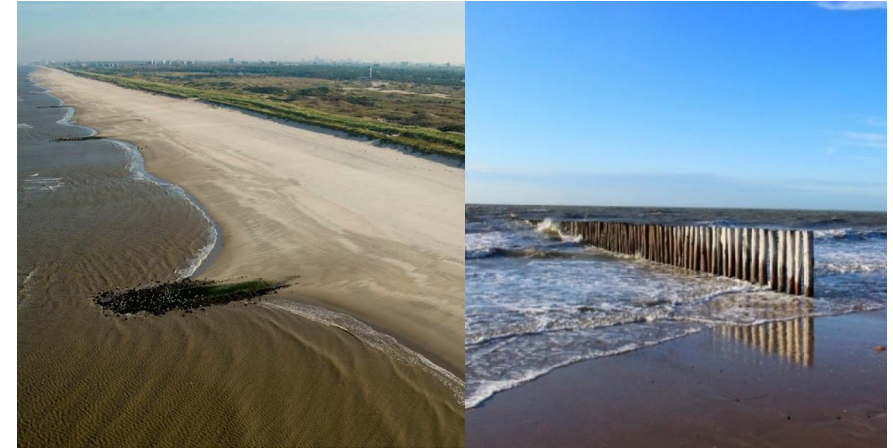
2 Achtergrond van de Zandmotor

2.1 Bescherming tegen het water

De Nederlandse kust wordt al eeuwenlang beschermd tegen het water. Al in de Romeinse tijd werden terpen, kleine heuvels in het landschap, gebruikt om te schuilen voor het opkomende water. Door de tijd heen werd het gebruik van terpen steeds lastiger omdat de zeespiegel steeg en het land zakte. Men begon daarom al in de 11^e eeuw met de aanleg van dijken om ook het landbouwgebied te beschermen. Met name langs de rivieren en binnenwateren werden zo vele duizenden kilometers dijken aangelegd. Dijken waren ook noodzakelijk als bescherming tegen de zee bij de binnenzeeën, zoals de Zuiderzee (nu IJsselmeer) en Waddenzee. Op de zandige kust van de Noordzee was dit echter niet overal noodzakelijk, omdat het strand en de duinen hier een natuurlijke barrière vormden tegen het water.

De duinen op de Nederlandse kusten bieden dus bescherming aan het achterland, maar door de werking van golven en stromingen, en doorgaande stijging van de zeespiegel, is op sommige plaatsen toch een langzame teruggang van de kust opgetreden. Daardoor bleven er op sommige kustsecties slechts smalle duinen over als bescherming tegen de zee. Op vooruitgeschoven plekken van de Hollandse en Zeeuwse kust was soms sprake van zoveel erosie dat dorpen en havens opgegeven moesten worden. Al in de 17^e eeuw werden er op de Hollandse kust daarom zeewaarts uitstekende strekdammen van zware basaltstenen ('strandhoofden') of houten palen ('paalhoofden') aangelegd om het verlies van zand te beperken (Figuur 2.1). Op de kust tussen Den Haag en Hoek van Holland, waar ook de Zandmotor is aangelegd, werden er zeker 68 gebouwd. Toch kon men de ontwikkelingen zelden helemaal stoppen. Over het algemeen nam de kusterosie wel af door de maatregelen, maar verdween niet helemaal omdat de achterliggende redenen voor de erosie van de kust niet

werden weggenomen. De oorzaak lag namelijk in de netto afvoer van zand door de golven die ook door de maatregelen niet kon worden gestopt. Hierdoor ontstaat na verloop van tijd een tekort aan zand in het kustprofiel waardoor ook de duinen zand gaan verliezen.



Figuur 2.1 Strandhoofden en paalhoofden langs de Nederlandse kust (links : bron Rens Jacobs/Beeldbank Rijkswaterstaat)

Ook in de 20^e eeuw was de strijd tegen het water niet bij voorbaat beslist. Door gebrek aan aandacht voor de kwaliteit van de duinen en dijken kon de watersnoodramp van 1953 plaatsvinden, waarbij grote delen van de Provincie Zeeland en Zuid-Holland onderwater kwamen te staan. De overstromingen waren met name het gevolg van dijkdoorbraken. Op de zandige Hollandse kust leidde de storm tot een kritieke situatie voor de kust van 's-Gravenzande, waarbij net geen doorbraak plaatsvond. Er was maar net genoeg zand aanwezig in het duin om de natuurlijke processen tijdens deze storm hun gang te kunnen laten gaan.

Besloten werd dat alles gedaan moest worden om dergelijke rampen in de toekomst te voorkomen, waaruit een omvangrijk reddingsplan

voor de Nederlandse kust voortkwam, het 'Deltaplan'. Over een periode van 30 jaar werd de Nederlandse kust versterkt met de verschillende dammen en dijkverzwaringen (de 'deltawerken') die tot doel hadden om zowel de dijken te versterken als om extreme hoogwaterstanden in de getijdebekkens te verminderen. Ook werd de verantwoordelijkheid voor kustonderhoud juridisch vastgelegd in de Waterwet. De duinwaterkeringen werden hierin ook meegenomen, en voortaan getoetst op waterveiligheid. Indien nodig werden de duinen of het strand versterkt met zand.

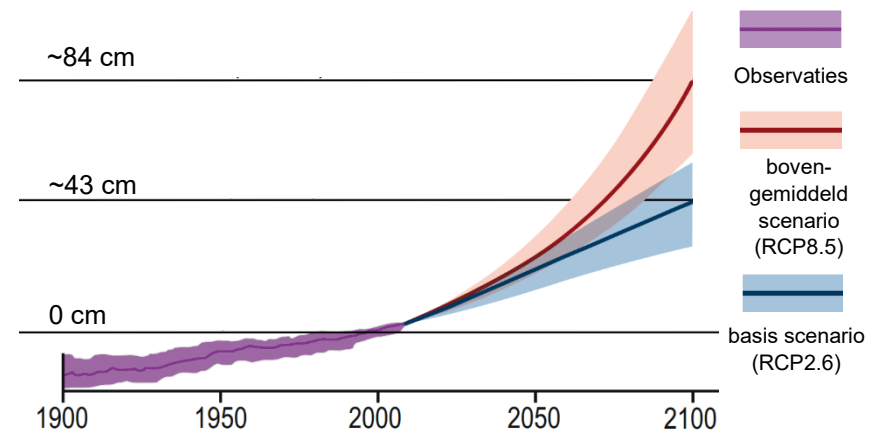
Zandbeschikbaarheid

Gebleken is dat de hoeveelheid zand in het kustprofiel één van de belangrijkste aspecten is voor kustbehoud. Als er te weinig zand beschikbaar is dan gaat de kust achteruit, en als er meer zand wordt toegevoegd dan zal de kust zich stabiliseren of zelfs zeewaarts uitbouwen. Door het substantiële tekort aan zand op de Nederlandse kusten gaat de kustlijn op veel plaatsen van nature achteruit. Dit komt omdat de natuurlijke toevoer van zand aan onze kustzone al meer dan duizend jaar geleden tot stilstand is gekomen. Onder invloed van (deels menselijke) veranderingen in het stroomgebied van de Rijn en Maas gedurende de afgelopen eeuwen, komt er nog maar weinig zand vanuit de bergen naar de Nederlandse kust. Ook de aanvoer van zand vanuit zee door golfwerking is vrijwel tot stilstand gekomen, omdat de zeebodem door de zeespiegelstijging relatief diep is komen te liggen. Ondertussen vervoeren de golven wel zand langs de kust, wat leidt tot erosie. Dit geldt in het bijzonder voor kustgedeeltes die relatief zeewaarts liggen ten opzichte van de omliggende kust, zoals bij veel wat oudere plaatsen langs de Nederlandse kust het geval is (o.a. bij Egmond aan Zee, Ter Heijde en bij Domburg). Om erosie van de kust bij Ter Heijde te bestrijden is er vanaf begin jaren '70 zand op het strand gespoten. Na 1990 is het onderhouden van de kustlijn stand beleid geworden. Een deel van het suppletiezand werd naar de buitenste, waterkerende, duinenrij geblazen door de wind, waar het werd ingevangen door ruim aangeplant en snel groeiend helmgras. Op deze manier hadden de duinen ook baat bij de suppleties.

Toekomstige uitdagingen

Begin deze eeuw werd duidelijk dat toekomstige stormen zwaarder kunnen zijn dan eerder werd aangenomen. Op bepaalde plekken langs de Nederlandse kust heeft men toen vastgesteld dat duinen versterkt moesten worden. Tussen 2009 en 2011 is er door Rijkswaterstaat en het Hoogheemraadschap Delfland gewerkt aan het project "Zwakke Schakels" (DHV, 2007), waarbij een extra rij duinen is gecreëerd op de Delflandse kust als buffer tegen stormen.

De natuurlijke teruggang van de kustlijn zal in de toekomst naar verwachting nog groter worden als gevolg van versnelde zeespiegelstijging én mogelijke veranderingen in de golfrichting (Oppenheimer et al., 2019). Het afsmelten van ijs, op met name het zuidelijk halfrond, zal de zeespiegel veel sneller doen stijgen dan nu het geval is. In de huidige situatie stijgt de zeespiegel nog relatief beperkt en gelijkmatig met ongeveer 2 à 3 mm per jaar, maar dit kan in de komende decennia toenemen tot 2 cm per jaar (Figuur 2.2). Een dergelijke stijging tot ~ 2 cm per jaar lijkt misschien niet veel, maar kan toch een aanzienlijke invloed hebben op de zandige kust.



Figuur 2.2 Verwachte zeespiegelstijging (op basis van Oppenheimer et al., 2019)

De verwachting is dat de kust voor elke centimeter stijging van de zeespiegel ongeveer één meter achteruit zal gaan. Er zal in dit scenario jaarlijks 10 tot 20 miljoen kubieke meter zand extra nodig zijn om alleen de zandige kust met duinen te onderhouden, waarbij nog niet eens is gekeken naar de enorme behoefte aan zand van de diepere vooroever of van de Waddenzee en Westerschelde. De opgave voor de Nederlandse kust is daarmee niet gering voor de komende eeuw.

2.2 Aanpak van het Nederlandse kustonderhoud

Het beheer van de sedimentvoorraad van de duinen, het strand en de vooroever is de kern van het kustbeleid in Nederland in de afgelopen 50 jaar. Dit beleid staat verwoord in het Nationaal Waterplan (NWP; Rijksoverheid, 2015), de Waterwet (Rijksoverheid, 2009) en de Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte (SVIR; Rijksoverheid, 2012). De belangrijkste doelstelling van het rijksbeleid voor de kust is duurzame handhaving van de veiligheid van het achterland tegen overstromingen vanuit de zee. Hierbij worden drie sporen gevolgd, die elk op een andere tijdschaal het veiligheidsniveau in het achterland moeten waarborgen:

- De zorg voor veilige waterkeringen, om hoge waterstanden en golven tijdens stormen te weerstaan;
- Het handhaven van de kustlijn (met de basiskustlijn als norm);
- Het in evenwicht houden van het kustfundament met relatieve zeespiegelstijging. Het kustfundament is de zone waarbinnen het zand zich in ongeveer 200 jaar beweegt. De grenzen van het kustfundament zijn zeewaarts bepaald op de doorgaande NAP - 20 m dieptelijn en aan de landzijde op de lijn waar de duinen overgaan in het achterland (de binnenduinrand).

Om het achterland te beschermen tegen de zee moeten de duinen sterk genoeg zijn. In de Waterwet is vastgelegd aan welke

veiligheidsnormen de dijken en duinen (primaire waterkeringen) moeten voldoen. Voor de waterkerende duinen betekent dit dat er voldoende zandbuffer aanwezig moet zijn. De keringen worden elke zes jaar beoordeeld. Wanneer blijkt dat een waterkering niet meer aan de veiligheidsnorm voldoet, worden maatregelen genomen. Uitgangspunt is dat deze zoveel mogelijk met zandige maatregelen worden gerealiseerd en zo min mogelijk met harde infrastructuur ('zacht waar het kan, hard waar het moet'). Zo zijn op de lange termijn de veiligheid van het achterland, de functies van de kustzone en de natuurlijkheid van het kuststelsel het beste gediend.

Sinds 1990 wordt ook de kustlijn onderhouden, om zodoende te zorgen voor voldoende zand in de kustzone. Zo kan structurele erosie van de kust en duinwaterkeringen worden voorkomen. Hiervoor werd destijds een minimale kustlijn vastgesteld als norm (de basiskustlijn). Als de basiskustlijn structureel overschreden dreigt te worden, wordt bekeken of het nodig en wenselijk is zand te suppleren.

Het in evenwicht houden van het kustfundament zorgt ervoor dat de kustzone van Nederland (op de lange termijn bekeken) meegroeit met de stijgende zeespiegel. Sinds 2001 is de instandhouding van het kustfundament onderdeel van het kustbeleid. Rijkswaterstaat suppleert jaarlijks ongeveer 12 miljoen m³ zand. Dit is de hoeveelheid die nodig is om heel het Nederlandse kustfundament te laten 'meegroeien' met de hoeveelheid zeespiegelstijging zoals deze gedurende de afgelopen eeuw optrad (18 cm / eeuw). Als in de toekomst de zeespiegel sneller blijkt te stijgen, kan het jaarlijks suppletievolume worden verhoogd.

2.3 De wijze van suppleren van zand

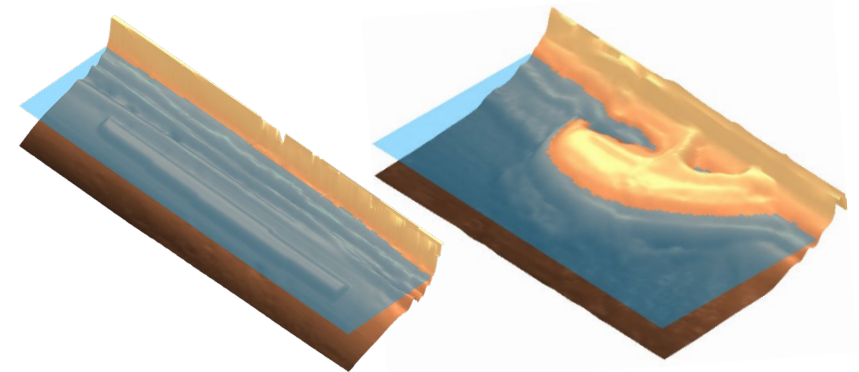
In Nederland voegen we zand toe aan het kuststelsel door zogenaamde 'suppleties' om de kust in stand te houden. Op een winlocatie op enige afstand van de kust baggert men zand op met een grote zuiger, waarna dit naar het ondiepe deel van de kustzone wordt toegebracht. Deze winlocaties liggen over het algemeen op een diepte

van meer dan 20 meter (buiten het kustfundament), om zo te voorkomen dat ze invloed hebben op de kustzone zelf. Als het zand is aangebracht, verdelen wind, golven en getij het zand verder langs de kust. Een deel van het zand kan vanaf het strand naar de duinen stuiven waar het direct bijdraagt aan de veiligheid van de duinen als waterkering. Maar ook het zand in de brandingszone is nuttig, omdat het voorkomt dat er teruggang optreedt van de kust. Als er voldoende zand is in de brandingszone, zijn de gevolgen van stormen namelijk minder groot. Zand dat van het duin afslaat tijdens een storm kan dan later tijdens mildere condities door de golven weer teruggebracht worden naar het strand, wat niet zou zijn gebeurd als er sprake is van een tekort.

Zand van suppleties werd aanvankelijk altijd op het strand of in de duinen aangebracht, waardoor het direct bij kon dragen aan de sterkte van de kust, én aan vooruitgang van de kustlijn. Sinds de jaren '90 wordt het zand echter niet meer zo vaak op het strand aangebracht, maar met name onder water op de brekerbank (op ongeveer 4 tot 8 meter waterdiepte; Figuur 2.3). Het voordeel hiervan is dat het een goedkopere methode is voor het aanbrengen van het zand op de kust. De golfwerking zal er voor zorgen dat het zand zich langzaam richting het strand zal verspreiden. Zo wordt kustteruggang voorkomen en zal er op langere termijn zelfs sprake zijn van opbouw van de duinen, omdat de wind een deel van het zand vanuit het intergetijdegebied naar de duinen zal blazen. De natuur wordt gebruikt om zand te verspreiden richting het strand en de duinen. Door de tijd heen worden door Rijkswaterstaat steeds grotere suppleties toegepast, én wordt nagedacht over efficiënte methodes van suppleren.

De Provincie Zuid-Holland heeft in 2008 een innovatief plan gepresenteerd dat beoogd om ruimte voor natuur en recreatie te creëren met een grootschalige kustsuppletie ('De Zandmotor'; PZH, 2015). In samenwerking met Rijkswaterstaat én vertegenwoordigers uit de Nederlandse waterbouwsector is dit plan in 2011 gerealiseerd (Figuur 2.3). Er is hiervoor eenmalig een grote zandbuffer op de Delflandse kust geplaatst die daarna mocht vervormen door natuurlijke

processen. Dit zorgt voor een minder frequente verstoring van de kustnatuur dan het regelmatig suppleren met kleinere hoeveelheden zand. De verwachting was dat de natuurlijke processen (golven en getijstroming) het zand zouden herverdelen en zo de omliggende kust beschermen. Ook kon zo een besparing worden gerealiseerd op de kosten per kubieke meter zand.



Figuur 2.3 Voorbeeld van een vooroeversuppletie bij Noordwijkerhout (2002) en de Zandmotor suppletie bij Ter Heijde (2011) uit Huisman (2019).

De praktische ervaring die hierdoor is opgedaan met het aanleggen van grote kustversterkingen is ook van groot belang voor de toekomst, aangezien we weten dat de benodigde volumes voor onderhoud van de zandige kust aanzienlijk kunnen gaan toenemen (Stronkhorst et al., 2017). Getest wordt of een grootschalige dynamische zandbuffer zoals de Zandmotor kan worden geplaatst. Om efficiënt te ontwerpen is het daarnaast van belang om kennis op te doen over de verspreiding van het sediment langs de kust én de invloed op de natuur van de duinen en vooroever. De Zandmotor is een pilot van een nieuw type zandsuppletie die bedoeld is voor het lange termijn onderhoud van de kustlijn, waarmee we ons ook voorbereiden op toekomstige uitdagingen.

2.4 Locatie van de Zandmotor

De Zandmotor is gerealiseerd bij Ter Heijde op de Delflandse kust. Deze kuststrook loopt van Wassenaar tot Hoek van Holland, en wordt beheerd door het Hoogheemraadschap van Delfland (Figuur 2.4). Zowel bestuurlijke als praktische redenen maakten dit tot een logische locatie voor de Zandmotor. Verwacht werd dat er in de toekomst veel onderhoud zou moeten plaatsvinden van deze kust, waarvoor grote hoeveelheden zand nodig zouden zijn. Ook was er door de Provincie Zuid-Holland een tekort geconstateerd aan natuur- en recreatieruimte. Het creëren van ruimte voor recreatie en natuurontwikkeling in zee was daarom een belangrijke reden om de Zandmotor aan te leggen.



Figuur 2.4 Locatie van de Zandmotor langs de Nederlandse kust

De duinen bij Ter Heijde behoorden tot de smalste langs de Nederlandse kust. De kustzone bestaat hier uit slechts een enkele rij duinen van ongeveer 200 meter breed, terwijl de duinen ten noorden en zuiden van dit gebied bij Hoek van Holland en Den Haag juist heel breed zijn. De relatief smalle waterkerende duinen beschermen ondertussen wel een dichtbevolkt achterland. Ongeveer 1,4 miljoen mensen wonen hier achter de duinen van de Delflandse kust. Ook wordt historisch erfgoed beschermd van steden als Delft, Schiedam, Vlaardingen, Rotterdam en Den Haag. En daarnaast is er veel kapitaal geïnvesteerd in de intensieve kassenbouw. Een ingreep als de Zandmotor wordt dan ook gezien als een verzekering voor de waterveiligheid in dit gebied.

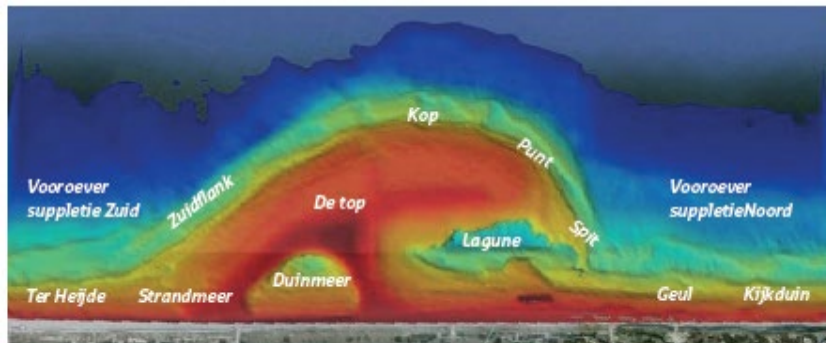
Langs de gehele Delflandse kust zijn het strand en de duinen belangrijk voor natuur en recreatie. Er liggen verschillende Natura 2000-gebieden, die conform de Europese Habitatrichtlijn en de Nederlandse Natuurbeschermingswet streng worden beschermd, niet alleen tegen ingrepen in het gebied zelf, maar ook tegen ongewenste invloeden van buitenaf. Dat geldt ook voor het landwaarts van de Zandmotor gelegen duingebied Solleveld. Dit gebied bestaat voor een groot deel uit zogenaamde Oude Duinen. De relatief jonge duinen aan de zeezijde van Solleveld zijn ontstaan als gevolg van de duinverzwaringen uit 1987 ('Zeereep 1987') en 2010 (de 'Zwakke Schakels' versterking).

2.5 Ontwerp

Het ontwerp van de Zandmotor bestaat uit een haakvormige zandbuffer die een lagune omsluit (Figuur 2.5). Op de plek waar de Zandmotor aansluit aan het strand is een duinmeer aangelegd. Het Zandmotorgebied was bij aanleg circa 2,5 km lang en had een kustdwarze breedte van ongeveer 1 km. Het grootste deel van de haak van de Zandmotor had bij aanleg een hoogte van ongeveer 3 meter boven zeeniveau. Dit liep in landwaartse richting op naar 4 a 5 meter boven zeeniveau. Bij 'De top' in het midden van de Zandmotor is de hoogte zelfs ongeveer 7 meter boven zeeniveau. Het westelijke deel

van de lagune heeft een diepte van 4 tot 5 meter onder zeeniveau. Aan de landzijde wordt het geleidelijk ondieper. Verwacht werd dat er een landtong zou groeien aan de noordzijde van de haak van de Zandmotor als gevolg van golven en stromingen én dat deze zou vastgroeien aan de kust noordelijk van de Zandmotor.

Ook zijn er net noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor onderwaterzandbuffers geplaatst ('vooroeversuppleties'). Deze waren bedoeld om te voorkomen dat er hier in de beginfase erosie zou optreden. Het werd namelijk mogelijk geacht dat zand uit het gebied net noordelijk van de Zandmotor naar de lagune toegebracht zou worden door een storm uit het noordwesten. De noordelijke suppletie is daarom vrijwel gelijktijdig aangelegd met de Zandmotor, terwijl de zuidelijke vooroeversuppletie pas in november 2011 is gerealiseerd.



Figuur 2.5 Overzicht van de deelgebieden van de Zandmotor

Aanleg van de Zandmotor

Vanaf maart 2011 is er doorlopend 4 maanden lang zand op de kust aangebracht met behulp van grote baggerschepen. Dit zand is gewonnen op een locatie op diep water, zo'n 10 kilometer uit de kust van Delfland, en naar de kust toe gevaren. Dichtbij de kust heeft men een deel van het materiaal gestort door kleppen onder het baggerschip te openen, waardoor het zand op de bodem belandt, waarmee het

onderwaterdeel van de Zandmotor kon worden aangelegd (in water van tenminste 5 meter diep). Vanaf baggerschepen werd ook een mengsel van zand en water uit het schip naar het land gespoten of via buizen naar het strand toe geperst, om zo de ondiepe vooroever rond de waterlijn aan te leggen. Bulldozers verdeelden het zand op het strand.

Er is in totaal 21,5 miljoen m³ zand geplaatst om de Zandmotor te realiseren, waarvan het overgrote deel is gebruikt voor de 128 hectare land op de haak (circa 19 miljoen m³) en de rest voor de 'vooroeversuppleties' noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor. Deze hadden een volume van respectievelijk 0,6 en 1,7 miljoen m³. Aanvullend is in het jaar voorafgaand aan de aanleg van de Zandmotor de 'Zwakke Schakels' duinversterking gerealiseerd, waardoor een nieuwe duinenrij is ontstaan.

2.6 Monitoring

Om te kunnen beoordelen of de Zandmotor voldoet aan de van te voren gestelde doelstellingen dienen meetgegevens beschikbaar te zijn, op basis waarvan statistische en computermodellen kunnen worden gemaakt die de verwachte ontwikkelingen in kaart brengen. Sinds 2010 is er daarom uitgebreid gemeten bij de Zandmotor om te kunnen beoordelen of de Zandmotor voldoet aan de van te voren gestelde doelstellingen (Figuur 2.6). Voor de monitoring is in 2010 een uitvoeringsprogramma opgezet (DHV, 2010b; Tonnon et al., 2011). Deze metingen hebben ten doel om te onderzoeken of de MER-doelen zijn gehaald, om informatie te verkrijgen over effectief beheer en te voldoen aan de vergunningsvoorwaarden.

De coördinatie en uitvoering van de monitoring wordt hoofdzakelijk gedaan door Deltares (in samenwerking met SHORE monitoring, Arens adviesbureau en Vertegaal ecologisch advies), Wageningen Marine research (WMR) en door stichting Zuid-Hollands landschap (in samenwerking met Bureau Waardenburg en Ecoresult).



Figuur 2.6 Overzicht van monitoring op de Zandmotor

Omgevingscondities, zoals waterstanden, windsnelheden en grondwaterstanden, zijn door Rijkswaterstaat, SHORE monitoring en Dunea ingewonnen. Vervolgens zijn deze gegevens geanalyseerd door Arens adviesbureau en Deltares. Dat gaat dan bijvoorbeeld om

het doorrekenen van de invloed van de (op enige afstand van de Zandmotor gemeten) golven en stromingen op het Zandmotor gebied. Dunea heeft grondwaterstanden in de duinen achter de Zandmotor gemeten.

De landschapsverandering (morfologie) van de Zandmotor én de daarvoor verantwoordelijke processen zijn door Deltares geanalyseerd op basis van bodemhoogtegegevens. SHORE heeft hiervoor tweemaandelijks tot halfjaarlijkse metingen uitgevoerd van de bodemhoogte van de Zandmotor. Aanvullend hieraan leverde Rijkswaterstaat jaarlijkse bodemhoogtemetingen (JARKUS) die een groter kustlangsgebied bestrijken én halfjaarlijkse laserhoogtemetingen van de duinen en het strand. Om de nieuwe (embryonale) duintjes in beeld te brengen zijn er door SHORE monitoring en Arens adviesbureau ook detail-hoogtemetingen uitgevoerd met een drone. Deltares kon hierdoor zowel kwalitatief als kwantitatief de landschapontwikkeling beschrijven.

Om de ecologische ontwikkeling van het strand en de duinen in beeld te brengen, is er door Bureau Waardenburg monitoring uitgevoerd van de vegetatiegroei op de Zandmotor én in de landwaarts gelegen duinen van Solleveld. Analyses van de veranderingen zijn gemaakt door Vertegaal ecologisch advies. Voor een geselecteerd aantal jaren is op basis van luchtfoto's en veldopnames de vegetatie in kaart gebracht voor het gehele Zandmotor- en duingebied (o.a. flora op de Zandmotor, hogere planten en vegetatie duinen) en in meer detail zijn halfjaarlijkse vegetatieopnamen gedaan in speciaal aangewezen gebiedjes (2x2 meter) in de duinen. Van belang voor de duinvegetatie is de mate van zanddoorstuiving en zoutinwaai in de duinen, wat door Dunea is gemonitord en geanalyseerd door Arens adviesbureau.

WMR heeft tweejaarlijkse metingen en analyses uitgevoerd van de bodemdieren in de vooroever en op het strand, die zijn aangevuld met waarnemingen van schelpen bij de lagune. Op basis van deze gegevens kan een beeld verkregen worden van de ecologische waarde van de Zandmotor voor met name vissen en vogels. Hiervoor

zijn ook maandelijkse vogeltellingen uitgevoerd door Ecoresult en geanalyseerd door Vertegaal ecologisch advies.

De Provincie-Zuid Holland heeft onderzoek uitgezet naar de meerwaarde van de Zandmotor voor recreatie (Wageningen University research), terwijl de economische meerwaarde voor de regio in opdracht van Rijkswaterstaat is onderzocht (Ecorys). Andere maatschappelijke gebruiksfuncties van de Zandmotor (o.a. voor kunst en cultuur of archeologie) zijn door Deltares onderzocht. Hiervoor heeft onderzoek plaatsgevonden via interviews.

3 Kustdynamiek en duingroei

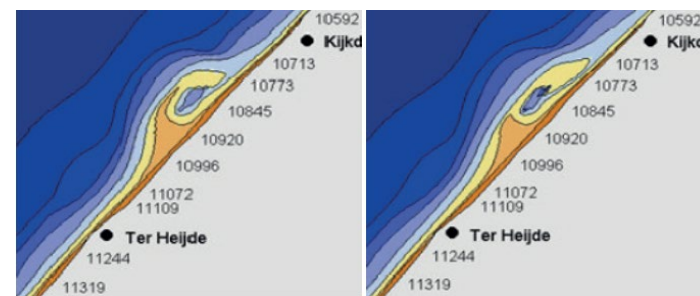
3.1 Verwachtingen en doelen

De Zandmotor is een uniek waterbouwkundig project, omdat het gebied na aanleg mag vervormen als gevolg van natuurlijke processen. Een enorme verandering ten opzichte van de harde statische constructies die in het verleden zijn gebouwd. Die constructies waren effectief in het beschermen van de kust, maar ze droegen niet bij aan andere functies zoals natuurontwikkeling en recreatie.

De beoogde dynamiek van de Zandmotor betekende dat er in de ontwerpfase niet alleen voor de situatie direct na aanleg een functioneel plan moest zijn. Ook de daarna verwachte landschapontwikkelingen dienden in beeld gebracht te worden om goede ontwerpkeuzes te kunnen maken. Voor de veiligheid was van belang in welke mate de duinen zouden kunnen meegroeien. De snelheid waarmee zand zich zou verspreiden was een belangrijke vraag, terwijl de landschapontwikkeling uiterst relevant was voor de natuurontwikkeling. Gedetailleerde computermodellen werden daarom ingezet om vooraf al inzicht te geven in de verwachte ontwikkelingen.

Verwacht werd dat een heel dynamisch gebied zou ontstaan wat door de tijd heen van vorm verandert (Figuur 3.1). Zand vanaf de kop zou zich door golven en stromingen laten verspreiden naar de omliggende kust waardoor de Zandmotor steeds langgerechter en smaller zou worden. Het zand wat van de haak zou zich vooral naar het noorden verplaatsen en hier na enkele jaren een verbinding maken met de kustlijn. Dit zou leiden tot afsluiting van de lagune, waarbij er alleen een toegangseuvel zou overblijven waardoor het water tijdens eb en vloed kan stromen. De Zandmotor zou zand leveren voor onderhoud van de omliggende kust van Kijkduin en Ter Heijde, waarbij de mate

van aanvoer groter zou zijn tijdens een storm. Op lange termijn was het de verwachting dat er een min of meer gladde kustlijn zou ontstaan.



Figuur 3.1 De verwachte morfologische ontwikkeling van de Zandmotor zoals berekend voor het MER. Links de berekende ontwikkeling na 5 jaar, rechts na 10 jaar. De voorspelde bodemontwikkelingen zijn ook daadwerkelijk opgetreden.

De belangrijkste vraag in dit hoofdstuk is om duidelijk te krijgen of de Zandmotor zorgt voor natuurlijke duinaangroei, het vasthouden van de basiskustlijn en langjarige instandhouding van het benodigde zandvolume in het kustfundament (EF1-1; zie Tabel 1.1). Hieruit kunnen lessen getrokken worden voor het plannen en ontwerpen van (mega)suppleties, waarbij tevens een meerwaarde voor natuur en recreatie wordt beoogd (EF2-1). Aanvullend daaraan wordt ook een kennisbasis gelegd voor de evaluatie van de natuurdoelen en beheer, door technische informatie te geven over de sedimentcompositie van de vooroever (EF2-2a en EF3-1b1) en de grootschalige stromingen die relevant zijn voor de recreatieveiligheid (EF4-1).

Om een goed beeld te krijgen van de fysische ontwikkeling van de Zandmotor zijn frequente metingen van de bodemhoogte uitgevoerd. Met de metingen kan worden onderscheiden wat de veranderingen zijn van de duinen, het strand, de brandingszone en de ondiepe vooroever. Met computermodellen kan vastgesteld worden wat de drijvende krachten waren achter de verspreiding van het zand. Informatie die essentieel is voor het leren van de benodigde lessen voor toekomstige maatregelen.

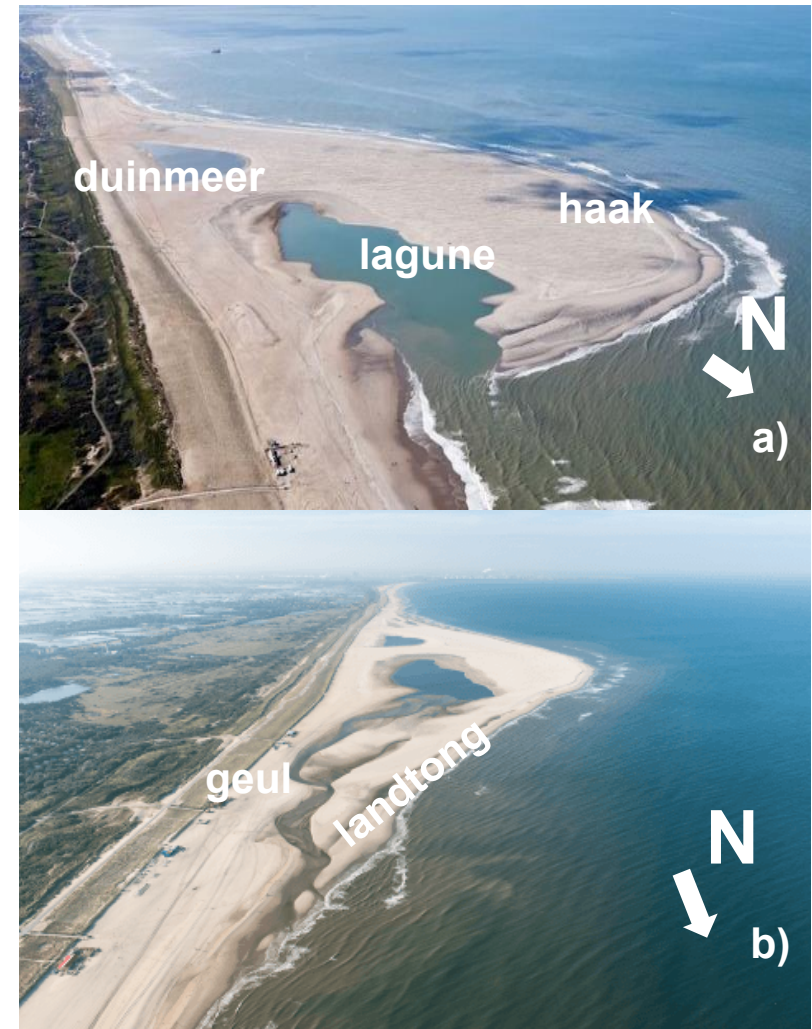
3.2 Landschapsdynamiek van de Zandmotor

3.2.1 Kustlangse verspreiding van zand

De ontwikkelingen in de afgelopen 10 jaar laten zien dat het sediment van de Zandmotor zich onder invloed van golven en getij voornamelijk kustlangs verspreidt (Figuur 3.2), waardoor kustteruggang plaatsvindt op de haak van de Zandmotor en aanzanding op de aanliggende kust (De Schipper et al., 2016). Er ontstond al snel een klokvorm die langzaam breder werd in kustlangse richting en smaller in kustdwarse richting. De lengte van de Zandmotor is gegroeid van 2,5 km in 2011 naar ongeveer 5 km in 2021 (Figuur 3.3).

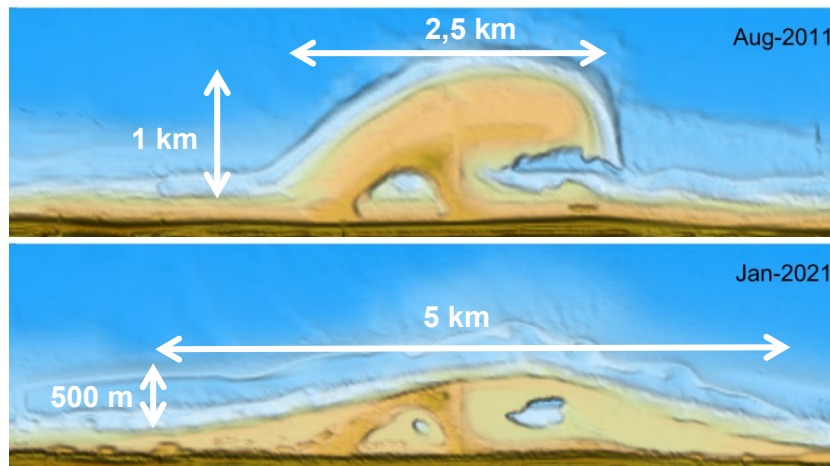
Vooraf in de eerste jaren was er een sterke terugtrekking van de kustlijn bij de haak van ongeveer 100 meter in het eerste halfjaar. In totaal heeft er tussen 2011 en 2021 kustteruggang plaatsgevonden van 500 meter op het meest zeewaartse punt van de Zandmotor (Huisman et al., 2021; Figuur 3.4). Met name in de eerste 3 jaar na aanleg van de Zandmotor was sprake van sterke erosie van tientallen meters per jaar die vooral in het winterseizoen plaats had tijdens stormen. Door de afnemende kustdwarse breedte van de Zandmotor, in combinatie met een flauwer wordend profiel, neemt de snelheid van de kustteruggang van de Zandmotor én het transport naar de omliggende kust langzaam af.

Aan de noordzijde groeide binnen vijf maanden na aanleg een landtong ('spit') met een lengte van ruim 500 meter die de lagune afgesloten heeft (Figuur 3.2). Dit aanzandingsgebied heeft zich door de tijd heen uitgebreid, waardoor de kust in 2021 lokaal tot 300 meter zeewaarts uitgebouwd was op deze noordelijke flank. Bij Kijkduin heeft de kustlijn zich in de periode 2011 tot 2019 enigszins landwaarts verplaatst (2 m/jaar), maar sinds 2020 is er een aangroei van de kust (~10 m/jaar) als gevolg van toevoer van zand vanaf de Zandmotor.



Figuur 3.2 De Zandmotor tijdens laag water op een moment kort na aanleg in 2011 (a) en oktober 2013 (b)

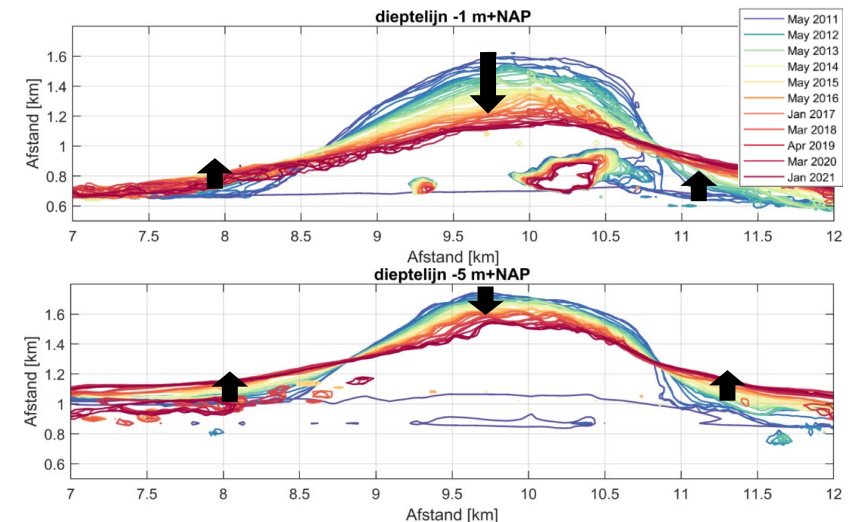
Aan de zuidzijde ontstond een breed aanzandingsgebied met ondiepe geultjes ('zwinnen') wat tijdens hoogwater onderloopt. De aanzanding bedroeg hier ongeveer 200 meter en vond voornamelijk plaats in de eerste 2 jaar na aanleg van de Zandmotor. Voor de zuidelijke deelgebieden (Van Dixhoordriehoek, 's Gravenzande en Ter Heijde) wordt ook in de komende jaren slechts een beperkte invloed verwacht van de Zandmotor op de kustlijn, aangezien het sediment zich met name noordwaarts verplaatst.



Figuur 3.3 Ontwikkeling van de Zandmotor van 2011 tot 2021.

Ook in dieper water treedt erosie op (Figuur 3.4), maar dit gaat langzamer dan in ondiep water (ongeveer half zo snel op 5 tot 8 meter waterdiepte). Het gevolg is dat er op circa 5 meter waterdiepte een vlakker deel van het kustprofiel aanwezig is. Boven deze 5 meter dieptelijn is de kust namelijk sneller teruggegaan. Op nog dieper water ter hoogte van de teen van de Zandmotor, op circa 10 meter waterdiepte, is de erosie klein. Zeewaarts van de Zandmotor is de verticale erosie enkele centimeters per jaar. Dit zand op dieper water

komt op langere termijn zeer geleidelijk beschikbaar voor de kust. In feite ligt er een zandbuffer op dieper water voor de Zandmotor.



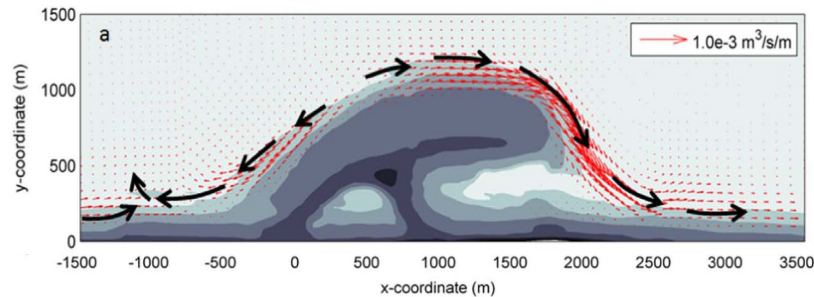
Figuur 3.4 Grote van de verandering van de kustlijn op 1 en 5 meter waterdiepte (Huisman et al., 2021).

3.2.2 Golven als drijvende kracht

De branding is de meest energieke zone van de kust, omdat brekende golven en getijstromingen hier sterk zijn. Daarom worden de vormveranderingen van de Zandmotor vooral bepaald door wat er onderwater aan zand wordt meegenomen door de golven en stromingen. Met name de brandingszone waar de golven breken is van belang, omdat zich hier sterke kustlangse stromingen voordoen (Figuur 3.5). Ruwweg gaat het om het gebied tussen de hoogwaterlijn en de 5 meter dieptecontour.

Uit berekeningen van de ontwikkeling van de Zandmotor blijkt dat de golven de dominante factor zijn voor de verspreiding van het zand in de brandingszone. Ongeveer 74% van het zandtransport werd

veroorzaakt door de golven (Luijendijk et al., 2017). Als de golven schuin aankomen op de kustlijn (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 3.5), waar dus aanzanding optreedt.

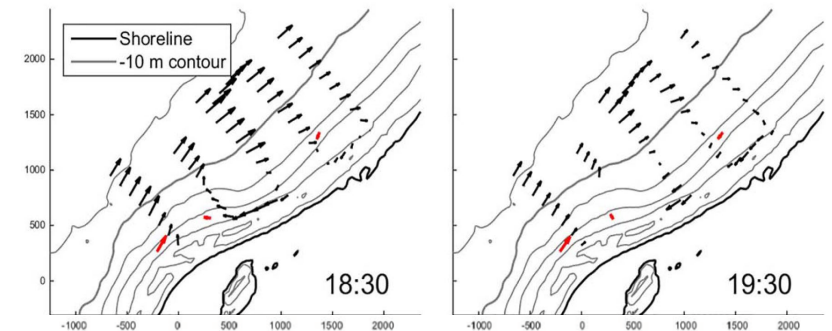


Figuur 3.5 Jaargemiddelde verspreiding van zand bij de Zandmotor als gevolg van golven volgens een numeriek model (Luijendijk et al., 2017).

Stormen dragen enorm bij aan het verspreiden van het zand langs de kust. Tijdens een storm in december 2013 werd net zoveel zand verplaatst als in de vier maanden ervoor (Luijendijk et al., 2017). Tijdens vrijwel alle stormen in de winterperiode is zo'n sterke verandering van de Zandmotor te zien. De precieze richting van waaruit de golven binnenkomen maakt bijna niets uit voor de levensduur van de Zandmotor (Tonnon et al., 2018). Dat is opvallend omdat schuiner invallende golven wel leiden tot een groter zandtransport. Het transport naar het noorden zal toenemen als golven meer uit het zuidwesten komen, wat betekent dat er meer zand afgevoerd wordt vanaf de haak naar het noorden. Er zal in dat geval echter ook meer zand worden aangevoerd vanuit de richting waar de golven vandaan komen, waardoor er netto een beperkte invloed is op de erosiesnelheid van de Zandmotor. Op basis van de kennis over de golven en sedimenttransporten kan nu slimmer worden gestuurd op het ontwerp van toekomstige grootschalige kustversterkingen.

3.2.3 Invloed op de getijstroming

Door de omvang van de Zandmotor is er een invloed op de stromingscondities langs de kust. Ter plaatse van de Zandmotor ontstaat een versnelling van de getijstroming omdat de Zandmotor een obstructie vormt (Huisman et al., 2016). Om deze reden oefent de getijstroming in het gebied Zeewaarts van de haak een iets grotere belasting uit op de zeebodem. Het betreft maar een kleine verandering, maar is op het diepere deel van de vooroever belangrijk voor sortering van het bodemsediment (zie paragraaf 3.4.3).



Figuur 3.6 Waarneming van stroming op de noordflank van de Zandmotor tijdens de vloedfase met een varende ADCP (Radermacher et al., 2017)

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 (Figuur 3.6). Dit effect op getijstroming is wel afgenomen over de tijd, omdat de kustdwarse breedte kleiner wordt door de herverdeling van zand naar de omliggende kust.

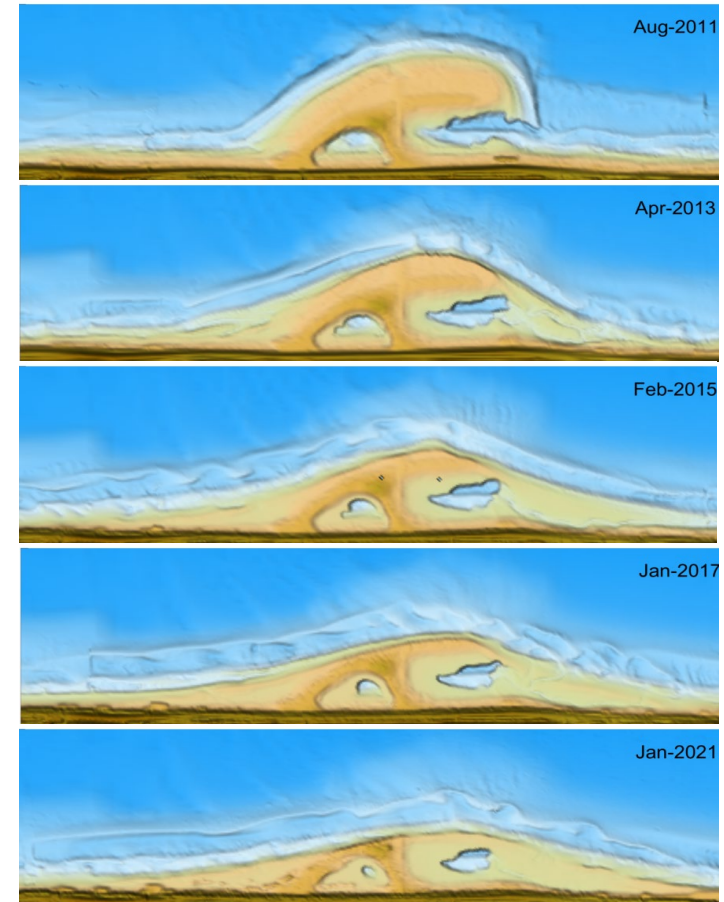
Getijstromingen hebben opvallend genoeg maar een beperkte invloed op de vormverandering van de Zandmotor en het sedimenttransport in de ondiepe kustzone (Luijendijk et al., 2017). De stromingen zijn iets groter richting het noorden, maar het netto verschil in transport blijft

toch beperkt. Meer invloed hebben de waterstandsverschillen door het getij, waardoor de kustteruggang op de waterlijn van de haak van de Zandmotor wordt verkleint. Het volume zand dat wordt verplaatst is niet wezenlijk anders als er een verticaal getij is, maar de waterstandsvariatie zorgt er wel voor dat meer zand wordt opgepikt van het diepere deel van het kustprofiel (tijdens laag water) en relatief minder rond de waterlijn.

3.2.4 Zandbankdynamiek en stromingen

Na aanleg van de Zandmotor zijn complexere zandbanken te onderscheiden op circa 4 meter waterdiepte (Figuur 3.7). Dit is heel anders dan in het verleden. Circa 40 jaar geleden waren er bijna geen zandbanken op de Delflandse kust (Radermacher et al., 2018), maar deze zijn als gevolg van zandsuppleties ontstaan. In eerste instantie ontstond een enkele zandbank, later werd dit door de suppleties een dubbele zandbank. Ook de Zandmotor heeft bijgedragen aan het versterken van de dynamiek van de zandbanken, waardoor nu ook complexere zandbanken te zien zijn.

Door de tijd heen veranderde 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, terwijl het bankpatroon aan de noordflank in de eerste twee jaren meer onregelmatig is (Figuur 3.7). Ook daarna wisselen de langgerekte banken en meer onregelmatige banken elkaar af. Met name de invalshoek van de golven tijdens een storm blijkt bepalend te zijn voor de variatie van de banken (vorm, diepte en afstand tot de kustlijn). Als de golven zorgen voor een sterke kustlangse stroming dan worden de banken recht getrokken.



Figuur 3.7 Ontwikkeling van de vorm van de onderwater gelegen zandbanken van augustus 2011 tot januari 2021 (Huisman et al., 2021).

De zandbanken hebben ook een belangrijke invloed op de stromingen dichtbij de kust in de zone waar ook badgasten komen. Onder bepaalde omstandigheden kunnen er zeewaartse stromingen ('muistromen') ontstaan die zwemmers kunnen meenemen.

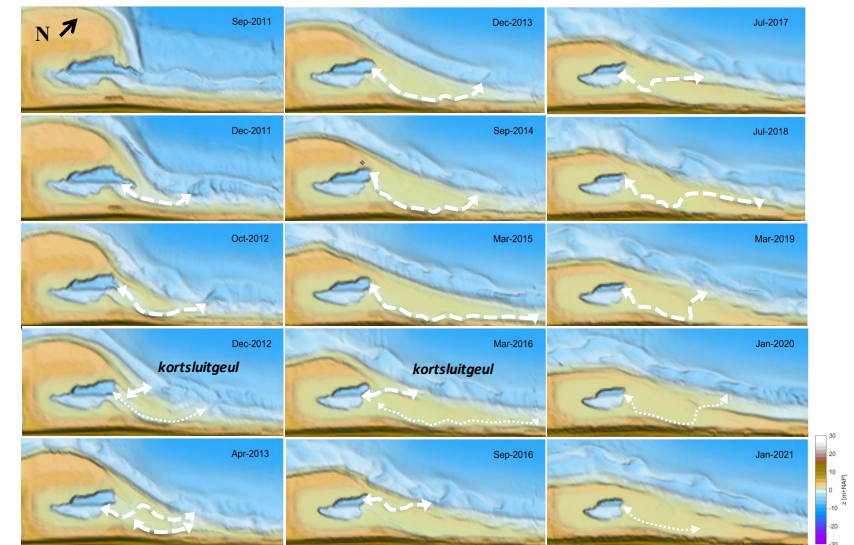
De zwemveiligheidsrisico's door naar de zee toe gerichte stromingen door golfwerking (ook wel 'muistromen') zijn onderzocht door drijvers met GPS los te laten bij de Zandmotor. De metingen laten zien dat gevaarlijke muistromen kunnen optreden als er middelmatig tot hoge golven zijn (vanaf 1 m) die relatief loodrecht aankomen op het strand aankomen. Deze omstandigheden gaan echter vaak samen met slecht weer, waardoor er in die situaties vaak maar weinig strandgebruikers zullen zijn. Ook lijken er op basis van metingen met drijvers ('drifters') in de ondiepe kustzone bij de Zandmotor niet meer muistromen te zijn dan op de omliggende kust, waar dit met name bij strekdammen kan voorkomen.

3.2.5 Ontwikkeling van de lagune en van het duinmeer

Landwaarts van de haak van de Zandmotor bevinden zich de lagune en het duinmeer (Figuur 3.2a). Na aanleg stond de lagune in open verbinding met de zee, waardoor het getij dagelijks twee keer in- en uitstroomde. Een grote verandering trad op toen de landtong op de haak zover groeide dat de lagune afgesloten werd (Figuur 3.2b). Er bleef toen slechts een smalle geul over als verbinding tussen de lagune en de zee. Elk getij verloopt het vullen en ledigen van de lagune via deze geul waardoor hier aanzienlijke stromingen kunnen ontstaan. Door deze stromingen kon de verbinding open blijven. In de eerste jaren is overigens eenmaal tevergeefs gepoogd de stroomsnelheden te beïnvloeden door stortsteen in de toegangsgedul te plaatsen, maar hierbij ontstond snel een omleiding. De natuur kiest hier de kortste weg.

In het eerste jaar na aanleg is de geul smal, diep en relatief kort, maar na verloop van tijd verplaatst de toegangsgedul zich steeds dichters langs het reeds bestaande strand noordelijk van de Zandmotor (Figuur 3.8). 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 een kortsluitgeul ontstaat. 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 3.8). Zo'n omslag vindt vaak plaats tijdens een storm, waarbij het over de landtong stromende water

(ook wel 'overwash' genoemd) een nieuwe toegang kan creëren. In beide gevallen migreert de tweede geul vervolgens noordwaarts richting het strand en verdwijnt tenslotte wanneer deze te dicht bij de hoofdgeul komt.



Figuur 3.8 Ontwikkeling van de geul aan de noordflank van de Zandmotor in de afgelopen 7 jaar. Contourlijn geeft hoogwater niveau aan (Huisman et al., 2021).

De stroming door de geul en het getij in de lagune nemen af door de tijd heen. De voortdurende noordwaartse uitbreiding van de landtong zorgt er namelijk voor dat de geulmonding verzandt en steeds meer noordwaarts opschuift, waardoor de geul steeds lastiger af kan wateren naar zee (Figuur 3.8). Door de langere geullengte en het ondieper worden van de geul zijn de waterstandsvariaties in de lagune ook sterk afgenomen. De waterstand wordt inmiddels niet alleen bepaald door het getij maar ook (in mindere mate) door de neerslag. In 2020 was de lagune zelfs helemaal verstoken van uitwisseling van water met de zee, en vond er alleen nog maar overwash plaats bij

hoogwater. Dat had een grote invloed op de omstandigheden in de lagune die van belang zijn voor de daar levende bodemdieren (zie Paragraaf 4.3). Het gebied is echter zeer dynamisch en in 2021 was er weer sprake van een nieuwe opening naar de zee toe.

Het duinmeer en de lagune worden aan de zuidwestzijde door de tijd heen steeds ondieper én kleiner in oppervlak. Omdat er zand instuift dat onder de invloed van de heersende winden vanuit het zuidwesten weggeblazen wordt vanaf het strand zuidelijk van de Zandmotor en vanaf de haak (Arens, 2021). In de eerste vier jaar is er ongeveer 200.000 m³ zand in de lagune terechtgekomen (Hoonhout & De Vries, 2017). Van dit zand komt bijna 60% uit het intergetijdegebied en een kleiner deel (40%) van de erosie van het droge strand op de haak (Hoonhout & De Vries, 2017). Veel zand komt vanaf het strand dat aangroeit aan de zuidwestzijde van de Zandmotor. Zand wordt hier door de wind richting de lagune en het duinmeer geblazen. Aanvankelijk werd ook zand vanaf het oppervlak van de haak meegenomen door de wind, maar na enkele jaren nam de verstuiving hiervan af omdat er een schelpenvloer ontstond door het wegstuiven van het fijnste zand. De hoogte van de haak is in de eerste jaren na aanleg overigens wel afgenomen met circa 50 cm als gevolg van het verstuiwen van zand.

Het effect van de instuiving is dat de oppervlakken van het duinmeer en van de lagune sterk aan het afnemen zijn (Figuur 3.8), hoewel er soms ook een vergroting van het oppervlak kan zijn onder invloed van stormopzet van het zeewater of als er erg veel neerslag is. Van het oorspronkelijke totale oppervlak van de lagune van circa 210.000 m² is in 2021 nog slechts een kleine 100.000 m² over (Huisman et al., 2021). Hierdoor hoeft er per getijdencyclus minder water in en uit de lagune te stromen, waardoor de stroomsnelheden in de geul afnemen.

3.2.6 Vorming van kliffen op de haak

Tijdens stormen slaat er zand af van de haak van de Zandmotor, wat daarna meegenomen wordt door de golven en stromingen langs de kust. In veel gevallen trekt de kust zich gelijkmatig terug waardoor het

strand 'lager' wordt. Een bijzondere situatie doet zich voor wanneer een storm optreedt tijdens laagwater. In zo'n geval kan er erosie ontstaan op het lagere deel van het strand, terwijl het hogere deel van het strand ongemoeid blijft (De Schipper et al., 2017; Van Bemmelen et al., 2020). Er kunnen dan 'kliffen' (of steilranden) ontstaan op de zeezijde van de haak van de Zandmotor (Figuur 3.9). De hoogte daarvan kan variëren tussen enkele decimeters en anderhalve meter. Incidenteel is de hoogte opgelopen tot twee à drie meter.

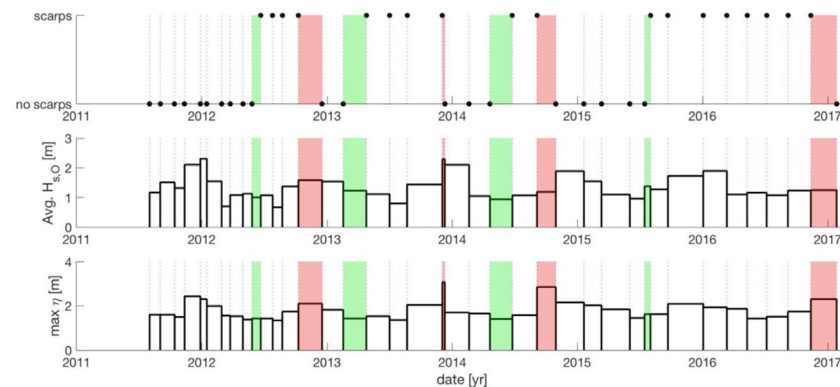


Figuur 3.9 Kliffen op de Zandmotor (De Schipper et al., 2017; Luchtfoto : Rijkswaterstaat - Joop van Houdt)

Deze steilranden ontstaan met name tijdens zomerstormen, waarbij de golven niet voldoende oploophoogte hebben om ook het bovenste deel van het zandprofiel te eroderen. In veel gevallen worden de kliffen weer geërodeerd door een storm tijdens hoogwater, zeker als deze samengaat met een hoge waterstand, of juist door het uitdrogen en inzakken van het zand in droge periodes.

In Figuur 3.10 is een overzicht te zien van het voorkomen van steilranden bij de Zandmotor. De milde condities, waarbij steilranden ontstaan, zijn groen gearceerd, terwijl de extreme condities met meer golfoploop rood zijn gearceerd. Door de relatief grote kruinhoogte (ten opzichte van de oploophoogte van de golven) bij de Zandmotor kunnen de steilranden ontstaan. Daarnaast speelt ook de steilheid van het

profiel een rol, omdat er erosie moet optreden voor de steilranden kunnen ontstaan.



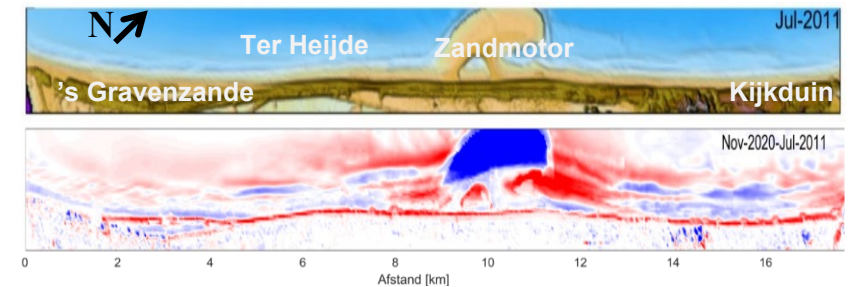
Figuur 3.10 Optreden van steilranden op de Zandmotor in samenhang met de periode gemiddelde golfhoogte ($H_{s,0}$) en golfploffhoogte (η). Groen : ontstaan van steilranden; Rood : erosie van steilranden (De Schipper et al., 2017; Van Bemmelen et al., 2020).

3.3 Duinontwikkeling

De wind neemt niet alleen zand mee naar de lagune en het duinmeer, maar bouwt ook de duinen op. De wind pikt het zand op van de haak en het natte strand en transporteert het dan landwaarts. Het meeste van dit wegblazen zand wordt ingevangen door de eerste duinenrij ('duinversterking Delfland') die hierdoor sterk is gegroeid in zowel de hoogte als breedte (Huisman et al., 2021). In de achterliggende duinen kwam relatief weinig zand terecht.

De eerste duinenrij landwaarts van de Zandmotor (ongeveer 2,5 km van het centrum van de Zandmotor) is over de periode tussen 2011 en 2021 aangegroeid met circa 700.000 m³ (Huisman et al., 2021). Dit komt overeen met een gemiddelde groei van 14 m³/m/jaar. Deze groei vond zeer geleidelijk plaats als gevolg van het inwaaien van zand dat vanaf het strand en intergetijdegebied komt. De effecten op de

veiligheid zijn echter niet direct merkbaar, omdat er voor aanleg van de Zandmotor al een groot veiligheidsbuffer was toegevoegd door de duinversterking in 2010 (circa 40 tot 80 meter duinbreedte). De Zandmotor zorgt echter wel voor een zandbuffer waardoor de duinveiligheid bij de Zandmotor en op de omliggende kust voor langere tijd is gewaarborgd.



Figuur 3.11 Verskil in bodemligging van de Delflandse kust tussen november 2020 en juli 2011 (Huisman et al., 2021).

De aangroei snelheid van de duinen bij de Zandmotor is niet wezenlijk anders dan elders langs de Delflandse kust, waar de duinen gemiddeld ongeveer 13 m³/m/jaar groeiden. De reden hiervoor is dat een deel van het windtransport wordt ingevangen het duinmeer en in de lagune (Van Weerd & Wijnberg, 2016). 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 m³/m/jaar; Hoonhout & De Vries, 2017). Overigens wordt verwacht dat dit relatief fijne zand in de lagune en het duinmeer in de toekomst (in 10 tot 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 intergetijdegebied.



Figuur 3.12 Opbouw van duinen in de zeereep (links) en nieuwe 'embryonale duinen' op de Zandmotor (rechts).

In de eerste jaren na aanleg van de Zandmotor groeide met name de eerste duinenrij in de hoogte, maar in later jaren is er ook sprake van opbouw van nieuwe duintjes op de Zandmotor, de embryonale duinen (Figuur 3.12; Arens, 2021). Al in 2013 waren er enkele kleine duintjes, maar pas vanaf 2016 was er sprake van grootschalige duingroei op de Zandmotor. Deze duintjes ontstaan met name doordat zandkorrels ingevangen worden in opkomende begroeiing (meestal helm- of biestarwegras). Deze planten hebben er vaak baat bij dat het zand blijft liggen, waardoor hun groei wordt versterkt. De groeisnelheid van de nieuwe duintjes was initieel niet erg hoog, maar inmiddels zijn sommige nieuwe duinen in hoogte vergelijkbaar met de zeereep. In de tussentijd zijn deze duintjes waardevol als schuilgebied voor broedvogels (zie paragraaf 4.4).

Waar de door de wind verplaatste zandkorrels terechtkomen hangt niet alleen samen met de windsnelheid en -richting, maar ook met de korrelgrootte. De fijnste korrels worden meegenomen door de wind zonder de grond te raken, waardoor ze tot hoog in de duinen kunnen komen, terwijl de middelgrootte en grovere zandkorrels over het strand stuiten of rollen. Deze rollende en stuitende zandkorrels zullen dus eerder tegengehouden worden door vegetatie. Ook is een deel van de zandkorrels zo grof dat ze amper verplaatsen en blijven er schelpenresten achter. Hierdoor vormde zich op de haak een gebied met een beschermde laag van grovere zandkorrels en schelpen die

weerstand biedt tegen verdere erosie door de wind (Figuur 3.13). In feite is dat er de oorzaak van dat de wind na de eerste jaren nog maar weinig zand kon oppikken van het oppervlak van de haak. Door de wind meegenomen zand kwam in latere jaren voornamelijk uit het intergetijdegebied van het strand waar het water het oppervlak steeds opnieuw sorteert zodat verstufbaar zand beschikbaar blijft.

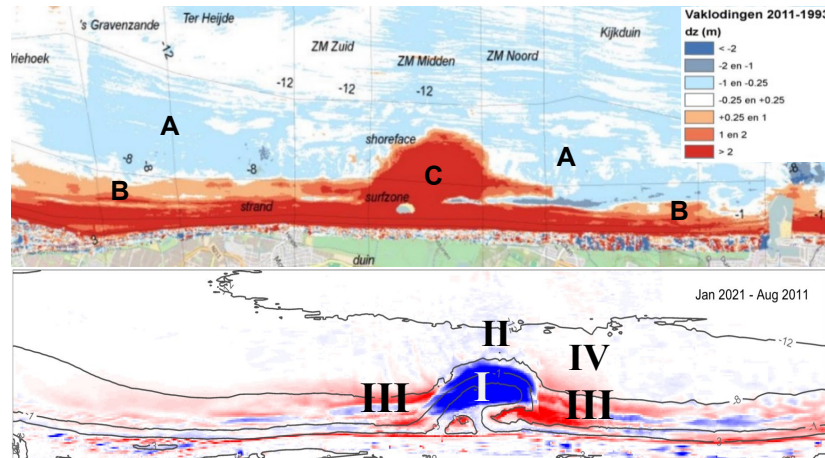


Figuur 3.13 Schelpen op de Zandmotor

3.4 Vooroever van de Zandmotor

3.4.1 Verandering van de vooroever

Ook de diepe vooroever (vanaf 8 meter waterdiepte) van de Delflandse kust verandert, maar dat is grotendeels het gevolg van de al bestaande lange termijn trends. Al enkele decades vindt er hoofdzakelijk erosie plaats op de diepere vooroever (alle blauwe gebieden; zie A in Figuur 3.14). In de afgelopen tien jaar is er op de vooroever tussen 8 en 12 meter waterdiepte een verlies van ongeveer 100.000 m³/jaar opgetreden. Bekend is dat er verschillende fysische processen zijn die hieraan bijdragen. Een deel van het zand zal landwaarts worden vervoerd door de golven én recirculatiestromingen als gevolg van zoetwaterpluimen uit de Rijn-monding. Ook is er een netto noordwaarts gericht transport door het getij op dieper water.



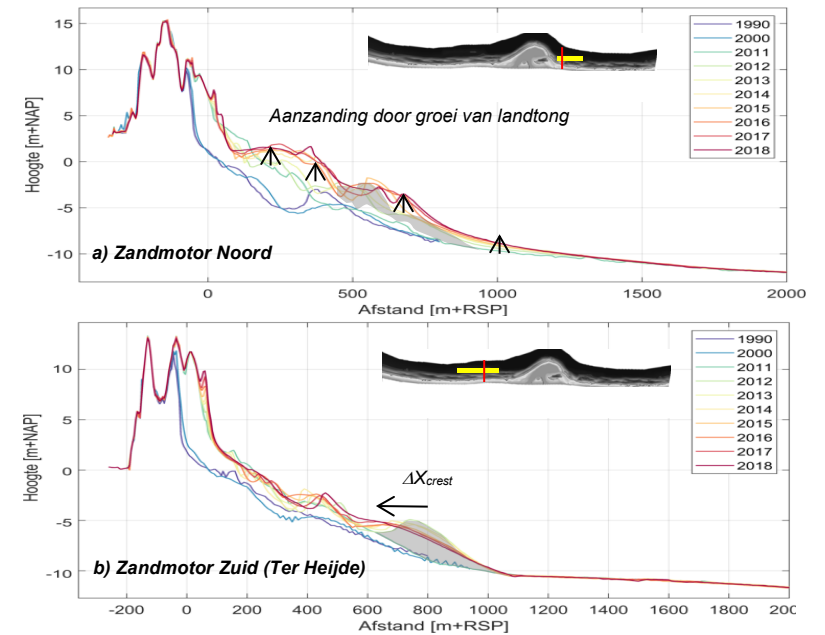
Figuur 3.14 Gemeten bodemverandering in de periode 1993 tot 2011 en voor de periode 2011 tot 2018. Sedimenterende gebieden zijn rood, en erosie is blauw.

In de ondiepe kustzone is er daarentegen juist veel zand bijgekomen als gevolg van suppleties. Uitgevoerde vooroeversuppleties zijn als langwerpige rode lijnen herkenbaar (zie B) en ook de Zandmotor is duidelijk terug te zien (zie C). Aanvullend daaraan is er door natuurlijke processen ook zand aangevoerd vanaf de diepe vooroever naar de ondiepe kustzone.

3.4.2 Vooroeversuppleties

Aan weerszijden van de Zandmotor zijn twee minder zichtbare 'vooroeversuppleties' aangelegd in 2011 (zie Figuur 2.5). Deze vooroeversuppleties zijn zandbuffers die net zeewaarts van de zandbank worden geplaatst (Figuur 3.15). De noordelijk vooroeversuppletie had tevens als doel om in de eerste maanden na aanleg te zorgen dat er geen erosie kon optreden in het gebied net noordelijk van de Zandmotor. Het werd voor aanleg van de Zandmotor mogelijk geacht dat zand van deze kustsectie (net noordelijk van de Zandmotor) naar de lagune toe zou gaan als er aanhoudende golven uit het noorden zouden optreden, wat daar lokaal tijdelijk een tekort

aan zand op kon leveren. Zo'n tijdelijke erosie is overigens niet opgetreden.



Figuur 3.15 Gemeten dwarsprofielen ter hoogte van de uitgevoerde vooroeversuppleties. Grijs gearceerde gebied geeft het toegevoegde sediment van de suppletie aan (Huisman et al., 2021).

De vooroeversuppleties hebben zich verschillend ontwikkeld. De noordelijke suppletie werd al in het eerste jaar aangevuld met sediment dat vanaf de kop van de Zandmotor aangevoerd werd (Figuur 3.15a). Feitelijk was de suppletie een ondiepe zone waardoor de landtong van de Zandmotor zich sneller heeft kunnen ontwikkelen. De zuidelijke vooroeversuppletie kon zich vrij ontwikkelen, waarbij opvalt dat zowel de kruin van de suppletie als de bestaande banken richting de kust worden geduwd (zie ΔX_{crest} in Figuur 3.15b). Dit komt overeen met de

ervaring bij andere vooroeversuppleties langs de Nederlandse kust (Huisman, 2019).

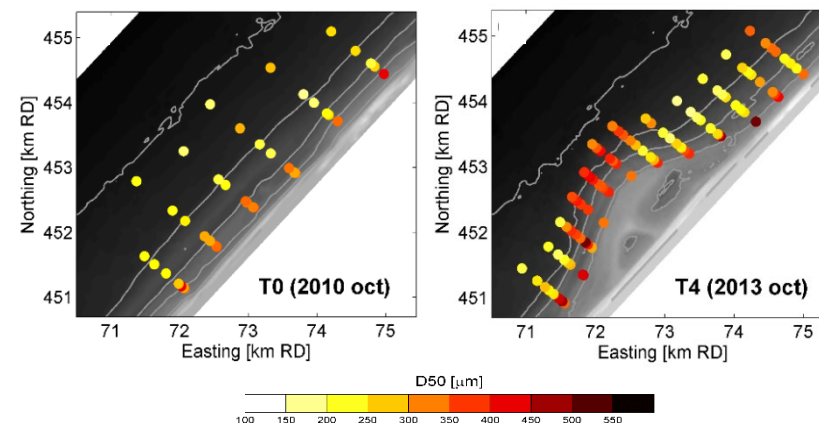
3.4.3 Sedimentsamenstelling van de vooroever

De bodemsamenstelling van de Zandmotor is belangrijk voor de natuur. Voor vegetatie is het makkelijker om zich te vestigen in fijnkorrelig materiaal dan op grof zand. Ook voor de in en op de bodem levende dieren (zoals wormen, schelpdieren en kreeftjes) is het sediment van belang, aangezien deze dieren zich over de bodem verplaatsen, zich aan de korrels vasthechten of gangen graven die niet in moeten storten. Daarnaast zijn er ook bepaalde platvissen die schuilen op de bodem, waarbij ze een dun laagje sediment gebruiken als camouflage voor roofdieren (Post et al., 2017). Het waarnemen van veranderingen in de bodemsamenstelling geeft daarom inzicht in de invloed van de Zandmotor op het leefgebied van bodemdieren.



Figuur 3.16 Verschillende korrelgroottes en schelpenrest in een zandmengels

Het sediment van de Zandmotor bestaat niet uit één soort zandige ronde korrels, maar uit een variatie van zandkorrels van verschillende grootte met verschillende vormen (meer vierkant of rond; zie Figuur 3.16). Typisch is de hoofdmoot van de korrels ergens tussen 0.1 en 0.5 mm groot in diameter, maar er kan soms ook nog heel fijnkorrelig materiaal (slib) met een korreldiameter kleiner dan 0.06 mm doorheen gemengd zijn. Het fijne materiaal kan de poriën van het zand opvullen waardoor een modderige bodem (met zand en slib) ontstaat, maar het fijne slib heeft in kleine hoeveelheden geen weerstand tegen de wind of stromingen.



Figuur 3.17 Gemeten mediane korreldiameter voor de situatie voor en na aanleg van de Zandmotor.

Voor aanleg bestond er een verfijning van het sediment in zeewaartse richting met grover zand rond de waterlijn (van ongeveer 0.4 mm) en fijn zand in dieper water (0.1 tot 0.2 mm; zie Figuur 3.17). Na aanleg van de Zandmotor is dit echter veranderd (Huisman et al., 2016), waarbij het volgende te zien is:

- 1) Gemiddeld is er net wat grover zand neergelegd dan er natuurlijk al in het gebied aanwezig was, namelijk een korrelgrootte van ongeveer 0.28 mm. Dit is in feite een directe invloed van de aanleg, omdat het gesuppleerde zand vanuit het wingebied hiervoor bepalend is.
- 2) Er is een grotere variatie van de korrelgrootte om de suppletie heen, wat veroorzaakt is door de invloed van de Zandmotor op de getijstroming. Deze invloed is met name te zien op dieper water zeewaarts van de Zandmotor. De korreldiameter (D_{50}) is hier lokaal zelfs twee keer zo grof geworden (ongeveer +0.2 mm grover). Aan de noord- en zuidzijde van de Zandmotor is het sediment juist iets fijner geworden.

3) In de lagune bij de Zandmotor is fijn slibbig sediment en organisch materiaal afgezet. Dit komt door de relatief kalme omstandigheden op deze plaats. In de geul die de lagune verbindt met de zee is juist relatief grof sediment aanwezig omdat de stroomsnelheden daar groot kunnen zijn. vanwege het in en uitstromen van het getij.

Onderliggende mechanismen

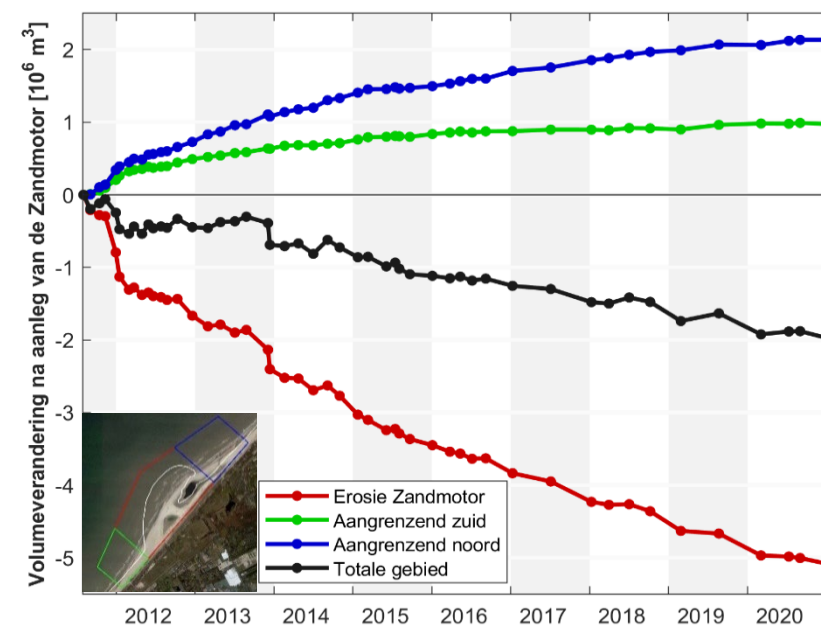
Met behulp van computermodellen kon worden vastgesteld dat vooral de beïnvloeding van de getijstroming zorgt voor het uitsorteren van het sediment op de diepere vooroever (Huisman et al., 2018). Opvallend genoeg waren het niet de stormen die het sediment in de vooroever uitsorteren wat vooraf de verwachting was. Het onderliggende mechanisme is dat de getijstroming genoeg kracht heeft om de fijnere korrels mee te nemen, maar de grote korrels moeilijk kan mobiliseren. De mate waarin een suppletie zeewaarts uitsteekt is bepalend voor de invloed op de getijstroming, en daarmee ook voor de verandering in bodemsamenstelling van de vooroever.

Als gevolg van de Zandmotor ontstaan er onderwater een aantal deelgebieden met verschillend sediment en/of andere golf- en stromingscondities. Verwacht wordt dat dit invloed heeft op bodemdieren (zie paragraaf 4.2). In het ontwerp is vooral de kustdwarse breedte van de Zandmotor van belang voor sedimentsoortering, omdat hierdoor de getijstroming wordt beïnvloed. Die breedte neemt af in de tijd, maar het zal het nog veel jaren duren voordat de bodemsamenstelling weer vergelijkbaar zal zijn met de situatie voor aanleg van de Zandmotor.

3.5 Zandbalans

Na aanleg van de Zandmotor trekt niet alleen de haak van de Zandmotor zich terug (bij I in Figuur 3.14), maar verdwijnt zand ook net zeewaarts daarvan (bij II in Figuur 3.14). Dit heeft te maken met de toegenomen getijstroomsnelheden net zeewaarts van de kop van de Zandmotor. In feite blokkeert de Zandmotor een deel van de

getijstroming waardoor de snelheden net zeewaarts wat hoger zijn dan ze voor aanleg waren. Direct om de Zandmotor heen is er aanzanding (III in Figuur 3.14). En ook zeewaarts van de Zandmotor is er aan de noordzijde wat aanzanding (IV in Figuur 3.14). Om inzicht te geven in de veranderingen is een berekening gedaan van de zandvolumes op de Zandmotor en net noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor (Figuur 3.18).



Figuur 3.18 Verandering in het gemeten volume van zand in de eerste 10 jaar na aanleg van de Zandmotor (Huisman et al., 2021).

Veranderingen bij de Zandmotor

Uit de metingen van de bodemhoogte kan de afname van de hoeveelheid zand op de Zandmotor berekend worden (rode lijn) en de toename van de zandvoorraad op de aangrenzende kustsecties (groene en blauwe lijn). In totaal is er ongeveer 5 miljoen m³ zand geërodeerd van de Zandmotor, terwijl er ongeveer 3 miljoen m³ is

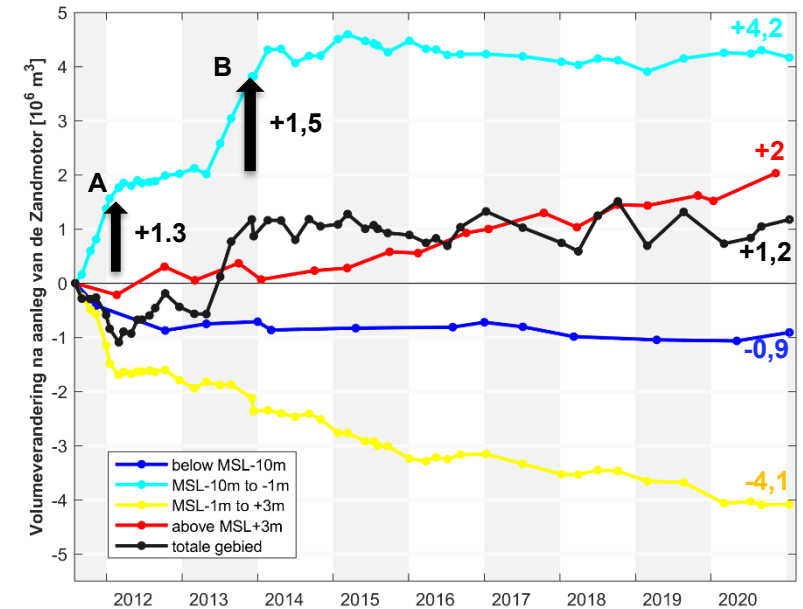
gesedimenteerd in de aangrenzende vakken (binnen 2,5 km van de Zandmotor; Huisman et al., 2021). Netto werd er in het ingemeten gebied rond de Zandmotor dus ongeveer 60% van het op de haak geërodeerde zand teruggevonden. Het resterende deel is echter vrijwel volledig nog aanwezig op de daaromheen liggende delen van de Delflandse kust, met name in de kustzone en duinen die noordelijk van de Zandmotor liggen. Dit is overigens wel anders dan na de eerste 5 jaar, toen nog 95% van het zand werd teruggevonden in het relatief kleine gebied met een lengte van 5 km. Het zand verspreidt zich dus over een steeds groter gebied.

De snelheid van erosie en sedimentatie op de kop van de Zandmotor is door de tijd heen afgenomen. Dit komt omdat de Zandmotor relatief gezien steeds minder ver uitsteekt ten opzichte van de normale kustlijn en dus een minder groot effect heeft op de stroomsnelheden en daaraan gekoppelde sedimenttransporten. Door de tijd heen zal de snelheid van verandering alleen nog maar verder afnemen. De totale groei van de duinen was 700.000 m³/jaar voor de beschouwde 5 km kustzone rond de Zandmotor, wat overeenkomt met een gemiddelde groei van 14 m³/m/jaar.

Sedimentbalans Delfland

Kijkend naar de hele Delflandse kust blijkt de sedimentbalans beter te sluiten (Huisman et al., 2021). Na aanleg van de Zandmotor is er in 10 jaar ongeveer 1,2 miljoen m³ zand bijgekomen. Dit is voornamelijk het gevolg van suppleties. In totaal werd een volume van 2,8 miljoen m³ gesuppleerd op de Delflandse kust in de beschouwde 10 jarige periode, waarvan 1,3 miljoen m³ werd gesuppleerd in het najaar van 2011 als deel van de vooroeversuppleties van de Zandmotor, en 1,5 miljoen m³ in 2013 voor een suppletie ter hoogte van 's Gravenzande en Hoek van Holland. Als deze suppleties van het volume worden afgetrokken, dan wordt over de periode tussen 2011 en 2021 een verlies gevonden van ongeveer 1,6 miljoen m³ voor de hele Delflandse kust (zie Figuur 3.19). Dit zand is door golfgedreven stromingen noordwaarts vervoerd naar de kustzone van Rijnland. De meeste

volumeveranderingen vonden dus plaats binnen de deelgebieden van de Delflandse kust.



Figuur 3.19 Volumeverandering binnen het Delflandse kustvak sinds 2011
 A : Suppletie +0,7 miljoen m³ (tweede deel van suppletie bij Ter Heijde)
 B : Suppletie +1,9 miljoen m³ (Hoek van Holland – 's Gravenzande)

De duinen en de brandingszone zijn sterk in volume toegenomen (zie rode en lichtblauwe lijnen in Figuur 3.19), terwijl het strand (van met name de Zandmotor) juist sterk afnam in volume (gele lijn in Figuur 3.19). De veranderingen op de diepere vooroever waren niet zo groot (donkerblauwe lijn in Figuur 3.19). Verondersteld wordt dat er een klein transport is van sediment vanaf de diepe vooroever naar de brandingszone én dat er ook op de diepe vooroever zand naar het noorden wordt getransporteerd door het getij.

Jaarlijkse variatie

Berekeningen van de zandtransporten op de Delflandse kust laten zien dat er een netto noordwaarts transport is richting Scheveningen, maar dit transport varieert aanzienlijk per jaar. In sommige jaren was het transport in de regio Ter Heijde 300.000 m³/jaar, terwijl het voor andere jaren slechts enkele tienduizenden m³/jaar was. Ter plaatse van de havendammen van Scheveningen wordt een transport geschat van ongeveer 150.000 m³/jaar. Dit komt ook overeen met het berekende verlies aan zand van ongeveer 1,6 miljoen m³ over de beschouwde periode van 10 jaar.

Verwachtingen toekomstige ontwikkeling

Op de langere termijn zal het zand van de Zandmotor zich steeds verder langs de kust verspreiden (Luijendijk et al., 2019). Hierdoor zal de Zandmotor steeds kleiner worden, terwijl de stranden bij Ter Heijde en Kijkduin juist breder zullen worden.

De zandbuffer zal steeds langzamer eroderen omdat de relatieve grootte van de uitbouw (en verdraaiing van de kustoriëntatie) steeds kleiner wordt. Ondanks deze terugtrekking van de kust zal de Zandmotor nog enkele tientallen jaren herkenbaar zijn als zeewaartse uitbouw op de Delflandse kust. In 2040 ligt er naar verwachting nog een strand dat ongeveer 400 meter breed zal zijn.

Over enkele jaren zal een nieuwe toegang ontstaan naar de lagune toe (Luijendijk et al., 2019). Dat zal vrij abrupt zijn tijdens een storm die samenvalt met hoogwater, waarbij zand van de haak naar binnen zal worden gespoeld. In feite wordt de Zandmotor dan weer gesplitst in een noordelijk en zuidelijk deel.

De duinen op de Delflandse kust zullen de komende decennia verder groeien met zand dat afkomstig is van de Zandmotor. Zeker als kusterosie er voor gaat zorgen dat relatief fijn zand uit de lagune weer beschikbaar komt, en dit een bijdrage kan leveren aan duingroei. De Zandmotor levert daarmee een lange termijn bijdrage aan de veiligheid van de hele Delflandse kust. Op dit moment levert de Zandmotor echter

nog vooral een bijdrage aan de ontwikkeling van de kustlijn van het deel van de Delflandse kust tussen Ter Heijde en Kijkduin.

De nieuwe duintjes op de Zandmotor zullen verder groeien door toenemende vegetatie en instuiven van zand, waardoor het landschap minder gelijkmatig en ruiger wordt. Er zal zand in de lagune en het duinmeer blijven inwaaien, waardoor het oppervlak met relatief nat strand zal toenemen. Mogelijk zal zich daar nog vegetatie vestigen en kan dit zich ontwikkelen tot natte duinvallei.

3.6 Evaluatie kust- en duinontwikkeling

De in dit hoofdstuk besproken ontwikkelingen van de kustlijn, duinen en het kustfundament vormen de basis voor de evaluatie van de duingroei, kustlijnontwikkeling en sedimentsamenstelling van de Delflandse kust. Opgemerkt moet worden dat een, soms kortere, beantwoording op de sub-vragen te vinden is in Appendix A.

Natuurlijke duingroei en langdurige instandhouding kustzone

De eerste doelstelling uit de Milieu Effect Rapportage wordt verwoord in de volgende evaluatievraag:

- *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?"*

Dankzij de Zandmotor is er een dynamisch gebied gevormd waar zee, zand en water vrij spel hebben, passend bij het Nederlandse kustbeleid. Bij de Zandmotor zijn zowel de embryonale duinen op het strand, als de waterkerende duinen van de zeereep gegroeid als gevolg van aanvoer van zand via windtransport. De veiligheid tegen overstromingen van de Delflandse kust was al voldoende, maar is door de bijdrage van de Zandmotor aan de sedimentbalans voor lange termijn gewaarborgd. Het bij aanleg

neerleggen van een grote hoeveelheid zand op de kustlijn zorgt overigens al direct voor betere bescherming tegen het water.

Van 2011 tot 2021 is de zandtoename in de duinen achter de Zandmotor 14 m³/m/jaar. Dit zand is vrijwel allemaal in de eerste duinenrij terecht gekomen. De duingroei bij de Zandmotor is daarmee iets groter dan de gemiddelde duingroei van de Delflandse kust (13 m³/m/jr). Er was dankzij de Zandmotor wel meer zand beschikbaar voor eolisch transport, maar dit werd deels afgevangen door de lagune en het duinmeer. Als deze aanzanding in het duinmeer en de lagune wordt meegenomen dan is het windtransport bij de Zandmotor naar verwachting aanzienlijk groter (~27 m³/m/jaar). Ook het ontstaan van vegetatie en embryonale duin op de Zandmotor draagt in principe niet bij aan de veiligheid, omdat er hierdoor minder zand doorwaait naar de primaire waterkerende duinen van de zeereep. Op lange termijn komt zand dat is ingevangen door de lagune, het duinmeer en embryonale duinen echter weer beschikbaar voor windtransport als de Zandmotor verder erodeert.

Niet alleen het gebied direct achter de Zandmotor wordt overigens beschermd. Tijdens extreme stormen zal de Zandmotor ook meer sediment leveren aan de omliggende kust dan onder normale condities, waardoor ook de duinen op de aanliggende kust (o.a. Ter Heijde en Kijkduin) baat hebben van het zand dat zich vanaf de Zandmotor kustlangs verspreidt. De Zandmotor zorgt op natuurlijke wijze voor instandhouding van de veiligheid tegen overstromingen van een groot deel van de Delflandse kust. Vrijwel al het gesuppleerde zand van de Zandmotor is nog aanwezig in het kustfundament van de Delflandse en Rijnlandse kust. Wel heeft er een verspreiding van zand plaats gevonden binnen het kustfundament. Er is circa 1,5 miljoen m³ noordwaarts getransporteerd richting Rijnland.

Lessen over morfologische ontwikkeling

Daarnaast kunnen er op basis van de bevindingen in het

meetprogramma ook lessen worden geleerd over morfologische ontwikkelingen bij toekomstige grootschalige suppleties (MER doelstelling 2):

- *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 vormverandering bij de Zandmotor is anders dan bij reguliere (vooroever)suppleties. Deze vervormen vooral dwars op de kust, waarbij de kruin langzaam naar de kust toe wordt verplaatst. Bij de Zandmotor vindt er echter met name herverdeling plaats langs de kust door golfgedreven langtransport. De dominantie van dit proces maakt het mogelijk om relatief snel, zonder al te veel complexe processen mee te nemen, een inzicht te krijgen in de verwachte ontwikkeling van een grootschalige suppletie (of zandige kustversterking). Door het toevoegen van zand aan het systeem is de dynamiek van de zandbanken wordt vergroot.

De Zandmotor zorgt voor een vergroting van de getijsnelheden bij de haak en een recirculatie op de flanken. Hierdoor vindt erosie plaats op de diepe vooroever zeewaarts van de Zandmotor en afzetting van dit sediment op het aangrenzende deelgebied noordelijk van de Zandmotor (op de diepe vooroever), wat tevens zorgt voor sortering van bodemmateriaal.

Door aanvoer van zand vanaf de Zandmotor konden de duinen worden versterkt. De mate van transport was vrij constant in de tijd en werd niet alleen bepaald door de windcondities en grootte van de suppletie, maar zeker zo veel door het invangen van zand in een landwaarts gelegen lagune of duinmeer. In de lagune en het duinmeer zorgt door de wind aangevoerd zand voor aanzanding aan de westelijke zijde. Ook de ontwikkeling van vegetatie en nieuwe duintjes op het strand kan zorgen voor een afname van het windtransport naar de bestaande duinen. Het intergetijdegebied is van groot belang voor het aanbod van eolisch

getransporteerd zand. Op het hogere strand van de Zandmotor komt relatief weinig zand beschikbaar, aangezien hier een beschermende laag van grover zand en schelpen is ontstaan door selectief transport van het fijne zand. De haak ligt te hoog voor de golven (en golfloop) om deze laag te kunnen omwerken.

Ter plaatse van de Zandmotor zijn zowel kustlangs uniforme als ritmische zandbanken waargenomen. Een belangrijke bevinding is dat het aantal zandbanken op de Delflandse kust toeneemt als gevolg van het suppleren van zand, wat overigens een ontwikkeling is die ook plaatsgevonden heeft door andere suppleties. Verder blijkt dat de kustlangse variabiliteit van de zandbanken bij de Zandmotor groter is als golven meer loodrecht binnenkomen, terwijl de zandbanken op de lijzijde van de Zandmotor over het algemeen meer kustlangs uniform worden.

Sedimentsamenstelling van de vooroever

Er kan ook informatie gegeven worden over de invloed van de Zandmotor op sedimentsamenstelling op het natte strand en de vooroever (MER doelstelling 2):

- *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?*

Grootschalige suppleties, zoals de Zandmotor, beïnvloeden zowel de golven als de getijstroming. De golfforcering en resulterende stromingen zorgen voor erosie in ondiep water, waardoor de bodemsamenstelling in de brandingszone grover wordt. De grootste invloed van de Zandmotor op de bodemsamenstelling vindt echter plaats in het diepere water op de vooroever (> 6m waterdiepte), waar de Zandmotor zorgt voor een versnelling van de getijstroming. Net noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor ontstaan gebieden met een fijnere bodemsamenstelling. De effecten op de bodemsamenstelling reiken verder dan het gebied waarin de Zandmotor is aangelegd (tot 3 km uit de kust). De mate waarin een suppletie zeewaarts uitsteekt is bepalend voor de invloed op de getijstroming, en daarmee ook op de verandering in bodemsamenstelling van de vooroever.

4 Natuurontwikkeling

4.1 Verwachtingen en doelen

De Zandmotor voegt een flink stuk land toe aan de kust waarop zich nieuwe natuur kan ontwikkelen (Figuur 4.1). Het strand en de vooroever waren voor aanleg van de Zandmotor al bestaande leefgebieden, maar er zijn ook nieuwe omgevingen toegevoegd met heel andere eigenschappen zoals de lagune en het duinmeer. De lagune en het duinmeer hebben een heel ander klimaat dan de brandingszone van de kust waar de golven en stromingen vrij spel hebben. De ontwikkeling van de natuur én natuurlijkheid van deze gebieden is een belangrijk aandachtspunt in de monitoring van de Zandmotor.



Figuur 4.1 Overzicht van de verschillende deelgebieden op de Zandmotor

Doelen

Doel van dit hoofdstuk is om de vragen over meerwaarde van de Zandmotor voor natuur in beeld te brengen (EF2-2), waarbij met name aandacht is voor de invloed van het eenmalig neerleggen van een grote zandsuppletie op de bodemdieren, in plaats van regelmatige

kleine suppleties. Een beschrijving wordt gegeven van de ontwikkeling van aantrekkelijke natuur in de duinen (EF3-1a), in de lagune, het duinmeer, in de vooroever alsook wat betreft vogels, vissen en zoogdieren (EF3-1b).

Verwachtingen

Voor aanleg van de Zandmotor werd verwacht dat er een invloed zou zijn van de Zandmotor op de omgevingscondities (o.a. stromingen, bodemdynamiek, bodemsediment en verstuuving van zand) waardoor zowel boven als onderwater de leefomgeving zou veranderen (zie Hoofdstuk 3).

De bodemdiersamenstelling in de ondiepe kustzone is een belangrijke graadmeter voor de invloed van een maatregel op de ecologie. De op en in de bodem levende dieren, zoals krabbetjes, schelpdieren, wormpjes en kreeftachtigen, dienen namelijk als voedselbron voor vogels en vissen. Vissen, zoals tong en schol, leven dichtbij de bodem en voeden zich daar met wormen en garnaltjes. Zelfs vogels, zoals de zwarte zee-eend, duiken naar de bodem om schelpdieren op te duiken, terwijl andere vogelsoorten foerageren op droogvallende delen van het intergetijdstrand en bodemdieren uit het zand halen. Het grote oppervlak én de relatief moeilijke bereikbaarheid van de haak voor bezoekers zou een rustige omgeving moeten bieden voor vogels en zeezoogdieren.

Dankzij het ineens neerleggen van een grote hoeveelheid zand, zoals bij de Zandmotor, zou er minder vaak bedekking van de bodemdieren zijn dan bij reguliere vooroeversuppleties (die elke 3 tot 5 jaar nodig zijn). Verwacht werd daarom dat er een positieve invloed zou zijn op langer levende soorten bodemdieren, die over het algemeen minder snel herstellen van bedekking met zand door een suppletie. Daarnaast werd ook verwacht dat de kustomgeving meer divers zou worden, aangezien ruimtelijke variaties in omgevingscondities kunnen zorgen voor verschillende typen leefomgevingen voor bodemdieren. De tegen golven en stromingen beschutte lagune zou een andere

lijken op de platen van de Waddenzee. In dit rustige gebied zouden dan jonge vissen op kunnen groeien.

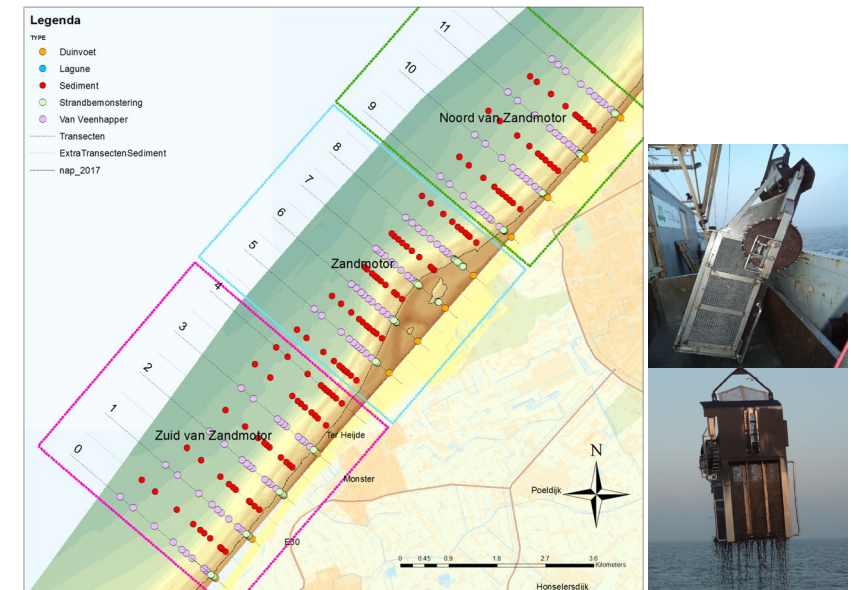
De verwachting voor het strand van de Zandmotor was dat dit een gebied zou worden met een sterke dynamiek van de bodem. Op dit strand zouden planten, zoals helm- en biestarwegras, zich snel gaan vestigen, waardoor een duinachtig gebied zou ontstaan dat geschikt is voor broedvogels. Het zand, dat door de wind over het strand wordt geblazen, zou ingevangen moeten worden in de luwe zone rond de vegetatie, waardoor de duintjes steeds verder groeien. Ook het voorkomen van zeldzame planten heeft aandacht in de monitoring op de Zandmotor, omdat deze zich hier zouden kunnen gaan vestigen.

Landwaarts van de Zandmotor bevindt zich de eerste duinenrij (of 'Zeereep') die is aangelegd bij de duinversterking van 2010, waarachter de duinen van Solleveld zijn gelegen. Deze twee deelgebieden vallen in principe buiten het gebied van de Zandmotor, maar er is wel onderzocht of er een invloed was van de Zandmotor op de vegetatie én daarvoor bepalende overstuiving van zout en inwaai van zand. Dat geldt met name voor de duinen van Solleveld, aangezien dit een beschermd natuurgebied is waar verschillende typen duinhabitats met eigen karakteristieke vegetatie voorkomen.

4.2 De leefomgeving in de vooroever

Om de ontwikkelingen in de bodemdiergemeenschap in het gebied te volgen is er een groot aantal bodemmonsters genomen in de vooroever en op het strand van de Zandmotor (Wijsman et al., 2020; Figuur 4.2). Voor de monsternamen is gebruik gemaakt van twee technieken die elkaar aanvullen, een bodemschaaf en een Van Veen happer (Wijsman et al., 2021). De bodemschaaf wordt over de zeebodem getrokken waarbij bodemdieren op en in het sediment (tot een diepte van 10 cm) worden verzameld over een oppervlakte van circa 15 m². Met de Van Veen happer wordt juist lokaal een kleiner monster genomen (0.1 m²) van het bodemsediment met de

bijbehorende bodemdieren. Omdat het monster van de bodemschaaf wordt gezeefd over een 5 mm zeef worden hiermee de schelpdieren en kreeftachtigen (krabben en heremietkreeftjes) goed bemonsterd. De monsters uit de bodemschaaf worden aan boord gezeefd over een 1 mm zeef, waardoor deze methode geschikt is voor wormen en kleinere kreeftachtigen. Per gevonden bodemdiersoort is in ieder monster het gewicht en het aantal bepaald en dit is omgerekend naar biomassa (in gram per m²) en dichtheid (aantal individuen per m²). Ook wordt het totaal aantal soorten (taxa) per monster bepaald.



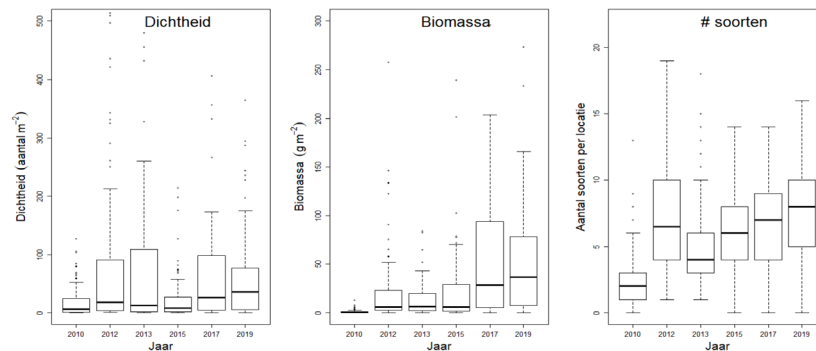
Figuur 4.2 Overzicht van meetlocaties (Wijsman et al., 2018)

De monitoring van het macrobenthos is gestart in 2010, voor aanleg van de Zandmotor, waarna er vervolgmetingen zijn uitgevoerd in het najaar van 2012, 2013, 2015, 2017 en 2019. De meetlocaties zijn gelegen op 12 kustdwarse transecten die circa 800 tot 1000 meter uit

elkaar lagen. Op elk van deze transecten werden 10 monsters genomen. Op zowel de monsterlocaties van de bodemdieren als tussenliggende raaien (vanaf 2013) is tevens de korrelgrootte samenstelling van de bodem bepaald.

Veranderingen in de bodemdierpopulaties

Na aanleg van de Zandmotor blijken zowel het aantal soorten, de dichtheid én de biomassa hoger dan in de meting voor aanleg in 2010 (Figuur 4.3; Wijsman et al., 2020). Met name in 2019 en 2017 werd een grote biomassa bodemdieren gevonden én gemiddeld ook een groot aantal verschillende soorten (8 soorten per monster in 2019). De andere jaren was de biomassa soms fors lager. Dat geldt met name voor het referentiejaar 2010.

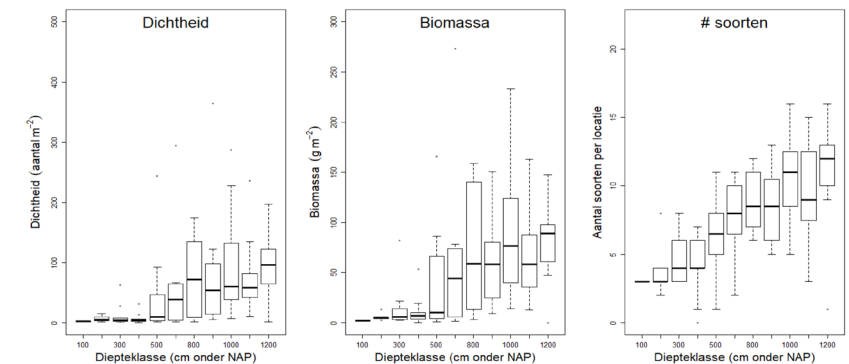


Figuur 4.3 Verandering in de tijd van de dichtheid, biomassa en aantal soorten bodemdieren, zoals gemeten met de bodemschaaf (Wijsman et al., 2020)

Opgemerkt moet worden dat de bodemdierpopulaties in de Hollandse kustzone van nature enorm variabel kunnen zijn van jaar tot jaar, waardoor de geobserveerde patronen mogelijk maar deels te relateren zijn aan de Zandmotor. Voor schelpdieren is het bijvoorbeeld heel bepalend waar en wanneer de larven naar de bodem zakken om zich te vestigen ('de broedval') en hoeveel van de schelpdieren in die periode worden opgegeten. Het moment en de plaats van de broedval

kunnen per jaar erg verschillen, waardoor bepaalde soorten sommige jaren meer of minder succesvol zijn.

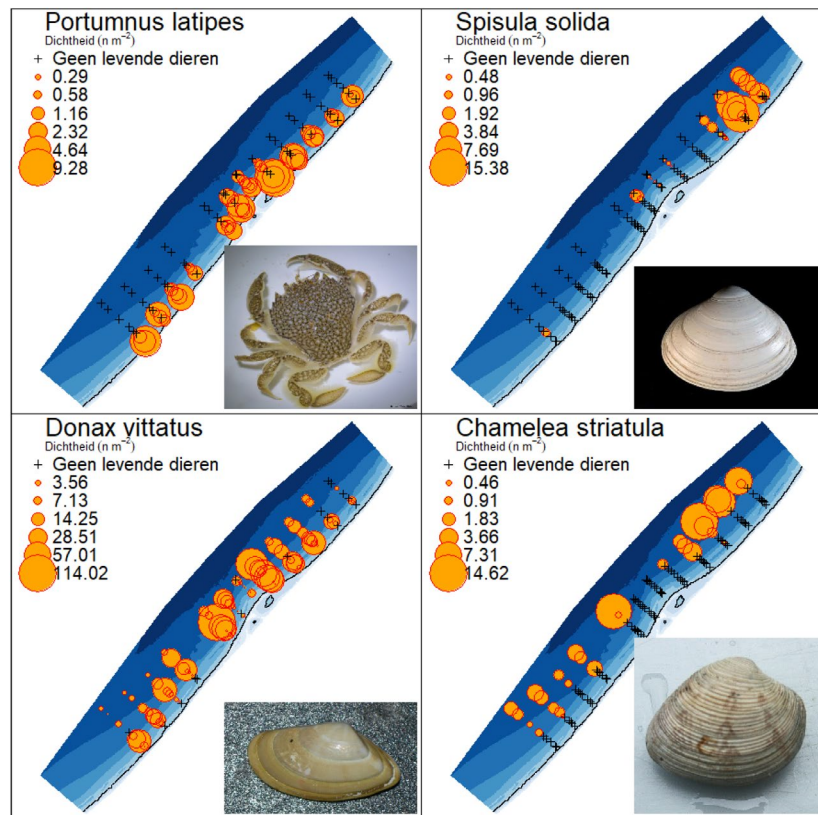
Ruimtelijk zijn er grote verschillen in de verdeling van de bodemdieren. Naarmate de diepte toeneemt worden er steeds meer bodemdieren gevonden (Figuur 4.4). Dit hangt samen met de omstandigheden. Met name de golven, stromingen, bodemsediment en de droogvalduur (in het litoraal) zijn van belang voor de ontwikkeling van populaties bodemdieren (Ysebaert et al., 2016; Tulp et al., 2018; Herman et al., 2021). Als naar een paar typische bodemdieren wordt gekeken dan valt te zien dat bodemdieren zich vestigen in gebieden met specifiek voor die soort gunstige omstandigheden (Figuur 4.5).



Figuur 4.4 Dichtheid, biomassa en aantal soorten bodemdieren in relatie tot waterdiepte, zoals gemeten met de bodemschaaf (Wijsman et al., 2020)

De ondiepe brekerbank zone is voor veel bodemdieren geen gemakkelijke leefomgeving, omdat de kracht van golven zorgt voor een hoge sedimentdynamiek. Ook het strand, met de afwisseling van droogval en overstrooming met zeewater en de sterk wisselende temperaturen zorgen voor een vijandige omgeving. Er komen daarom in het algemeen dan ook relatief weinig bodemdieren voor in de ondiepe brekerbank zone (zowel in aantal soorten als totaal). Alleen gespecialiseerde soorten, zoals de breedpootkrab (*Portunus latipes*;

zie Figuur 4.5) en de gemshorenworm (*Scolelepis squamata*), doen het hier goed. Alleen op de landtong van de lagune zijn andere soorten te vinden. De gemiddelde dichtheid van de bodemdieren op het strand was juist het laagst in 2017 en 2019, maar ook voor de andere jaren was het aantal aangetroffen bodemdieren laag in vergelijking met de vooroever.



Figuur 4.5 Ruimtelijk overzicht van de verspreiding van de soorten *Portunus latipes*, *Spisula solida*, *Donax vittatus* en *Ensis spp.* in 2017 op basis van vastgestelde dichtheid met de bodemschaaf (Wijsman et al., 2020)

Op grotere diepten (dieper dan -6 m NAP) zijn veel meer bodemdieren te vinden (zowel in biomassa als aantal soorten), met de hoogste waarden op dieptes groter dan 11m. De venusshell (*Chamelea striatula*) houdt bijvoorbeeld van wat dieper water (Figuur 4.5). De getijstromingen en het sediment zijn van groot belang in dieper water. De getijstrooming is essentieel voor de aanvoer van voedingsstoffen (algen), terwijl het sediment juist belangrijk is als plek om te vestigen. De stevige strandschelp (*Spisula solida*) vestigt zich bijvoorbeeld liever in middel tot grof zand, terwijl het zaagje (*Donax vittatus*) beter gedijt in fijner zand. Over het algemeen zijn er overigens meer soorten bodemdieren te vinden (én in grotere dichtheden) in gebieden met fijner zand (kleiner dan 0.25 mm) dan in gebieden met grof zand (Herman et al., 2021). Om deze reden worden er net noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor, waar fijner zand ligt, veel bodemdieren gevonden.

Leefgebied voor bodemdieren

De aanleg van de Zandmotor heeft geleid tot een grotere diversiteit aan leefgebieden (ecotopen) door de veranderde hydro- en morfodynamiek, waardoor ook de diversiteit in de bodemdiergemeenschappen is toegenomen (Van Egmond et al., 2018; Van Donk & Wijsman, 2020). In totaal kunnen er tien typische leefgebieden (ecotopen) worden geïdentificeerd na aanleg van de Zandmotor met 11 tot 17 clusters met soorten. Dit is aanzienlijk meer dan de vier typische soortengroepen die voor aanleg van de Zandmotor werden gevonden. Ook de ontwikkeling van de bodemdiergemeenschap in zowel het suppletiegebied als de omliggende kustzones (ten noorden en ten zuiden) laten een invloed zien van de Zandmotor.

Eenmalig aanbrengen van een grote hoeveelheid zand

Een invloed van het eenmalig aanbrengen van de grote hoeveelheid zand (en daardoor minder vaak bedekking door van de bodemdieren) kon niet worden vastgesteld. Er werd juist een toename waargenomen van zowel de biomassa, diversiteit en het aantal soorten. Mogelijkerwijs is het effect van bedekking van bodemdieren door de

Zandmotor relatief beperkt gebleven omdat er op de ondiepe vooroever bodemdieren leven die aangepast zijn aan een hoge mate van sedimentdynamiek en de gesuppleerde vooroever daarom snel hebben weten te herkoloniseren. De verwachting is dat het bodemleven over een periode van enkele tientallen jaren, als de Zandmotor volledig is verspreid langs de kust, weer terug zal keren naar de oorspronkelijk situatie.

4.3 Natuur in de lagune en het duinmeer

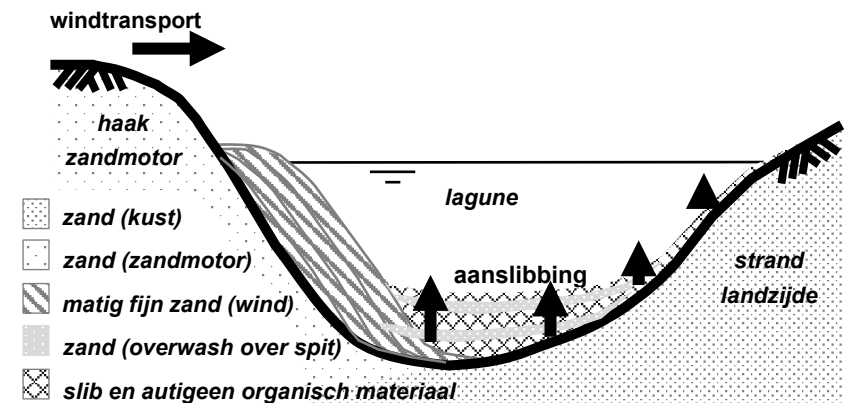
De lagune en het duinmeer zijn gebieden met rustig condities waar vogels kunnen verblijven en foerageren in het intergetijdengebied. Voor de lagune was er een meer expliciete verwachting dan voor het duinmeer. Het toegenomen areaal van intergetijdengebied aan de randen van de lagune van de Zandmotor zou zorgen voor gunstige omstandigheden voor bodemdieren, waardoor een leefomgeving zou kunnen ontstaan die lijkt op de platen van de Waddenzee (Figuur 4.6).



Figuur 4.6 Foto van het intergetijdengebied van de lagune in Augustus 2018 aan het eind van een zeer droge periode (foto : L. Van der Valk)

Ontwikkeling van de lagune

De lagune is door de tijd heen sterk van vorm veranderd (Van der Valk, 2019; Arens, 2021; Huisman et al., 2021). Dit is met name het gevolg van het inwaaien van fijn zand vanaf het strand, wat zorgt voor verondieping aan de westelijke zijde van het duinmeer en van de lagune. Ook is er veel slib vanuit zee naar binnen gespoeld via de toegangsheuvel, wat vooral op de bodem bezinkt. En er is zand over de landtong heen gespoeld tijdens stormen, wat incidenteel aan de noordzijde zorgt voor een zandige afzetting op de bodem van de lagune. In feite wordt de bodemgelaagdheid van de lagune gevormd door fijn sediment via de heuvel, fijn zand vanaf het strand en middelgrof zand vanaf de landtong (Figuur 4.7).



Figuur 4.7 Interpretatie van de verandering in bodemsamenstelling in de lagune (Interpretatie : B.J.A. Huisman en L. Van der Valk).

Door de accumulatie van fijner zand en slib is de bodemsamenstelling van de lagune aanzienlijk veranderd. Met name het fijnere sediment is relatief rijk aan organisch materiaal en kan als voedsel dienen voor de bodemdieren. Echter, de hoge gehalten aan organisch materiaal in de bodem, in combinatie met de geringe verversing van het water kan leiden tot zuurstofarme condities in en nabij de bodem wat weer

ongunstig is voor veel bodemdieren. In latere jaren zien we langs de randen van de lagune vaak ook algenresten aan het oppervlak én vlak onder het bodemoppervlak zwartgekleurd sediment, wat duidt op een beperkte hoeveelheid zuurstof. Dit komt door een gebrekkige uitwisseling met de zee via de relatief lange toegangseul en door het oxideren van organisch materiaal.

Om een beeld te krijgen van de ontwikkeling van de bodemdieren in de lagune zijn twee bemonsteringen uitgevoerd met een Van Veen happer in 2013 en 2015. Er werden onder andere muggenlarven en kleine wormpjes gevonden in de bodem van de diepere delen van de lagune, die duiden op relatief zuurstofarme condities.

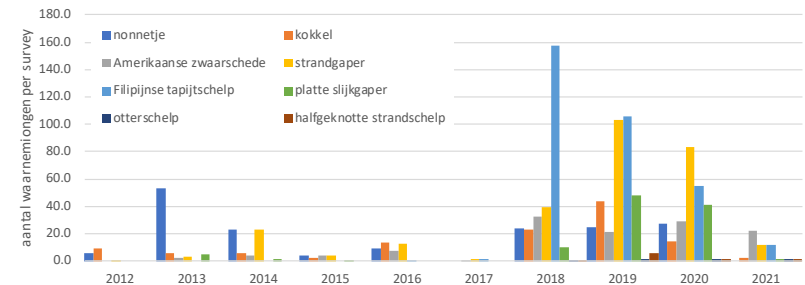


Figuur 4.8 Selectie van gevonden schelpen bij de lagune (links : kokkel, nonnetje, strandgaper en Amerikaanse zwaardschede; rechts : Filipijnse tapijtschelp vondstdatum maart 2018; foto : L. Van der Valk)

Daarnaast zijn er ook tellingen gedaan van aangespoelde tweekleppige schelpen die als indicatie ('proxy') gebruikt kunnen worden voor de bodemdieren in dit gebied (Van der Valk, 2019). Er zijn in de lagune andere soorten van de grotere schelpdieren gevonden dan op de buitenrand van de Zandmotor. De meest voorkomende schelpen die gevonden werden, en mogelijk opgegroeid zijn in de lagune, zijn de kokkel (*Cerastoderma edule*), het nonnetje (*Limecola balthica*), de strandgaper (*Mya arenaria*), de Amerikaanse zwaardschede (*Ensis leei*), de platte slijkgaper (*Scrobicularia plana*) en

de Filipijnse tapijtschelp (*Ruditapes philippinarum*; Figuur 4.8). Ook werden aangespoelde schelpen gevonden van soorten die waarschijnlijk niet in de lagune zijn gegroeid, maar tijdens het stormseizoen zijn ingespoeld vanaf zee, zoals de otterschelp (*Lutraria lutraria*) en de halfgeknotte strandschelp (*Spisula subtruncata*).

Door de tijd heen is er veel veranderd in de samenstelling van de gevonden schelpen (Figuur 4.9). Het aantal soorten aangespoelde schelpen is toegenomen van twee soorten in 2012 naar 7 soorten in 2019. Ook het aantal gevonden schelpen nam toe tot 2018, waarna het gevonden aantal weer minder werd.



Figuur 4.9 Gemiddeld aantal aangespoelde schelpen op de oever van de lagune per jaar per meetmoment (Van der Valk, 2021).

De kokkel en het nonnetje werden aanvankelijk ruim gevonden, maar werden in 2018 bijna niet gevonden. Van de strandgaper, de Filipijnse tapijtschelp en de Amerikaanse zwaardschede werden daarna de meest schelpen aangetroffen. Zowel in de lagune als de geul waren deze te vinden. Overigens komt de Amerikaanse zwaardschede ook voor op de ondiepe vooroever buiten de lagune. De bij de lagune aangetroffen schelpen zijn echter iets breder en donkerder dan in de vooroever in verband met de andere omgevingseigenschappen; ook is hun opperhuid vaak goed bewaard gebleven in tegenstelling tot die van exemplaren van de Noordzeekust: die is vaak heel snel afgesleten. De tegen golven beschermde lagune herbergt daarmee een heel andere

bodemdiergemeenschap dan we vinden in de intergetijdengebieden van de open kust.

De lagune heeft zich ontwikkeld van een beschut, niet opgespoten ondiep deel van de Noordzee tot een steeds sterker beschut gebied met beperkte instroming en uitstroming van zeewater. Dit komt omdat de getijdegeul steeds langer en ondieper is geworden. Op termijn zal alleen nog met springtij het vloedwater de lagune ingevoerd worden of zelfs alleen nog maar als overwash tijdens stormcondities. Dit resulteert in een lagune die veel gevoeliger is voor temperatuurschommelingen en aanvoer van nutriënten. In het zomerseizoen kunnen zo gemakkelijk zuurstofloze condities ontstaan. De condities in de lagune waren in sommige zomers (o.a. in 2018) daarom erg moeilijk voor bodemdieren. Er trad zelfs een periode op met stankoverlast door hoge concentraties organisch materiaal en laag zuurstofgehalte. Dit zal voortduren totdat de haak van de Zandmotor volledig geërodeerd zal zijn, waardoor een nieuwe opening zal ontstaan tussen de zee en de lagune.

Aan de westelijke rand van de lagune is er een relatief vlakke ondiepe zone ontstaan als gevolg van het inwaaien van zand door de wind vanaf het strand én de aanvoer van zand en slib vanaf zee. Deze natte strandvlakte, is een bijzonder element wat verder niet voorkomt op de Hollandse kust.

Ontwikkeling van het 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 groeide rond 2018 enkele jaren snavelruppia (*Ruppia maritima*), een zeldzame, kenmerkende plantensoort waar watervogels op af komen. Over de waterkwaliteit van het duinmeer is weinig bekend, maar verondersteld wordt dat deze goed was (zeker in vergelijking met de lagune) omdat deze gevuld wordt door regenwater. Het duinmeer wordt geleidelijk kleiner, en zal op termijn waarschijnlijk verdwijnen door het dichtwaaien met zand. Na het dichtwaaien kan dit deelgebied zich

echter ontwikkelen tot een strandvlakte van hoge kwaliteit. Op de Delflandse kust zijn het “duinmeer” en “lagune” nieuwe habitats. In algemene zin is er daarom sprake van een verbetering van de habitats waar ook hogere natuurwaarden kunnen ontstaan.

4.4 Duinvorming op het strand en op de duinversterking

Na aanleg van de Zandmotor werd een sterke ontwikkeling verwacht van vegetatie en duingroei op het nog kale strand en in de eerste duinenrij die is aangelegd bij de duinversterking in 2010. Deze duinontwikkeling op het strand en in de duinen begint bij de groei van vegetatie, waardoor gebiedjes ontstaan die zand invangen. Na verloop van tijd kunnen deze gebieden zich ontwikkelen tot rustige zones voor vogels. Een belangrijke vraag was in hoeverre zich natuurlijke en dynamische gebieden konden ontwikkelen. Ook de invloed van recreatie op de natuurontwikkeling is een aandachtspunt voor het strand van de Zandmotor.

Vegetatiegroei en duintjes op de Zandmotor

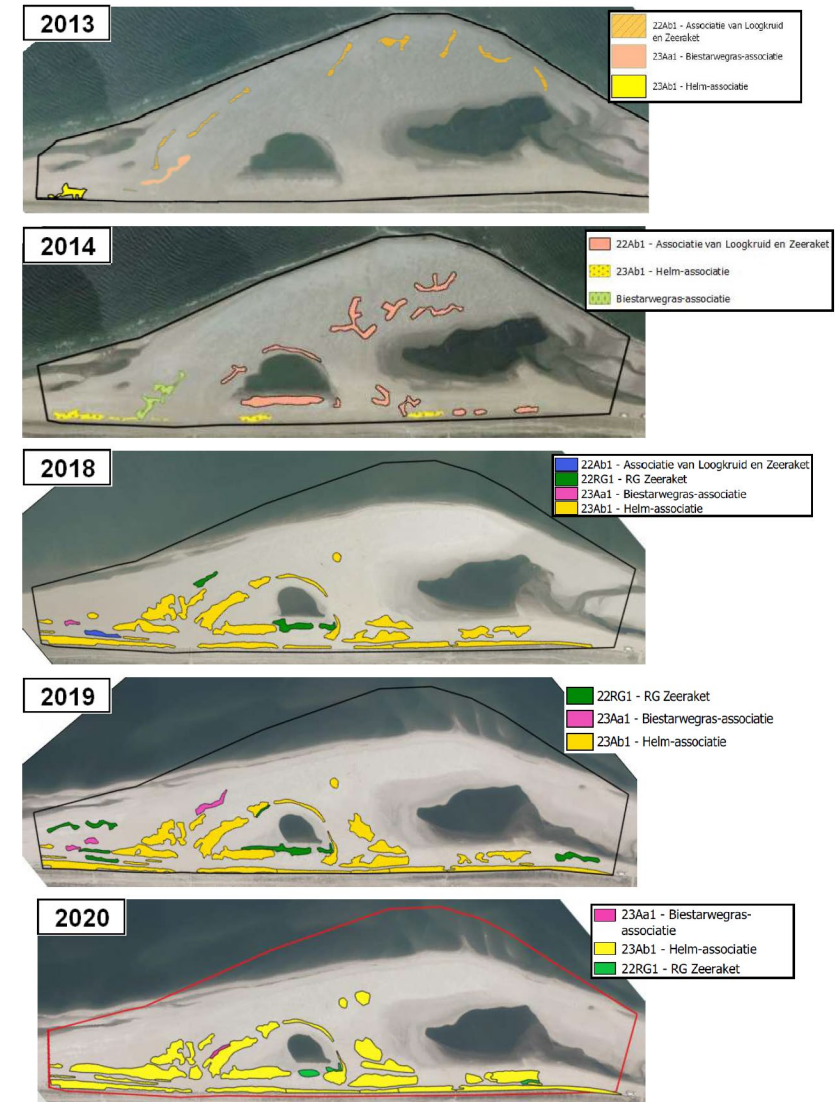
Begroeiing op de Zandmotor is verwacht en ook wenselijk, omdat hierdoor een veel gevarieerder omgeving ontstaat, met ruimte voor vogels en andere dieren. Plantjes werden al na enkele jaren waargenomen op de Zandmotor (Van Puijenbroek, 2017; Vertegaal, 2021). Op het strand en de haak werd in de eerste drie jaren met name zeeraket (*Cakile maritima*) waargenomen, terwijl biestarwegras (*Elytrigia juncea*) en helmgras (*Ammophila arenaria*) zich vooral uitzaaiden langs de zeereep én aan de zuidzijde van de Zandmotor gevonden werden (Figuur 4.10). Bij de Zandmotor trad helm vaak ook op als duinvormer, wat opvallend is omdat het klassieke beeld is dat biestarwegras zich eerder op het strand vestigt dan helmgras, omdat het zouttoleranter is. De vegetatie zorgt voor een luwte waardoor zand wordt ingevangen, wat een stimulans is voor verdere groei van het helmgras. Ook zandhaver (*Leymus arenarius*) is aanwezig op de Zandmotor en treedt op als duinvormer. Op deze wijze ontstonden

nieuwe duintjes met een hoogte van enkele meters (zogenaamde 'embryonale duinen') op de Zandmotor.



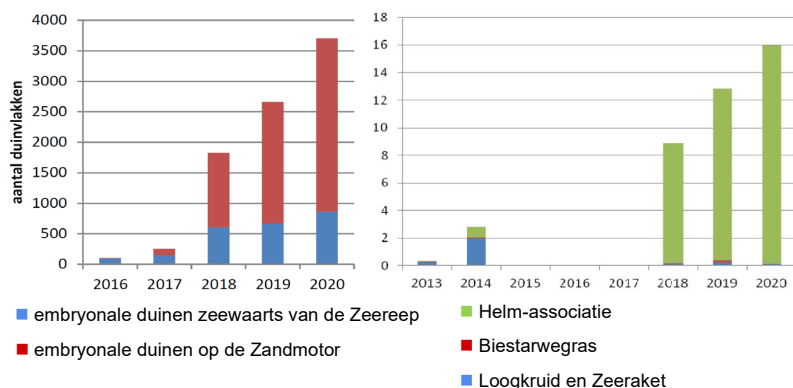
Figuur 4.10 Embryonale duingroei aan zuidzijde van de Zandmotor (linksboven), een typische pioniersplant als zeeraket (linksonder) en biestarwegras (rechts).

Door de hoge mate van dynamiek (Arens, 2021) en de droogte van de afgelopen jaren is het aantal soorten planten, mossen en korstmossen op de Zandmotor nog vrij gering. Niet voor alle vegetatie is de hoge dynamiek op de Zandmotor dus een voordeel. Qua zeldzame (op de rode lijst staande) soorten vegetatie is vooral de blauwe zeedistel (*Eryngium maritimum*) sterk opgekomen op de Zandmotor. Van andere rode lijst soorten is nog niet veel ontwikkeling te zien.



Figuur 4.11 Overzicht van de vegetatie op de Zandmotor en de daarmee samenhangende duingroei in gebieden met helmvegetatie (Vertegaal, 2021).

De ontwikkeling van nieuwe duinen op en rond de Zandmotor ging aanvankelijk traag (Figuur 4.12). Sinds 2016 is de duinontwikkeling duidelijk versneld. In 2018 was er circa 6 hectare embryonaal duin, en dat is opgelopen naar 13 hectare in 2020.



Figuur 4.12 Aantal duinvlakken van de embryonale duinen sinds 2016 (links) en aangetroffen vegetatie op de Zandmotor (rechts) (Arens, 2021).

In eerste instantie groeiden de duintjes vooral in de zone direct voor de zeereep. Vanaf 2016 zijn er echter ook steeds meer nieuwe embryonale duinen ontstaan op de Zandmotor zelf. Deze liggen enigszins verspreid op de aansluiting van de haak met de kust én rond het duinmeer. Door de tijd heen groeien de vele individuele duintjes aan elkaar tot grotere complexen van lage duintjes die inmiddels deels als ‘Witte duinen’ kunnen worden gekarakteriseerd (H2120 uit de Natura 2000 classificatie). Het witte duin is wat betreft het voorkomen van typische soorten goed ontwikkeld, planten die worden gevonden zijn de akkermelkdistel (*Sonchus arvensis*), blauwe zeedistel (*Eryngium maritimum*), zeewolfsmelk (*Euphorbia paralias*) en soms ook Noordse helm (*Ammophila baltica*).

De zone met nieuwe duintjes is ‘bruto’ enkele honderden meters breed (parallel aan de zeereep). Daarbinnen liggen complexen van aan elkaar gegroeide duinen die tientallen meters breed zijn. De duintjes

hebben hoogteverschillen tot circa tweeënhalve meter boven het omliggende strand. 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.

In het midden en noorden van de Zandmotor is minder duinontwikkeling opgetreden. De oorzaak hiervan is dat de Zandmotor hier relatief hoog aangelegd is én dat grote delen van het strand in de luwte van het duinmeer en de lagune liggen, waardoor de aanvoer van zand beperkt is. Dit in combinatie met de grote hoeveelheid schelpen in het sediment zorgt (al 10 jaar) voor een zeer onnatuurlijk ogend oppervlak, waar de noodzakelijke dynamiek voor het omwoelen en sorteren van zand ontbreekt (Arens, 2021). Door de voortgaande erosie zijn sommige duintjes, die in 2013 aan de zeewaartse zijde van de haak lagen, in zee verdwenen. En ook ontstonden hier steilranden die een blokkade vormden voor zand dat door golven en wind vanuit het intergetijdengebied naar de Zandmotor wordt getransporteerd (zie paragraaf 3.2.6). Aan de zeezijde zijn nauwelijks duintjes opgebouwd.

Enige duinvorming treedt in het middendeel van de Zandmotor op rond het duinmeer op de aansluiting met de kust. En ook op de kust landwaarts van de lagune én noordelijk richting Kijkduin ontstaat in de laatste jaren kleinschalige duingroei. 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 zeereep van de kustversterking 2008-2009 sterk wordt beperkt. Ook oogt de vegetatie (helm en biestarwegras) relatief ijl en soms weinig vitaal, wat mogelijk samenhangt met de droge groeiseizoenen in 2019 en 2020.

De begrenzing van de duincomplexen werd zeker in de beginjaren sterk beïnvloed door spoorvorming, waardoor de nieuwe duinen als rechte langwerpige stroken parallel aan de zeereep lagen (zie ook paragraaf 5.3.2 over recreatiebeheer). Naar schatting is door gebruik van voertuigen en door betreding door bezoekers te voet (en te paard)

zeker 3 tot 5 hectare potentiële duinvegetatie niet tot ontwikkeling gekomen. Door de tijd heen zijn er rond het duinmeer en aan de zuidelijke aansluiting van de Zandmotor met de kust meer natuurlijke duincomplexen ontstaan. Deze grotere en hogere duincomplexen worden minder beïnvloed door betreden en berijden dan in voorgaande jaren waardoor de duinen hier natuurlijker ogen dan voorheen, maar de begrenzing is vaak nog rechtlijnig.



Figuur 4.13 Rijsporen bij de strandopgang van het Schelpenpad.

Bij de strandopgangen blijft echter ook na 10 jaar nog steeds een invloed te zien van de rijsporen van auto's en betreding door bezoekers bij de strandslag van het Schelpenpad (Figuur 4.13). Ook binnen de wel begroeide delen zijn tal van smalle paadjes en kale plekken aanwezig die invloed hebben op de ontwikkeling en de kwaliteit van de vegetatie. Opgemerkt moet worden dat het recreatieonderzoek laat zien dat de strandopgang van het Schelpenpad relatief gezien nog weinig gebruikt wordt in vergelijking met andere strandslagen in de buurt (o.a. Molenpad en Strandslagen 1 en 2; zie paragraaf 5.3.2), maar dat er desondanks toch een effect te zien is. Een gevolg van de berijding is dat twee zones met duintjes ontstaan zijn, waarvan de eerste tegen de zeereep aanligt en de tweede een groep duintjes op

de Zandmotor is die gescheiden wordt door het rijspoor. Dit had eigenlijk één aaneengesloten gebied moeten worden. Naast betreding en berijding werd de vegetatieontwikkeling (met name in de beginjaren) ook beïnvloedt door de afvalinzameling van de gemeente Den Haag. Dit gebeurt met trekkers die het strand omploegen, wat niet bevorderlijk is voor de groei van prille vegetatie.

Om het effect van betreding en berijding te beperken is later een deel van het gebied met vegetatie afgebakend met rasters. De effectiviteit hiervan is beperkt, omdat juist gebieden werden afgezet waar de eerste moeilijke stap in de ontwikkeling van vegetatie al wel was gezet. Indien het wenselijk wordt geacht om duingroei meer te stimuleren, dan is het beter om de hele kleine duintjes met prille vegetatie af te zetten. Door te zoneren kunnen bepaalde gebieden ontoegankelijk gemaakt worden voor 4WD's.

Al met al zorgt de wijze van aanleg van de Zandmotor uiteindelijk voor een gebied met een relatief natuurlijk en dynamisch karakter. Zowel het duin als het strand is meer gevarieerd geworden door de groei van embryonale duinen (H2110).

Ontwikkeling van de duinversterking

De natuur heeft de eerste duinenrij, die als onderdeel van de 'Zwakke schakels' duinversterking in 2010 is aangelegd, in de eerste jaren na aanleg al aanzienlijk veranderd (Arens, 2021; Vertegaal, 2021). Bij aanleg zijn helmgrasbundels geplant op een relatief glad duinprofiel. Deze vegetatie is daarna snel gaan groeien. Door de wind aangevoerd zand is ingevangen in de vegetatie waardoor de eerste duinenrij aanzienlijk in de hoogte is gegroeid en zeewaarts uitgebouwd. Zo is een natuurlijker duin ontstaan met hoogteverschillen tussen gebieden met en zonder helmgras (Figuur 4.14). Vooral de duinen op de zuidelijke aansluiting van de Zandmotor met de kust zijn sterk gegroeid. Aan de vegetatie valt te zien dat de meest vitale en meest overstoven helm zich aan de zuidzijde van het Zandmotor gebied bevindt. De gemiddelde snelheid van de ontwikkeling van de duinen (volumetoename per strekkende meter kust) was over de gehele

Zandmotor gezien echter niet veel groter dan voor de duinen op de omliggende Delflandse kustgedeeltes (Huisman et al., 2021). De reden hiervoor is dat zand wordt afgevangen in de lagune en het duinmeer, waardoor de duingroei op het centrale en noordelijke deel van de Zandmotor wordt vertraagd. Op dit centrale deel van de zeereep groeit inmiddels ook meer duindoornstruweel (*Hippophae rhamnoides*; H2160), wat in de zeereep zuidelijk en noordelijk van de Zandmotor nog duidelijk minder het geval is. Verondersteld wordt dat de sneller opvolgen van pioniersvegetatie door meer ontwikkelde vegetatie (ook wel 'successie' genoemd) te maken heeft met de afscherming van de zee door de Zandmotor, waardoor deze gebieden minder zand en zoutspray ontvangen dan de noordelijk en zuidelijk gelegen delen van de duinversterking waar vooral witte duinen (H2120) te vinden zijn.

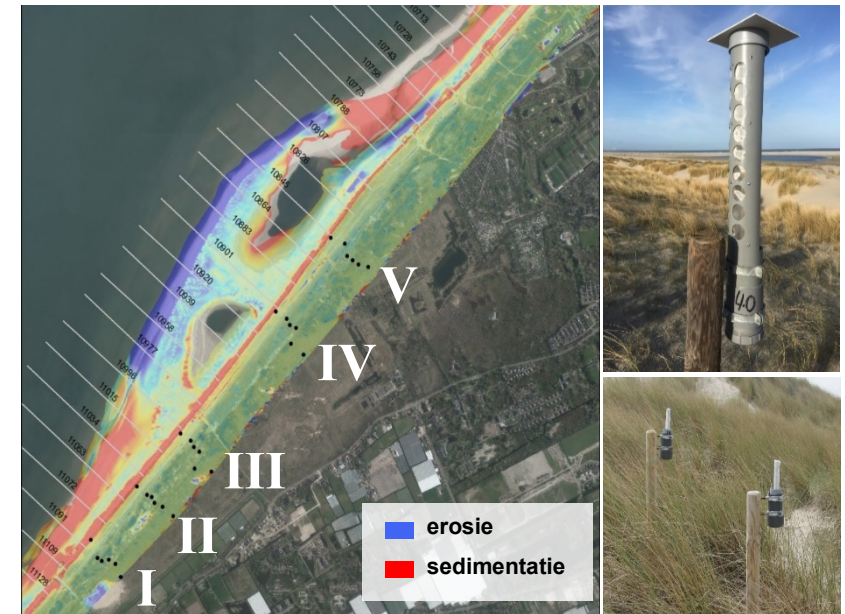


Figuur 4.14 Verandering in natuurlijkheid van de kustversterking aan de zuidzijde van de Zandmotor op een moment kort na aanleg (links) en na 8 jaar (rechts). Foto's : Bas Arens.

4.5 Duinen van Solleveld

Landwaarts van de Zandmotor liggen de duinen van Solleveld (net achter de duinversterking van Delfland), wat een beschermd Natura 2000 gebied is. De dynamiek en kwaliteit van dit duingebied moeten behouden blijven. Een aandachtspunt is het duindoornstruweel (*Hippophae rhamnoides*) in de duinen van Solleveld, een toename van dit type natuurgebied wordt niet wenselijk geacht. Mochten er toch

veranderingen optreden dan kan er met beheer ingegrepen worden in de duinen van Solleveld om te voorkomen dat ze te veel dichtgroeien. De verwachting was vooraf dat er als gevolg van de Zandmotor meer zand zou instuiven in dit gebied, maar dat de inwaai van zout zou afnemen. Wat de invloed hiervan is op de duinnatuur van Solleveld is hier onderzocht.



Figuur 4.15 Meetlocaties van overstuiving van zand (rechtsboven) en zoutinwaai (rechtsonder) op de transecten I t/m V in combinatie met de erosie en sedimentatie (links). Foto's: Bas Arens. (Arens, 2021)

Om vast te stellen hoe de omstandigheden daadwerkelijk zijn veranderd als gevolg van de Zandmotor zijn er zand- en zoutvangers geplaatst op vijf kustdwarse transecten in de duinen (Arens, 2021). Opgemerkt moet worden dat het eerste meetpunt zich in de eerste duinenrij (of duinversterking 2010) bevindt, en daarom geen deel

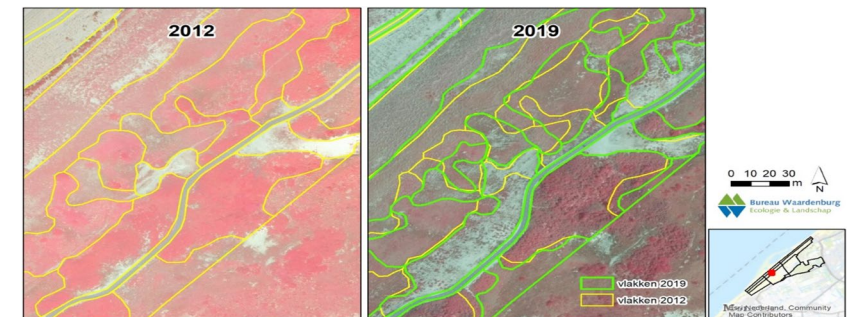
uitmaakt van de duinen van Solleveld. Deze metingen laten zien dat de instuiving van zand (overstuiving) én het inwaaien van zout (zoutspray) in de duinversterking aanzienlijk hoger is dan in de achterliggende duinen. De duinversterking vangt dus een groot deel van het zand en zout af. Als gevolg hiervan is de overstuiving van zand en inwaai van zout in de achterliggende duinen van Solleveld meestal klein, maar wel meetbaar. Over het algemeen is de overstuiving van zand én zoutspray iets hoger bij de zuidelijke raaien op de aansluiting van de Zandmotor met de bestaande kust (transect I t/m III) dan op het centrale en noordelijke deel. Vooral aan de noordzijde van de Zandmotor (landwaarts van de lagune; transect V) is de doorstuiving laag. De beperkte overstuiving van zand naar het centrale en noordelijke deel is vooral het gevolg van de lagune en het duinmeer, en in mindere mate ook gerelateerd aan de het invangen van zand door opkomende embryonale vegetatie op de Zandmotor.

Tijdens stormen kan er overigens incidenteel sprake zijn van aanzienlijke zandoverstuiving en inwaai van zout naar de duinen van Solleveld (Arens, 2021). Zo is er in januari 2018 een storm geweest waarbij een aanzienlijke hoeveelheid zand is doorgestuifd naar de duinen van Solleveld. Gesteld kan worden dat de aanstuiving richting de duinversterking vooral plaatsvindt tijdens weerscondities met gemiddelde tot middelzware windsnelheid (windkracht 5 t/m 7) terwijl de doorstuiving naar de bestaande duinen bepaald wordt door de extreme gebeurtenissen. Eén storm kan het grootste deel bijdragen van het totale transport over enkele jaren. Deze incidentele doorstuif van zand is ecologisch belangrijk voor de duinen achter de zeereep.

Voor het vaststellen van veranderingen in de vegetatie is gebruik gemaakt van een combinatie van veldgegevens en luchtfoto's (Loermans et al., 2020; Vertegaal, 2021). De luchtfoto's zijn gebruikt om de contouren vast te stellen van gebieden met een vergelijkbaar type vegetatie, waarna deze gebieden vegetatiekundig zijn onderzocht middels een veldbezoek. Hieruit is een zogenaamde vegetatiekartering voortgekomen (Figuur 4.16). Deze kartering laat zien dat er netto geen grote veranderingen ontstaan zijn in de arealen van de verschillende

habitattypen in de duinen (zoals witte duinen, grijze duinen en duindoornstruweel). Een link tussen de zand- en zoutspray en de vegetatie is daarom niet te leggen voor de duinen van Solleveld. Er zijn veel maatregelen genomen om 'verstruwing' tegen te gaan, zoals het ruimen van Duindoorn, begrazing. Gesteld kan worden dat het met behulp van actief beheer mogelijk is om de natuurwaarden te behouden in de duinen van Solleveld.

Ook heeft het Hoogheemraadschap Delfland kerfjes aangebracht in een groot deel van de duinen noordelijk van de Zandmotor tot aan Kijkduin, die van invloed kunnen zijn op de dynamiek van de duinen. De eerste keer zijn de kerfjes echter veel te kleinschalig aangelegd, waardoor deze geen effect hadden. In 2020 zijn de kerven wel grootschaliger aangelegd, wat waarschijnlijk zal leiden tot een aanzienlijkere invloed op de dynamiek, maar de ontwikkeling daarvan is op dit moment nog niet bekend.



Figuur 4.16 Analyse van de verandering van habitattypen op basis van luchtfoto's (Loermans et al., 2020)

4.6 Vogels, vissen en zeezoogdieren

Een belangrijke eigenschap van de Zandmotor is de ruimte die geboden wordt aan vogels en zeezoogdieren om te rusten én aan

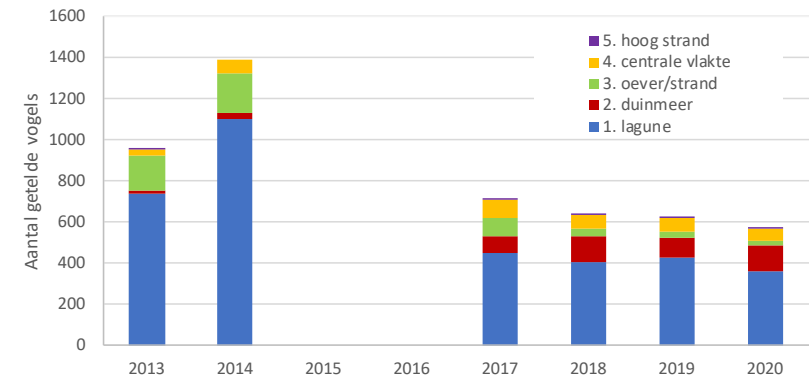
vissen om op te groeien. Dit is echter geen expliciete doelstelling geweest van de Zandmotor. Door de relatief grote afstand van de waterlijn naar de haak komen er minder bezoekers waardoor ook de verstoring van de vogels en zeezoogdieren minder zou moeten zijn. Een ander ontwerp-element was de lagune, waarvan de verwachting is dat deze een rustige omgeving zou creëren voor vissen.

Vogels

De betekenis van het intergetijdengebied en de ondiepe kustzone voor kustvogels lijkt te zijn toegenomen in de eerste jaren na aanleg van de Zandmotor (jaren 2013 en 2014 in Figuur 4.17; Vertegaal, 2021), alhoewel het in absolute zin om een beperkte verandering gaat. Bij de lagune werden de meeste vogels waargenomen. Het aantal vogels op het hoog strand was relatief beperkt.

De Zandmotor is van belang voor zeevogels, in het bijzonder voor de zilvermeeuw die veel voorkomt (Figuur 4.18). Vanaf 2017 is het aantal vogels (met name de meeuwensoorten) aanzienlijk afgenomen, met de *kokmeeuw* als sterkste 'daler'. Ook de *aalscholver* werd aanzienlijk minder waargenomen. Het aantal *sterns* (visdief en grote stern) en *sholeksters* bleef ongeveer gelijk of nam licht af. In de recente jaren lijkt alleen het aantal *drieteenstrandlopers* te zijn toegenomen.

Ten opzichte van het strand bij Noordwijk zijn er duidelijke verschillen in de vogelpopulatie (Figuur 4.18), maar het totaal aantal getelde vogels is redelijk vergelijkbaar. Bij de Zandmotor zijn met name de kokmeeuwen, aalscholvers, visdief en grote sterns meer talrijk, terwijl de drieteenstrandloper en zilvermeeuw minder vaak worden waargenomen dan bij Noordwijk. De relatieve rust ten opzichte van een regulier strand maakt de Zandmotor meer geschikt voor aalscholvers dan de andere stranden, wat een meerwaarde is van de Zandmotor.



Figuur 4.17 Overzicht van aantal getelde niet-broedvogels op de Zandmotor.

Het kleinere aantal drieteenstrandlopers heeft mogelijk te maken met het relatief nieuwe zand bij de Zandmotor waarin de bodemdierpopulatie, waarop ze foerageren, nog niet geheel ontwikkeld is. De toename van deze soort in de tijd zou kunnen samenhangen met de ontwikkeling van voedselbeschikbaarheid op het strand van de Zandmotor.

Broedvogels daarentegen maken nog vrijwel geen gebruik van de Zandmotor als plaats om een nest te maken. Pas in 2017 werd een eerste broedende vogel waargenomen (de *bontbekplevier*). In later jaren broedden meerdere paren *bontbekplevieren* die ook enkele jongen hebben groot gebracht. Dit is te danken aan de toegenomen schuilmogelijkheden tussen de zich uitbreidende helmbegroeiing van de embryonale duinen. De Zandmotor wordt dankzij toenemende begroeiing wel steeds geschikter voor broedvogels. Als de duintjes

groter worden en meer begroeid raken wordt het gebied echter weer minder geschikt voor strandbroedvogels als bontbekplevier. Wel zullen er zich dan (buiten)duinsoorten als graspieper kunnen gaan vestigen, waarvan in 2019 de eerste waarnemingen zijn gedaan.

Soort	Noordwijk (paal 71-81)			Sand Motor			
	1998-2007	2007-2011	1998-2011	2013-2014	2017-2020	2013-2020	
aalscholver	Phalacrocoracidae	?	?	?	40.6	4.9	22.8
bontbekplevier	Charadrius hiaticula	0.09	0.07	0.08	0.3	0.6	0.4
bonte strandloper	Calidris alpina	0.06	0.06	0.06	0.7	0.5	0.6
drieteenstrandloper	Calidris alba	20.1	12.2	16.2	3	6	4.5
fuut	Podiceps cristatus	?	?	?	1.8	2	1.9
grote mantelmeeuw	Larus marinus	3.4	5.2	4.3	7.4	5.4	6.4
grote stern	Thalasseus sandvicensis	0.9	1.1	1	5.8	6.2	6
kauw	Corvus monedula	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3
kleine mantelmeeuw	Larus fuscus	18.5	18.1	18.3	16.1	22.4	19.3
kokmeeuw	Chroicocephalus	19.6	9.7	14.6	108.7	9.7	59.2
scholekster	Haematopus ostralegus	1.8	2.8	2.3	4.4	3.3	3.9
steenloper	Arenaria interpres	0.5	0.11	0.31	0	0	0
stormmeeuw	Larus canus	15.9	17.2	16.6	15.1	14.2	14.6
visdief	Sterna hirundo	2.3	1.6	2	14	7.8	10.9
zilverbmeeuw	Larus argentatus	136.8	113.6	125.2	33.8	27.5	30.6
zwarte kraai	Corvus corone	2.3	2.6	2.5	2.9	3.8	3.4
totaal		223	185	204	262.2	117.6	189.9

Figuur 4.18 Vergelijking van het aantal getelde niet-broedvogels per kilometer strandlengte op de Zandmotor met waarnemingen op het strand van Noordwijk (Vertegaal, 2021).

De oorzaken voor het door te tijd heen teruglopen van de aantallen (niet-broed)vogels zijn niet met zekerheid vast te stellen. Een aspect wat opvalt is dat er met name rond de lagune minder vogels worden waargenomen, wat te maken kan hebben met de verandering van de morfologie van het gebied. Verondersteld wordt verder dat de verstoring door bezoekers (met honden) ook bijgedragen zal hebben aan de teruggang in het aantal soorten. Uit tellingen blijkt dat er een toename is van 15 tot 20% van het aantal bezoekers door de jaren heen. In combinatie met een door erosie afnemend areaal van de haak resulteert dit in een hogere bezoekerdichtheid op de Zandmotor.

Vissen

De ontwikkeling van de visstand in de vooroever van de Zandmotor en in de lagune is gemonitord in de eerste jaren na aanleg om de mogelijke functie als kinderkamer voor juveniele vis te onderzoeken (Wijsman et al., 2015). Echter de variatie in de vangsten was erg groot waardoor het moeilijk was om harde conclusies te trekken. Er is daarom besloten om het programma in 2015 te beëindigen. 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 positieve indicator gezien kunnen worden voor de aanwezigheid van juveniele vissen.

Zeezoogdieren

In de eerste jaren na aanleg van de Zandmotor zijn er waarnemingen gedaan van zeezoogdieren, zoals zeehonden (Wijsman et al., 2015). De aantallen zeehonden waren echter zeer beperkt. De betekenis van de Zandmotor voor deze soortgroep wijkt daarom niet of nauwelijks af van stranden elders langs de Hollandse kust. Essentieel is dat er ondanks de relatieve rust toch nog teveel bezoekers zijn om een veilige omgeving te scheppen voor zeezoogdieren.

4.7 Evaluatie natuurontwikkeling

De meerwaarde van de Zandmotor voor natuurontwikkeling wordt afzonderlijk geëvalueerd voor 1) bodemdieren in de vooroever (o.a. invloed van eenmalig neerleggen van een suppleties), 2) vegetatie en duingroei op de Zandmotor en 3) bodemdieren en vogels bij de lagune en het duinmeer. Opgemerkt moet worden dat een, soms kortere, beantwoording op de sub-vragen te vinden is in Appendix A.

Bodemdieren op de vooroever

Voor de ontwikkelingen van bodemdieren in de vooroever spitst de vraag zich toe op de invloed van het eenmalig neerleggen van een grootschalige suppletie en de invloed van de Zandmotor op de diversiteit van de bodemdieregemeenschappen.

- *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?*

Na aanleg van de Zandmotor werden in de vooroever meer soorten bodemdieren waargenomen én ook in grotere aantallen dan voor aanleg. De veranderingen in de omgevingscondities (golven, stromingen, bodemhoogteverandering en sediment) hebben gezorgd voor een vergroting van de diversiteit van leefgebieden. Met name de relatief luwere zone net noordelijk van de Zandmotor blijkt in elke meting een gebied te zijn met grote aantallen bodemdieren, wat een sterke indicatie is dat er sprake is van een effect door de Zandmotor wat niet bij een reguliere suppletie te verwachten is.

Door, zoals bij de Zandmotor, minder frequent te suppleren is er minder vaak bedekking van de bodemdieren. Het is echter lastig om dit effect goed te scheiden van andere omgevingsaspecten die zijn beïnvloed, zoals de golfforcering, getijstroming en sedimentsamenstelling. Mogelijk is dit effect klein omdat er op de ondiepe vooroever bodemdieren leven die aangepast zijn aan een hoge mate van sedimentdynamiek en daardoor de gesuppleerde vooroever snel hebben weten te herkoloniseren. Als de Zandmotor volledig is verspreid zal het bodemleven naar verwachting zijn teruggekeerd naar de oorspronkelijk situatie.

Vegetatie en duingroei op de Zandmotor

De manier waarop nieuwe duinen zich kunnen ontwikkelen op de Zandmotor is een tweede aandachtspunt. Het is niet alleen de vraag welke natuur zich op het strand ontwikkelt, maar ook in hoeverre de dynamische wijze van aanleg (met veranderend kustlandschap) leidt tot een hogere kwaliteit én of recreatiebeheer hieraan bijdraagt.

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

Op de Zandmotor heeft de groei van vegetatie en embryonale duinen gezorgd voor een landschap met een grote mate van natuurlijkheid, wat elders niet voorkomt langs de Hollandse kust. Op de Zandmotor is een groot areaal embryonale duinen ontstaan (H2110). Op sommige plaatsen zijn al duincomplexen ontstaan die als witte duinen (H2120) aangemerkt kunnen worden. Op de Zandmotor werd ook blauwe zeedistel waargenomen, wat een zeldzame plantensoort is. Andere rode lijstsoorten werden niet gevonden.

De dynamische wijze van aanleg pakt vooral ten zuiden van de Zandmotor goed uit op de aansluiting met de kust. Hier vindt aangroei plaats van het strand wat vervolgens, via winddynamiek, tot duinvorming leidt. De vegetatieontwikkeling kwam wel pas na 2016 echt op gang, wat trager is dan verwacht. Daarna was sprake van een snelle groei van vegetatie en duinen.

In het centrale en noordelijke deel van de Zandmotor hebben het duinmeer en de lagune een remmend effect gehad op de vegetatie en natuurlijke duinaangroei, omdat zand hier werd ingevangen. Ook de aanvoer van zand vanaf de haak was beperkter dan gedacht, omdat zich hier een laag van grof zand en schelpen vormde. De haak is zo hoog aangelegd dat er zelfs tijdens stormen met hoogwater geen golfwerking of golfoploop is in dit gebied, waardoor de opgebouwde schelpenlaag niet wordt opgeruimd. Een ontwerp met een lagere kruin zou hebben gezorgd voor meer dynamiek op de haak.

De berijding en het schoonmaken van het strand hebben er ook voor gezorgd dat vegetatie in de eerste jaren moeilijk kon overleven. De rijroutes zijn ook nu nog terug te zien in de ruimtelijke verdeling van de embryonale duinen (o.a. bij de strandopgang van het Schelpenpad en de scheiding tussen zeereepduintjes en zandmotorduintjes). Van recreatiebeheer, ten behoeve van vegetatie- en duingroei, is nauwelijks sprake geweest. De verwachting is dat er beduidend meer oppervlak

jonge duintjes zouden zijn ontstaan als er maatregelen waren ingesteld zoals het beperken van de rijroutes van voertuigen (met rasters of via bebording) of het geleiden van bezoekers vanaf het Schelpenpad naar het strand met afgerasterde looproutes.

Ontwikkeling van de natuur van lagune en duinmeer

Voor de lagune en het duinmeer wordt geëvalueerd wat de ontwikkelingen waren van de sedimentsamenstelling en ecologie (o.a. bodemdieren en vegetatie). Ook is van belang wat voor invloed dit heeft op de vogels, vissen en zeezoogdieren in deze gebieden.

- *EF 3-1b: Hoe ontwikkelt de tijdelijke nieuwe natuur in het intergetijdengebied en de lagune van de Zandmotor zich? (exclusief de beschrijving voor de vooroever)*

De aanleg van de Zandmotor, en daarmee samenhangende verandering in golven, stromingen en sedimentsamenstelling, heeft geleid tot een toename van de diversiteit van leefgebieden in de vooroever en de lagune. In de relatief afgeschermdede lagune waait fijn zand in aan de westzijde, terwijl er slib en organisch materiaal sedimenteert op de bodem. Sediment in de toegangseu is relatief grof.

Op de oevers van de lagune werden door de tijd heen schelpen van steeds meer soorten gevonden. Het aantal soorten nam toe van één naar maximaal 7 soorten. Er werden schelpen gevonden die op de stranden van de Hollandse kust verder niet voorkomen. Daarnaast zijn muggenlarven en kleine wormpjes gevonden in de diepere bodem van de lagune. In 2020 lijkt het aantal gedaald, wat verklaard wordt vanuit de afnemende uitwisseling van water met de zee. De gebrekkige in- en uitstroom van water is een aandachtspunt in de lagune, omdat dit in latere jaren heeft geleid tot een gebrekkige waterkwaliteit (zuurstofarme condities). In het duinmeer is onderwatervegetatie ontstaan (*snavelruppia*). Op termijn kunnen de lagune en het duinmeer echter veranderen in waardevolle natte strandvlaktes. Dit is echter nog niet het geval

en kan nog de nodige tijd kosten, in verband met de diepte van het water in de lagune en het duinmeer.

Op basis van waarnemingen van vogels op de Zandmotor is vastgesteld dat er grote aantallen niet-broedvogels voorkomen bij de Zandmotor. Dat geldt in het bijzonder voor de zilver- en kokmeeuw die veel werden waargenomen. Vooral de aanwezigheid van de aalscholver, de grote stern, de visdief en de grote mantelmeeuw waren van meerwaarde, omdat deze elders minder voorkomen. Opvallend was wel dat er in 2013 en 2014 meer vogels werden waargenomen dan in latere jaren. Verondersteld wordt dat de teruggang van het aantal vogels in recente jaren samenhangt met de afname van het oppervlak van de haak, waardoor het oppervlak wat slecht bereikbaar is voor bezoekers aanzienlijk kleiner is geworden. Voor steltlopers is nog geen duidelijke meerwaarde te zien ten opzichte van andere stranden, alhoewel het aantal steltlopers wel toeneemt in de tijd, wat waarschijnlijk het gevolg is van een toename van bodemleven in het intergetijdengebied. Voor broedvogels was de meerwaarde van de Zandmotor beperkt, omdat het om een klein aantal vogels ging. Kustbroedvogels als de strand- en bontbekplevier, de dwergstern en de scholekster komen tot op heden nauwelijks tot broeden op de Zandmotor, omdat ze erg gevoelig zijn voor verstoring door bezoekers (en loslopende honden).

Voor vissen en zeezoogdieren is de invloed van de Zandmotor niet aantoonbaar in verband met de grote variatie in de vangsten (vis) en beperkte aantallen (zeezoogdieren) die voorkomen op de Zandmotor. Ondanks de relatieve rust op de Zandmotor is er toch nog teveel bezoek om een veilige omgeving te scheppen voor zeezoogdieren.

5 Beleving, waardering, beheer en omgevingseffecten

5.1 Verwachtingen en doelen

De Zandmotor is ontworpen om naast kustonderhoud en natuur ook een bijdrage te leveren aan recreatie, waarvoor de beleving van de Zandmotor door recreanten belangrijk is. Een vraag is hoe de beleving en waardering van de kust van Holland en Scheveningen is veranderd door de Zandmotor (evaluatievraag EF3-2). Daarbij wordt ook gekeken naar de lessen voor zwemveiligheid (EF2-1b) en de maatschappelijk meerwaarde van de Zandmotor (voor kunst en cultuur of archeologie/paleontologie). De maatschappelijke functie is van belang voor een breed beeld van de waardering van het gebied (EF2-1c).

Bij aanvang van het project Zandmotor zijn de beheerdoelstellingen gedefinieerd door de Provincie Zuid-Holland en Rijkswaterstaat. In algemene zin is de lijn dat er niet te veel wordt ingevuld door de beheerders, tenzij dat nodig is voor veiligheid, natuurbescherming van de duinen of grondwaterkwaliteit. De Provincie Zuid-Holland heeft een halfjaarlijks beheerdersoverleg ingesteld waarin eventuele onverwachte ontwikkelingen kunnen worden besproken. De beheerdoelstellingen hebben betrekking op :

- I. recreatieveiligheid (EF4-1)
- II. invloed van recreatie op natuurontwikkeling (EF4-2)
- III. grondwaterstand in de duinen van Solleveld (EF4-3)
- IV. effecten op zanddoorstuiving en inwaai van zout in de duinen van Solleveld (EF4-4)
- V. effecten op de natte infrastructuur (o.a. vaargeulen) (EF4-5)

Voor de aanleg was de verwachting dat de toename van de ruimte op de Zandmotor mogelijkheden zou gaan bieden voor recreatie. Daarbij

werd gedacht aan wandelaars, ruiters, vissers en zoonanbidders. Zorgen waren er wel over de veiligheid voor recreanten, waarbij gedacht werd aan de risico's op muistromen (zeewaarts gerichte stromingen) en drijfzand. Hier is in een vroeg stadium aandacht aan besteedt door de Provincie Zuid-Holland en de Reddingsbrigade. Ook werd verwacht dat recreatiebeheer een invloed zou kunnen hebben op natuurontwikkeling van vegetatie en nieuwe duintjes op het strand.

Daarnaast werden effecten verwacht op grondwater, bestaande duinen en infrastructuur. Als gevolg van de aanleg van de Zandmotor zou het grondwater in het achterliggende duingebied kunnen stijgen. Mogelijk zou in de buitenste duinen geïnfilteerd regenwater via een duingebied met puin richting het waterwingebied kunnen stromen.

Er werden ook effecten verwacht op de omgeving, zoals een mogelijke invloed op de natuur van de bestaande duinen van Solleveld. Hier zou het inwaaien van zout vanaf zee mogelijk afnemen, en werd een toename verwacht van de instuiving van zout. Wat de effecten daarvan zouden zijn op de vegetatie van het Natura 2000 gebied van de duinen van Solleveld was niet bekend. Dit is daarom niet meegenomen in de vergunning. Een belangrijke vraag was of eventuele effecten kunnen worden gecompenseerd met beheermaatregelen.

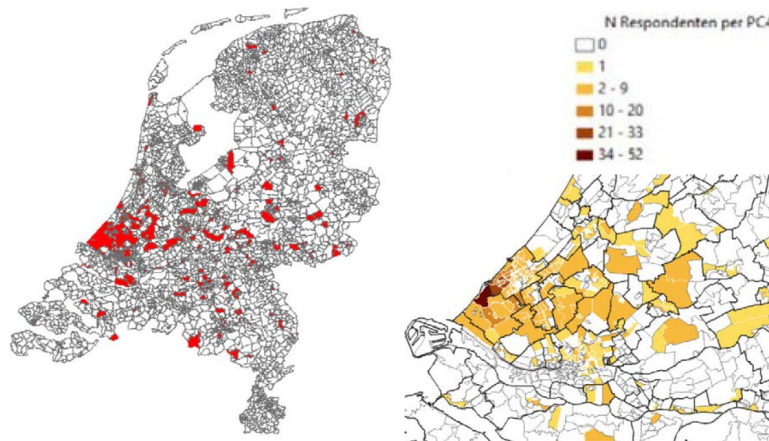
In de beheerafspraken werden ook eventuele invloeden op de vaargeulen van Rotterdam en Scheveningen meegenomen. Ook bevindt zich een uitlaatgemaal van het Hoogheemraadschap Delfland zuidelijk van de Zandmotor bij Ter Heijde. Er wordt een grote hoeveelheid zand gesuppleerd, en het is daarom van belang te weten waar dit zand naartoe gaat.

Dit hoofdstuk beschrijft eerst de beleving en waardering van de Zandmotor voor de recreatieve en maatschappelijke functies (paragraaf 5.2). Daarna worden de beheervragen besproken in paragraaf 5.3. Tot slot gaat paragraaf 5.4 concreet in op de beantwoording van de evaluatievragen.

5.2 Beleving en waardering van de Zandmotor

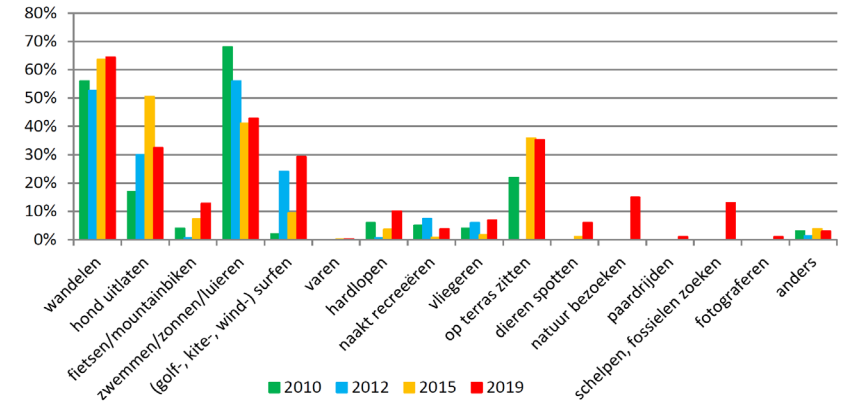
5.2.1 Recreatie

De Zandmotor heeft zich ontwikkeld tot een aantrekkelijk gebied voor met name wandelaars, badgasten en kitesurfers. Bewoners uit de omgeving (Delfland) komen graag naar de Zandmotor om te recreëren, maar er komen ook mensen uit de rest van het land en uit België en Duitsland (Figuur 5.1). De waardering van bezoekers voor de Zandmotor is hoog (gemiddeld een 8) blijkt uit een onderzoek door de WUR (2020) dat is uitgevoerd in opdracht van de Provincie Zuid-Holland. Gewaardeerd werden onder andere het schone strand, de rust en ruimte, het kitesurfgebied, de landschapsvormgeving, de ruimte voor natuur en de voorzieningen.



Figuur 5.1 Woonplaatsen van respondenten van recreatie onderzoek uit 2020 (WUR, 2020).

Relatief gezien waarderen bezoekers de Zandmotor met een betere beoordeling dan het strand van Kijkduin. Relatief gezien werd er door de bezoeker van de Zandmotor een betere beoordeling gegeven van de Zandmotor dan door bezoekers op het strand van Kijkduin.



Figuur 5.2 Activiteiten die door geënquêteerden worden ondernomen (WUR, 2020).

De meeste bezoekers van de Zandmotor komen om te wandelen of hardlopen, al dan niet met hond, of om daarbij ook een terras te bezoeken (Figuur 5.2). Ook geven veel mensen aan dat ze komen om te zwemmen of zonnen. Het aantal zwemmers is echter kleiner dan voor andere stranden, waarschijnlijk omdat het ver lopen is naar de kustlijn vanaf de parkeerplaats. Het meest in het oog springend op de Zandmotor is het kitesurfen. De Zandmotor heeft zich echt als hotspot kunnen ontwikkelen voor kitesurfen. Een geschikte plek was eerder nog niet aanwezig op de Delflandse kust. Dit is vooral te danken aan de lagune waarin de wind vrij spelt heeft maar golfjes relatief klein zijn. Deze lagune is tien jaar lang ideaal geweest voor de kite-surfers, maar inmiddels is de lagune wel aan het dichtslibben waardoor de aantrekkelijkheid voor kitesurfers afneemt.

Daarnaast zijn er ook recreatievormen als natuurbeleving (vogels kijken), paardrijden en vissen die in mindere mate ook plaats vinden op de Zandmotor. Zij hebben vooral baat bij de ruimte die de Zandmotor heeft. Ook het landschap en de natuurwaarde worden gewaardeerd door bezoekers en verbeteren zo de aantrekkelijkheid

van de regio Den Haag/Westland. De natuurbeleving zal waarschijnlijk nog toenemen door de doorgaande groei van natuurlijke duinen en vegetatie. Gesteld kan worden dat het ontwerp van de Zandmotor een belangrijke invloed heeft gehad op het recreatieve gebruik (o.a. voor kite-surfers en wandelaars). Afhankelijk van de inrichting zullen verschillende groepen recreanten meer of minder bediend worden.

De Zandmotor levert, faciliteert en verbetert recreatie en toerisme op de Delflandse kust, maar dit lijkt niet te hebben geleid tot meer bezoekers op dit deel van de kust. De kwantificeerbare economische meerwaarde van de Zandmotor vanuit recreatie is echter beperkt. Alleen het kitesurfen is direct toe te schrijven aan de Zandmotor, en dan vooral de economische bijdrage van bezoekers die van ver kwamen om te kitesurfen bij de Zandmotor. Onzeker is echter hoe lang het kitesurfen kan worden bestendig aangezien de lagune langzaam opvult met zand. De Zandmotor levert geen aantoonbare bijdrage aan het werk- en ondernemingsklimaat in de regio die voor meer aantrekkingskracht op ondernemers en expats heeft gezorgd. Ook voor woningzoekenden is de Zandmotor geen vestigingsfactor geweest, waar de kust in zijn algemeenheid dat wel is.

5.2.2 Kunst, Cultuur en Archeologie

In de ontwerpfase is bewust opengelaten welke activiteiten er plaats zouden moeten vinden op de extra ruimte die dankzij de Zandmotor beschikbaar is gekomen voor de kust van Zuid-Holland. En dit heeft geresulteerd in een heel verrassende invulling van mogelijkheden die de Zandmotor biedt (Vreugdenhil et al., 2021). In feite gaat het hier om het tegenovergestelde van beheer, namelijk om spontane activiteit. Op de Zandmotor heeft zich een netwerk ontwikkeld van kunstenaars en amateur fossielzoekers.

De Zandmotor biedt niet alleen ruimte aan recreatie en natuur, maar wordt ook gebruikt als canvas door kunstenaars. Een voorbeeld is Kunstenaar Nico Laan die uitzonderlijk grote zandtekeningen maakt die alleen vanuit de lucht volledig te zien zijn. De afbeeldingen zijn abstract maar sluiten toch aan op de natuurlijke dynamiek het gebied

(Figuur 5.3). Actief op de Zandmotor is ook het kunstenaarscollectief 'De Satellietgroep'. Middels expedities laten ze belangstellenden de dynamiek van de kust ervaren (Figuur 5.4).



Figuur 5.3 Kunstwerken op het strand van de Zandmotor (Laan, 2019 en 2020)



Figuur 5.4 Culturele activiteiten bij de de Zandmotor (Satellietgroep, 2015a/b).

Op de Zandmotor worden ook allerlei vondsten gedaan door amateur archeologen en fossielzoekers (Niekus et al., 2019). De winlocatie van het zand op zee was vroeger een bewoond deel van de monding van de Rijn en Maas (Eurogeulgebied). Deze rivieren hebben heel veel menselijk en dierlijk materiaal meegenomen en begraven onder een dikke laag zand en klei. Daarom vinden we voorwerpen van de vroegere bewoners van dit gebied én prehistorische dieren. Deze vondsten helpen het verleden en de natuur beter te begrijpen. Een

bijzondere vondst is een 50.000 jaar oude vuursteen met berkenpek gemaakt door Neanderthalers (Figuur 5.5).



Figuur 5.5 Vuursteen met berkenpek (Rijksmuseum Museum voor Oudheidkunde / Luc Armkretz)

Aansturing van maatschappelijke processen

Opvallend is dat al de meeste maatschappelijke ontwikkelingen min of meer spontaan zijn ontstaan. Er hoefde dus niet persé iets georganiseerd te worden door de overheid voordat er ontwikkelingen op gang kwamen. Er is energie bij maatschappelijke partijen en burgers om activiteiten te organiseren en te ondernemen. Dat geldt met name voor dichtbevolkte goed toegankelijke gebieden in de Randstad waar allerlei 'institutionele structuren' (o.a. musea) zijn die amateur onderzoekers ondersteunen.

Een wetenschappelijke analyse op basis van aansturingmodellen voor beleid en beheer van nieuwe gebieden leerde dat de beheerder een bewuste keuze kan maken om maatschappelijke ontwikkelingen in meer of mindere mate van tevoren te sturen. Meer of minder aansturen geeft niet altijd hetzelfde resultaat, maar ze kunnen beide tot meerwaarde leiden. Het behalen van maatschappelijke meerwaarde is afhankelijk van zowel fysieke als niet-fysieke factoren, waar tot op zekere hoogte in te sturen is in het plannen, ontwerpen en beheren. Bovenal is het van belang om vooraf een strategie te ontwikkelen die tijdens het project gevolgd kan worden. Daarbij is het belangrijk om de maatschappelijke context, zoals actoren en

institutionele setting (o.a. netwerken en subsidies), te kennen. Keuzes en afspraken dienen geborgd te zijn bij de verschillende partijen zodat duidelijk is wie welke rol heeft, en er een gedeeld en blijvend eigenaarschap en verantwoordelijkheid ontstaat.

5.3 Beheer en omgevingseffecten

5.3.1 Recreatieveiligheid

Voor recreatieveiligheid zijn afspraken gemaakt tussen de provincie Zuid-Holland, veiligheidsregio Haaglanden, gemeente Westland, gemeente Den Haag en de vrijwillige reddingsbrigades van 's-Gravenzande, Monster en Den Haag. Deze afspraken zijn opgenomen in de samenwerkingsovereenkomst Strand- en zwemveiligheid pilot Zandmotor. Gedacht kan worden aan strandbewaking (inclusief zoneringen door bijvoorbeeld een zwembod). Als de veiligheid dat vereist, dan zouden bepaalde gebieden kunnen worden afgesloten. Indien nodig kunnen er ook bijzondere beheermaatregelen worden getroffen, bijvoorbeeld in het geval van de vorming van steile kliffen of als er drijfzand zou ontstaan.

Zwemveiligheid

Er zijn drie natuurlijke processen die van belang zijn voor de zwemveiligheid bij de Zandmotor, namelijk 1) de grootschalige stromingspatronen (zoals de versnelling van de getijstroming en circulaties; zie Paragraaf 3.2.3), 2) het vullen en ledigen van de lagune (Paragraaf 3.2.5); en 3) muistromen door golfopzet (Paragraaf 3.2.4). De potentiële invloed van deze processen op de zwemveiligheid wordt hierna achtereenvolgens besproken.

De versnelling van de getijstroming bij de Zandmotor en de grootschalige circulatie ('neer') op met name de noordflank tijdens vloed kunnen zorgen voor complexe stromingscondities op de kop van de Zandmotor (Shore, 2019). Als een recreant hier gaat zwemmen op een moment dat getij maximaal is, dan zou deze circulatie zwemmers richting zee kunnen verplaatsen. In de praktijk wordt het effect hiervan

op de zwemveiligheid 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 kustversterking van de Zandmotor door natuurlijke processen.

Het initiële ontwerp van de Zandmotor had (met name in de eerste twee jaar) als risico dat er relatief grote stroomsnelheden konden voorkomen in de toegangsgedul van de lagune. Hierdoor was er een kans dat badgasten, die de toegangsgedul tijdens vloed overstaken, zich tijdens opkomend tij afgesloten waanden van de kust. Opgemerkt moet worden dat de getijstrooming in deze gevallen niet naar zee toe was, waardoor de veiligheidsrisico's ook voor deze situatie beperkt waren. Door de tijd heen zijn de stroomsnelheden in de toegangsgedul afgenomen door verzanding van de lagune en het verlengen van deze gul. Met betrekking tot het ontwerp dient opgemerkt te worden dat een toegangsgedul een natuurlijke ontwikkeling is die niet gestuurd kan worden, waardoor alleen een ontwerp zonder lagune dit risico volledig kan wegnemen.

De zwemveiligheidsrisico's door zeewaartse stromingen als gevolg van golfwerking (ook wel 'muistromen') lijken op de Zandmotor minder vaak voor te komen dan op de omliggende kust, waar dit met name bij strekdammen kan voorkomen (Shore, 2019). Deze omstandigheden komen bovendien vaak voor tijdens slechte weersomstandigheden waarop er bijna geen strandgebruikers zullen zijn (Radermacher et al., 2018).

Samenvattend kan gesteld worden dat het zwemveiligheidsrisico beperkt is gebleven omdat strandgebruikers zich vaak op de minder risicovolle flanken van de Zandmotor bevonden. De zwemveiligheid wordt namelijk bepaald door zowel de (potentieel) gevaarlijke situaties als het aantal strandgebruikers (Figuur 5.6). Veel risico's gerelateerd aan zwemveiligheid (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.



Figuur 5.6 Overzicht van de locatie van risicovolle stromingen, strandgebruikers en hieruit voortkomend risico voor goede en slechte weersomstandigheden (aangepaste versie van Radermacher, et al., 2018; vertaald naar het Nederlands)

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 sneller anticiperen op gevaarlijke situaties, met als doel om gevaarlijke situaties te voorkomen.

Drijfzand

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 had 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. Mogelijk treedt drijfzand niet op als gevolg van de manier van aanleg die is toegepast door de baggeraar of was het toegepaste sediment zodanig dat er minder makkelijk drijfzand kon ontstaan.

Kliffen

Op het strand van de haak van de Zandmotor kunnen kliffen (of steilranden) ontstaan met een hoogte van enkele decimeters tot meters. Deze zouden in principe gevaarlijk kunnen zijn voor strandgebruikers. Met name als het gaat om gemotoriseerd verkeer dat met enige snelheid over de Zandmotor rijdt. In de praktijk zijn er echter geen gevallen bekend dat er door klifvorming een probleem is ontstaan. Dit heeft mogelijk te maken met het feit dat de kliffen parallel aan het strand liggen op het erosieve stuk van de haak liggen waar relatief weinig bezoekers zijn. Ook zijn er flinke periodes waarin er geen of slechts kleine kliffen zijn.

5.3.2 Invloed recreatie op natuur

Qua beheer is er voor gekozen om niet teveel te sturen op het precieze gebruik van de Zandmotor door recreanten. Zo zijn er geen gebieden afgezet die niet toegankelijk zijn voor mensen én is er alleen horeca bij de strandopgang. Dit heeft ertoe geleid dat het hele gebied wordt gebruikt voor recreatie. Aandachtspunt is dat er een invloed kan zijn van de recreatie op de natuur. Op basis van de bevindingen bij de Zandmotor worden daarbij de invloeden uitgelicht, die al eerder zijn benoemd, namelijk de berijding, het schoonmaken van het strand en de betreding door bezoekers (zie paragraaf 4.4).

Er blijkt een duidelijke invloed te zijn van berijding en het schoonmaken van het strand op de vorming van embryonale duinen. 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". Ruimtelijk

gezien neemt de invloed van autoverkeer door de tijd heen wel af; zones met meer substantiële duinvorming raken onbegaanbaar voor auto's, waardoor het verkeer is teruggedrongen tot een kleiner aantal routes/zandbanen. De invloed van betreding door bezoekers op de vorming van embryonale duinen lijkt ook af te nemen omdat de duintjes al een zekere grootte hebben bereikt. Desalniettemin is het opvallend dat er een duidelijke invloed waarneembaar is van looproutes van recreanten bij het Schelpenpad, terwijl dit relatief gezien een minder gebruikte strandslag is dan de strandslagen die aan de noordzijde van de Zandmotor liggen (Figuur 5.7; WUR, 2020).



Figuur 5.7 Strandslagen die toegang geven tot de Zandmotor (WUR, 2020).

De verstoring van broedvogels wordt als aanzienlijk ingeschat omdat bezoekers (met honden) het hele jaar door vrijwel overal komen. Dankzij de toenemende begroeiing is het effect echter iets minder groot dan in de eerste vijf jaar, toen op de Zandmotor geen enkele vogel tot broeden kwam. In algemene zin is een moeilijk bereikbaar gebied (met grote kustdwarse afstand tot de haak) eigenlijk heel gunstig voor rustende vogels.

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. Indien het wenselijk wordt geacht dat er meer ruimte komt voor vogels, dan zouden er gedurende het broedseizoen bepaalde delen van de Zandmotor afgesloten kunnen worden voor bezoekers.

5.3.3 Grondwaterkwaliteit in de duinen

De provincie Zuid-Holland en Dunea hebben een convenant ondertekend waarin is vastgelegd welke maatregelen uitgevoerd worden om eventuele negatieve effecten van de Zandmotor op de natuur en drinkwaterwinning in Solleveld te compenseren.

Het aanleggen van de Zandmotor heeft in potentie een invloed op het grondwater (Huizer et al., 2016; Pantelli, 2017). Het niveau hiervan zou kunnen stijgen, omdat het water minder snel kan afvloeien naar de zee. Een dergelijke verhoging van de grondwaterstand werd alleen niet heel wenselijk geacht vanwege de drinkwaterwinning in het gebied. Begin 20^e eeuw is er mogelijk puin in de zeewaartse duinen gestort, wat bij een verhoogde grondwaterstand verontreinigingen zou kunnen afgeven aan het grondwater. Het zou onwenselijk zijn als dit puin invloed heeft op de kwaliteit van het grondwater in de waterwinputten in de duinen. Om er voor te zorgen dat het grondwater niet te hoog komt te staan is het duinmeer aangelegd. Het was de bedoeling om eerst te kijken wat er met de waterstand zou gebeuren, maar door zorgen over de situatie werd er al snel voor gekozen om een extra maatregel te nemen. Dit betrof het slaan van extra drainage putten op het strand direct zeewaartse van de eerste duinenrij. Door de onttrekkingen werd er actief voor gezorgd dat de waterstand niet kon stijgen waardoor er uiteindelijk geen verhoging van de waterstand waar te nemen was. Eventueel grondwater dat door de puinduinen stroomt wordt op deze wijze afgevoerd richting zee.

Overigens is het gebruik maken van het duinmeer om de grondwaterstand te verlagen heel specifiek voor de Zandmotor. Op andere locaties kan een verhoging van de grondwaterstand juist heel gunstig zijn. Hierdoor kan verdroging van duingebieden worden

verminderd of juist een vergroting van de zoetwatervoorraad in de duinen mogelijk gemaakt worden.

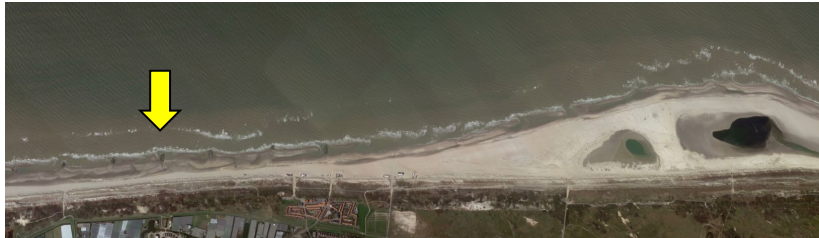
5.3.4 Natuurbeheer duinen van Solleveld

Vanuit de milieueffectstudie is de vraag naar voren gekomen of er een negatieve invloed kan zijn van de Zandmotor op de natuur van de duinen van Solleveld én of deze invloed kan worden voorkomen met beheer. Verwachte werd voor aanleg dat de hoeveelheid zand die doorstuift naar de duinen van Solleveld toe zou nemen, terwijl de inwaai van zout juist zou afnemen. Als gevolg daarvan zou er een versnelde successie kunnen optreden met meer groei van duindoornstruwelen, wat onwenselijk werd geacht. In de duinen vond echter al voor de aanleg van de Zandmotor beheer plaats om de successie van witte en grijze duinen naar duindoornstruwelen te compenseren. Daarbij wordt de vegetatie in bepaalde gebieden verwijderd. De vraag spitst zich er daarom op toe of het al bestaande beheer in de duinen afdoende is om eventuele invloeden van de Zandmotor op te vangen.

De monitoring in de duinen van Solleveld laat zien dat er dankzij het actieve beheer geen wezenlijke veranderingen zijn opgetreden van de arealen van de habitattypen (o.a. duindoorn, witte en grijze duinen; Paragraaf 4.4). De invloed van het ruimen van Duindoorn, begrazing, aanleg van kleine kerven door het Hoogheemraadschap van Delfland is blijkbaar groot genoeg om ook een eventuele invloed van de Zandmotor op successie in de duinen van Solleveld te mitigeren. Gesteld kan worden dat het met behulp van actief beheer mogelijk is om de natuurwaarden te behouden in de duinen van Solleveld.

5.3.5 Effecten op natte infrastructuur

Voor aanleg van de Zandmotor was niet bekend of er een invloed kon zijn op het baggerwerk in de toegangseulen van de havens van Rotterdam en Scheveningen en het uitlaatpunt van het spuigemaal van Delfland (J.J.J.M. van den Burg gemaal; Figuur 5.8).



Figuur 5.8 Locatie van het J.J.J.M. van den Burg gemaal ten opzichte van de Zandmotor.

Een invloed van de Zandmotor op de verzanding van de havengeul van Rotterdam is niet waarschijnlijk, aangezien de geul wordt afgeschermd door een zeer lange golfbreker en het transport overwegend in noordelijke richting staat (Leijnse & Huisman, 2019).

Bij de vaargeul van Scheveningen wordt op basis van berekeningen wel een invloed ingeschat op de aanzanding, maar deze is veel kleiner dan het effect van de duinversterking Zwakke-schakels uit 2009 (Leijnse & Huisman, 2019). De jaarlijkse variaties in golfcondities heeft echter een grotere invloed op de aanzanding. Zo kunnen er jaren zijn met relatief veel wind en stormen uit het westen en zuidwesten, wat zorgt voor veel aanzanding bij de vaargeul van Scheveningen.

Bij de uitlaat van het J.J.J.M. van der Burg gemaal blijkt de Zandmotor nog weinig effect te hebben (Leijnse & Huisman, 2019). De kust is hier wel vooruit gegaan, maar dat komt met name door de duinversterking Zwakke-schakels uit 2009 en door de vooroeveraanplantingen zuidelijk van het gemaal (bij Hoek van Holland, 's Gravenzande of Ter Heijde). Het wordt niet verwacht dat de Zandmotor ter plaatse van het gemaal voor veel extra uitbouw van de kust zal zorgen, maar eerder dat dit dan zal komen door eventuele toekomstige aanplantingen bij Hoek van Holland, 's Gravenzande of Ter Heijde.

5.4 Evaluatie beleving, waardering, beheer en omgevingseffecten

Deze paragraaf beantwoordt de vragen over beleving en waardering, beheer en omgevingseffecten van de Zandmotor. Opgemerkt moet worden dat een beantwoording op de sub-vragen te vinden is in Appendix A.

Beleving en waardering

De evaluatie van de beleving en waardering van de Zandmotor richt zich op het recreatieve gebruik en de maatschappelijke functies zoals kunst, cultuur en archeologie.

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

De Zandmotor is aantrekkelijk voor wandelaars, badgasten en kitesurfers en wordt door hen positief beleefd. Het aantal badgasten is wel minder dan op andere nabije stranden. De afstand tot de kustlijn speelt hier waarschijnlijk een rol. Het meest in het oog springend is het kitesurfen, waarvoor de Zandmotor een unieke plek biedt. Het ontwerp van de Zandmotor heeft hierop een belangrijke invloed gehad. Het kitesurfen zal in de toekomst vermoedelijk gaan afnemen door het verzanden van de lagune. De natuurbeleving zal waarschijnlijk toenemen door de natuurlijke aangroei van duinen. Een aantoonbare bijdrage aan het werk- en ondernemingsklimaat in de regio (meer aantrekkingskracht op ondernemers en expats) is er niet. Ook voor woningzoekenden lijkt de Zandmotor geen extra vestigingsfactor.

- *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?*

Het ontwerp leidde (met name in de eerste twee jaar) tot een risico op grote stroomsnelheden in de toegangsgemaal van de lagune. Dit

was onveilig voor badgasten die de geul tijdens vloed overstaken. Zij konden de lagune in worden gespoeld. Andere risicofactoren waren aanwezig bij de haak van de Zandmotor (o.a. sterke stromingen), maar zorgden niet voor problemen omdat er op die locaties en momenten weinig strandgebruikers zijn. De les is om bij het ontwerp goed te letten op het kunnen samengaan van risicovolle situaties (zoals muistromen, sterke stroming door een 'neer' of vloedstroom in een toegangsheul) en het aantal te verwachten strandgebruikers.

- *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).*
Het gebruik van de Zandmotor en de ontwikkeling daarvan leren dat de locatie en het ontwerp een grote invloed hebben op het gebruik van het gebied. Het is echter ook, in belangrijke mate, de wijze van beheren die het gebruik van de Zandmotor bepaalt. De les is vanaf het begin een strategie te hebben voor het beheer. Een denkmodel waarbij de gewenste mate van aansturing/regie per gebruiksfunctie bepaald wordt helpt hierbij.

Beheer van de Zandmotor

Het beheer wordt geëvalueerd voor de vijf beheervragen die zich richten op recreatieveiligheid, recreatiebeheer, grondwater, effecten op de duinen van Solleveld en eventuele effecten op natte infrastructuur.

- *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?*
De zwemveiligheid bij de Zandmotor was beheersbaar. Muistromen en versnellingen van het getij hebben niet geleid tot incidenten. Deze muistromen komen bij de Zandmotor niet vaker voor dan op de omliggende kust. Wel werden in de eerste jaren

een aantal badgasten op de landtong verrast door het hoogwater, waarna ze de toegangsheul niet meer eenvoudig konden oversteken. Op de zeewaartse rand van de haak van de Zandmotor ontstonden soms kliffen/steilranden, maar het risico was in de praktijk niet groot omdat hier weinig mensen komen. Drijfzand heeft geen problemen veroorzaakt. De waterkwaliteit van de lagune is achteruit gegaan als gevolg van de steeds kleiner wordende uitwisseling van water met de zee via de geul. Dit leverde geen gezondheidsproblemen op. Aanslibbing en ontwikkeling van vegetatie heeft de aantrekkelijkheid van de lagune niet beïnvloed.

- *EF4-2: In welke mate zijn recreatie- en natuurdoelstellingen op en rond de Zandmotor te verenigen?*
De Zandmotor is een plaats waar zowel recreatie als natuur een plek hebben gekregen. Er is daarbij wel sprake van een invloed van recreatie op de natuur. Berijding met voertuigen, het schoonmaken van het strand en betreding door bezoekers hebben een duidelijke invloed op de duinontwikkeling. Hierdoor zijn er parallel aan de duinvoet en bij strandopgangen brede onbegroeide rijstroken ontstaan. De invloed van recreatief gebruik op de vegetatie heeft de ontwikkeling van de embryonale duinen vertraagd. Er is geen gericht onderzoek gedaan naar de invloed van recreatiezonering en beheer, maar het is wel aannemelijk dat de aantallen verstoringgevoelige vogels en broedvogels hoger zouden zijn geweest zonder recreatief (mede)gebruik.
- *EF4-3: Kunnen ongewenste invloeden van de Zandmotor op het grondwater worden voorkomen?*
Aannemelijk is dat drainagebuizen voorkwamen dat de grondwaterstand in de bestaande duinen is verhoogd als gevolg van de Zandmotor. Hierdoor konden eventuele verontreinigingen en zout grondwater zich niet verspreiden richting de vakken waar waterwinning plaatsvindt. Op de Zandmotor heeft inmiddels een verzoeting van het grondwater plaats gevonden.

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

De zanddynamiek is voor alle meetlocaties in de duinen van Solleveld relatief laag en ook de inwaai van zout is klein. De dichte aanplanting van de Duinversterking vangt het grootste deel van het aanstuivende zand vanaf de Zandmotor in. Alleen tijdens stormen lijkt er nog zand over te stuiven naar de duinen van Solleveld. Om deze reden is extra beheer nodig via het verwijderen van duindoorn, weghalen/steken van helm en de aanleg van kerven. Deze beheermaatregelen zorgen voor een tijdelijke verhoging van de dynamiek voor de duur van enkele maanden. De invloed van zandinstuiving en zoutinwaai is overigens niet waarneembaar in de vegetatie van de duinen van Solleveld, omdat er veel beheermaatregelen zijn genomen die een eventueel effect teniet doen.

De Zandmotor heeft echter wel een zichtbaar effect op de eerste duinenrij (de duinversterking). Er werd meer verstruweling waargenomen in het deel van de duinversterking dat achter de Zandmotor ligt als gevolg van een vermindering van zandoverstuiving en zoutinwaai. Net noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor was er duidelijk minder successie. Deze veranderingen zijn echter niet zodanig dat ze tot verschuivingen in de vegetatie hebben geleid in het achterliggende duingebied van Solleveld.

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

Na de aanleg van de Zandmotor is de aanzanding van de havengeul van Rotterdam niet veranderd en is de aanzanding van de vaargeul van Scheveningen heel beperkt toegenomen. De invloed van de kustversterking Delflandse kust was aanwezig, maar een invloed van de Zandmotor nog zeer beperkt. In jaren met relatief veel wind en stormen uit het westen en zuidwesten is

er de meeste aanzanding. Bij de uitlaat van het Van der Burg gemaal heeft de Zandmotor geen significante invloed. De duinen en het strand zijn hier wel zeewaarts verplaatst, maar dit kwam door de aanleg van de duinversterking in 2010.

6 Kennisontwikkeling

6.1 Verwachtingen en doelen

In Nederland is onderzoek naar de kust al eeuwen van groot belang. Het begrijpen van de krachten van de natuur is nodig om de kustverdedigingen effectief te beheren. Dankzij kennis van de te verwachten stormen kunnen we bijvoorbeeld een goede inschatting maken van de benodigde volumes zand in de duinen, en weten we ook hoe dit zand efficiënt aangebracht kan worden. Er komen echter nieuwe vragen op ons af over de invloed van versnelde zeespiegelstijging en de natuurlijkheid van grootschalige suppleties. Kennis van de kust is noodzakelijk om te kunnen anticiperen op de toekomstige uitdagingen die op ons afkomen. De toepassing van de Zandmotor is in feite ook een nieuw kennishoofdstuk.

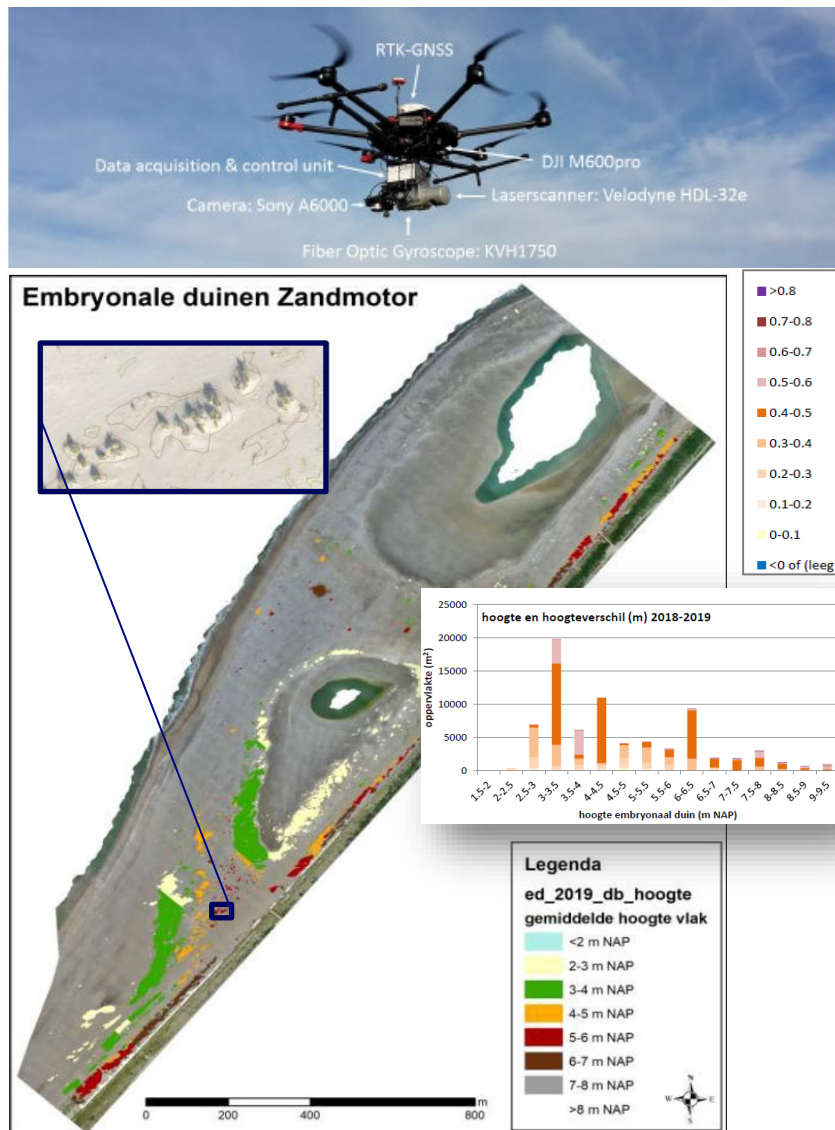
In Nederland zijn er door de tijd heen verschillende kennisprojecten geweest, waarin een versnelling heeft plaats gevonden van de kennisontwikkeling. Gedacht kan worden aan het project Kustgenese in de jaren '80, wat de basis vormde voor het besluit in 1990 om de kustlijn te handhaven. Deze projecten stempelden daarna de werkwijze van de waterbouwsector in Nederland, en leverden zo ook een indirecte bijdrage aan de economie. De Zandmotor is een 'laboratorium' voor kustonderhoud. De centrale vraag in dit hoofdstuk gaat over de spin-off van de Zandmotor voor kennis en innovatie (EF2-3).

De verwachting was voor de aanleg van de Zandmotor dat er binnen kennisprojecten breder toepasbare kennis zou worden gecreëerd (EF2-3a), dat er innovatie zou ontstaan die in binnen- en buitenland bruikbaar zou zijn (EF2-3b) en dat er kennisverspreiding zou plaatsvinden waardoor de kennis op lange termijn geborgd is (EF2-3c).

6.2 Generieke kennis

Onderzoek over de Zandmotor richtte zich met name op de bodemontwikkeling van de duinen, het strand en de brandingszone. Zowel onder als boven water wordt onderzoek gedaan naar de invloed van de Zandmotor op de verplaatsing van zand, veiligheid voor bezoekers en bewoners, ecologische effecten en bestuurskundige processen. Op deze wijze is generieke kennis gecreëerd over de Zandmotor op het gebied van hydrodynamica, morfologie, sediment, ecologie, grondwater, duinvorming en besluitvorming.

De kennis en modellen die ontwikkeld zijn voor de Zandmotor kunnen ook toepasbaar gemaakt worden voor andere typen suppleties en andere kusten (Huizer et al., 2016; Stronkhorst et al., 2017). Op basis van de geobserveerde ontwikkeling van de Zandmotor konden bijvoorbeeld algemene voorspellingen gemaakt worden van de levensduur van megasuppleties (Tonnon et al., 2018). Generiek is het windtransportmodel Aeolis, wat bruikbaar is voor veel complexe kusten (Hoonhout & De Vries, 2016). Ook de sedimentsortingsmodellen zijn bruikbaar voor vooroeversuppleties en andere vormen van de Zandmotor (Huisman et al., 2018). Qua meettechnieken is er bij de Zandmotor geëxperimenteerd met innovatieve methoden die in de toekomst breder toepasbaar zijn voor kustonderhoud (o.a. Rutten et al., 2018). Het gaat bijvoorbeeld om het nauwkeuriger meten van de kust met drones (Shore, 2020; Figuur 6.1). Ook is ervaring opgedaan met het efficiënter bemonsteren van bodemleven in de zee (Wijsman et al., 2021). De monitoring van het macrobenthos in de vooroever heeft geresulteerd in een unieke dataset van bodemdieren in zandige substraten (Herman et al., 2021). Nog nooit eerder is deze ondiepe zone in een relatief klein gebied zo intensief bemonsterd over een periode van meer dan 10 jaar. Door Luijendijk en Van Oudenhoven (2019) wordt de kennis beschreven die is opgedaan in de onderzoeksprogramma's Nature-Coast en NEMO. Over de waardering en beleving van de Zandmotor en andere gamma-onderwerpen is weinig onderzoek verricht. Op dat gebied heeft minder kennisverspreiding plaats gevonden.



Figuur 6.1 Meting van de hoogte van embryonale duinen met een drone (Boven: Shore, 2020; Onder: Arens, 2021; Huisman & De Vet, 2021)

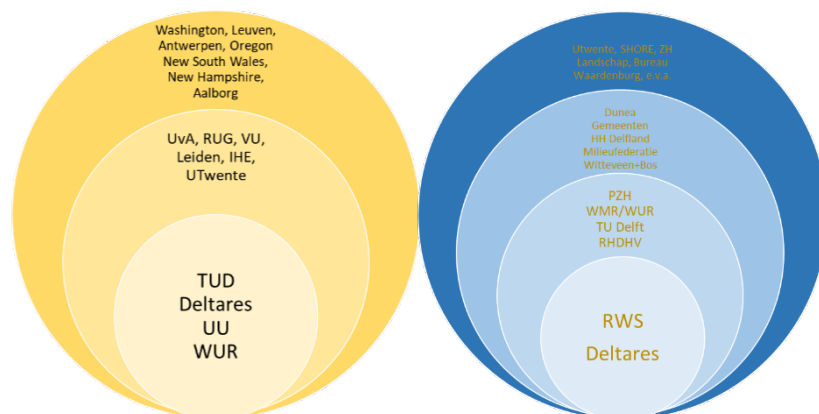
6.3 Toepassing van kennis

De pilot Zandmotor biedt het Nederlands bedrijfsleven een unieke mogelijkheid om kennis op te doen over innovatief kustonderhoud. Het combineren van kustonderhoud met andere kustfuncties (zoals natuur en recreatie) wordt bij de Zandmotor namelijk heel concreet. De waterbouwsector kan de Zandmotor in het buitenland als voorbeeld gebruiken om aan te tonen dat waterbouw en ecologie hand in hand kunnen gaan ten dienste van veiligheid, economische ontwikkeling en leefomgeving. Via Ecoshape, een samenwerkingsverband van bedrijfsleven, kenniswereld en overheid, wordt dit concept van 'bouwen met de natuur' als speerpunt van de waterbouwsector uitgedragen (Vreugdenhil et al., 2021). In dat kader is er ook veel (internationale) belangstelling voor de Zandmotor. In het buitenland is daarom gewerkt aan zandmotorachtige oplossingen, onder andere Negril beach (Jamaica) en Bacton (Verenigd koninkrijk). Hier zijn de morfologische modellen van de Zandmotor gebruikt om de levensduur en verspreiding van zand te onderzoeken. In Nederland is de Zandmotor gebruikt als inspiratie voor een grootschalige suppletie bij de Hondsbossche Duinen, waar gekozen is voor een langgerekttere suppletie. De daadwerkelijke toepassing van het 'bouwen met de natuur' zal overigens voor alle locaties een andere vorm krijgen afhankelijk van de lokale kustveiligheids- en onderhoudsopgave en aanwezige behoefte aan kustfuncties als natuur en recreatie.

Ook in onderwijsprogramma's wordt aandacht besteedt aan de Zandmotor, bijvoorbeeld om kennis over natuurlijk kustonderhoud onder de aandacht te brengen op middelbare scholen en universiteiten. Het ging om wel om een beperkt aantal scholen. Het lesmateriaal zou breder verspreid kunnen worden. Hierin speelt mee dat het faciliteren van onderwijs geen doel is geweest.

6.4 Kennisprogramma's en netwerken

Rond de Zandmotor zijn ook kennisprogramma's opgezet bij de universiteiten en onderzoeksinstituten. Deze kennisnetwerken zijn door de tijd heen gegroeid omdat universiteiten en kennisinstituten ook andere binnenlandse en buitenlandse partners bereidt vonden om bij te dragen aan het onderzoek (Vreugdenhil et al., 2021). Op hoofdlijnen zijn er twee kennisnetwerken, namelijk het wetenschappelijke netwerk en het monitoringsnetwerk (Figuur 6.2).



Figuur 6.2 Overzicht van het wetenschappelijke (links) en monitoringsnetwerk (rechts) met de sterkst betrokken partners in het centrum (Vreugdenhil et al., 2021)

Wetenschappelijke netwerk

Het wetenschappelijke onderzoek wordt uitgevoerd bij de universiteiten, en heeft zich met name geconcentreerd in de onderzoeksprogramma's NatureCoast en NEMO (Figuur 6.3). In deze projecten werkten in totaal 15 PhD's en 6 PostDoc's aan interdisciplinair onderzoek. Deze onderzoekers werkten verspreid over verschillende Nederlandse universiteiten die al langer samenwerkten

op het gebied van kustonderzoek (o.a. TU-Delft, Universiteit Utrecht, Universiteit Twente en Wageningen universiteit). In deze projecten is de relatie aanzienlijk geïntensiveerd en is het netwerk uitgebreid, waarbij elk van de partijen een eigen focus kon hebben vanuit de waterbouw, morfologie, ecologie of bestuurskunde. Voor de Nederlandse universiteiten boden de onderzoeksprojecten de mogelijkheid om hun samenwerking te versterken met buitenlandse universiteiten (o.a. Oregon, Aalborg, Mexico, Bordeaux, Antwerpen en Leuven). Dat het kennisnetwerk rond de Zandmotor aantrekkelijk is, blijkt uit het feit dat er nog steeds nieuwe onderzoeken worden voorbereid (o.a. bij universiteiten in Delft, Utrecht, Wageningen, Groningen en Leiden) waarin kennis en ervaring van de Zandmotor een plek krijgt.

Monitoringsnetwerk

Het monitoringsnetwerk is ten behoeve van kustbeheer geïnitieerd door Rijkswaterstaat, de Provincie Zuid-Holland en Dunea. Zij hebben een bestuursakkoord gesloten met als doel om antwoord te geven op de vragen die voortkomen uit de Milieu Effect Rapportage (MER) en vergunning van de Zandmotor, én om daarmee goed gesteld te staan voor de toekomst. De monitoring is door RWS in nauwe samenwerking met Deltares en Wageningen Marine Research (WMR) opgezet en gefinancierd. De focus is hierbij heel sterk op het fysieke systeem. De Provincie Zuid Holland coördineert de monitoring van de recreatie en economische ontwikkeling. Vanuit deze monitoring is een groot aantal adviesbureaus betrokken geraakt evenals een aantal (semi)publieke organisaties (o.a. gemeenten, Hoogheemraadschap, Zuid Hollands Landschap). Het wetenschappelijke netwerk heeft overigens ook sterk bijgedragen aan het verzamelen van veldgegevens over de Zandmotor (o.a. het MegaPEX veldexperiment), maar focuste zich op de wetenschappelijke vragen in plaats van het kustbeheer.

Opvallend is dat de meeste wetenschappelijke en monitoringsprogramma's zijn geregistreerd door de overheid en universiteiten, wat iets zegt over het belang van de pilot Zandmotor voor toekomstige kustversterkingen in Nederland. De consensus was

dat deze bijzondere pilot benut diende te worden voor kustonderzoek. Meer spontane kennisontwikkeling is ook ontstaan, en dan met name op het vlak van archeologie en paleontologie, voortkomend uit de ideale zoeklocatie die de Zandmotor daarvoor biedt. Het bestaande netwerk van amateuronderzoekers en musea (o.a. Naturalis, het Rijksmuseum voor Oudheidkunde en het Natuurhistorisch museum Rotterdam) was daarvoor cruciaal.



Figuur 6.3 NatureCoast congres (bron: tweet Van Oudenhoven, 2017)

6.5 Evaluatie van kennisontwikkeling

De spin-off van de kennisontwikkeling bij de Zandmotor kan worden geconcretiseerd door te evalueren welke breder toepasbare kennis is opgedaan, hoe bruikbaar de innovatie is bij binnen- en buitenlandse projecten en op welke wijze er kennisverspreiding heeft plaatsgevonden. Opgemerkt moet worden dat een beantwoording op de sub-vragen te vinden is in Appendix A.

Generieke kennisontwikkeling

De eerste vraag richt zich op de beschikbaarheid van generieke kennis over het kuststelsel, efficiënt onderhoud, het combineren van kustfuncties en beschikbare methodes (zoals numerieke modellen) om hier in de toekomst analyses voor te maken.

- *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. Zo is het voor het eerst dat de bodemhoogte, het sediment en de bodemdiergemeenschap van de ondiepe vooroever zo intensief zijn bemonsterd. Ook is onderzoek gedaan naar de bestuurlijke aansturing van het project. De numerieke modellen en de expertise die opgedaan is met het modelleren zijn ook breder toepasbaar voor andere typen suppleties en andere kusten. De opgedane kennis en modellen dragen er ook aan bij dat accuratere voorspellingen gemaakt kunnen worden van de levensduur van grootschalige zandsuppleties, sedimentosortering op de vooroever én aanzanding van vaargeulen. Verder is de Zandmotor belangrijk geweest voor de ontwikkeling van een windtransportmodel (Aeolis) waarmee duinontwikkeling wordt onderzocht. Innovaties in het berekenen en presenteren van stromingen in ondiep water helpen reddingsbrigades muistromen beter in te schatten. Hiervoor is ook een app ontwikkeld. Tenslotte heeft de Zandmotor ruimte geboden om innovatieve meettechnieken te gebruiken en verder te ontwikkelen, onder meer via het gebruik van een drone. Dit bracht embryonale duinen in groot detail (enkele cm resolutie) in kaart.

Toepasbaarheid

De mate waarin kennis al is toegepast is in andere projecten is een goede indicator voor de bruikbaarheid van het concept van

grootschalige suppleties die een bijdrage leveren aan de natuur- en recreatiefuncties.

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

De ontwikkelde kennis is aantoonbaar gebruikt bij onderzoek naar alternatief kustbeheer in Jamaica en het Verenigd Koninkrijk. Verder wordt de Zandmotor veel gebruikt als voorbeeld van innovatief kustbeheer voor buitenlandse delegaties. RVO en NWP zijn hier actief in, evenals nauwer bij de Zandmotor betrokken partijen als Ecoshape en Deltares. De icoon status van de Zandmotor was hierin belangrijk voor de Nederlandse waterbouwsector. De Zandmotor was ook inspiratie voor de grootschalige zandige kustversterking bij de Hondsbossche Duinen én voor de recente kustsuppletie bij Ameland in het kader van het project Kustgenese 2 (Rijkswaterstaat, 2020). Of alle kennis ook in alle projecten volledig is benut, is niet bekend. Komende jaren moet blijken hoe de kennisontwikkeling van de Zandmotor verder door kan werken in toepassingen voor de waterbouwsector.

Kennisverspreiding

Door kennisverspreiding via wetenschappelijke en publieke kanalen kan de kennis van de Zandmotor gewaarborgd blijven op de lange termijn.

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

Er heeft veel kennisverspreiding plaats gevonden, formeel en informeel en op meerdere niveaus (van wetenschappelijk tot gericht op breed publiek). Het onderzoek rond de Zandmotor had een positieve invloed op de activiteit in de wetenschappelijke netwerken, waaronder het NCK. Kennisverspreiding richting een breder publiek vond plaats via een informatiecentrum en nieuwsitems. Daarnaast zijn er tal van initiatieven om kennis richting publiek te verspreiden, zoals excursies vanuit culturele

groepen, exposities, workshops bij musea, televisieprogramma's en onderwijsprogramma's. Op dit moment wordt de kennisverspreiding niet sterk geregisseerd. De mate van regie over kennisverspreiding is een keuze die bij de start van projecten het beste bewust vooraf gemaakt kan worden.

7 Conclusies

7.1 Bevindingen

Het monitoring en evaluatieprogramma (MEP) van de Zandmotor heeft over de periode van 2011 tot 2021 veel kennis opgeleverd over het concept van grootschalige zandsuppleties voor het kustonderhoud die ook een bijdrage beogen voor natuur en recreatie functies. Op basis van de ervaringen kunnen in de toekomst effectievere maatregelen worden ontworpen om de kust te beschermen en andere functies te bedienen. Vanuit de MEP kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

Duinaangroei en kustontwikkeling

- De duingroei in de duinversterking van de Zandmotor bedroeg 14 m³/m/jaar, wat niet veel verschilt van de duingroei op de omliggende Delflandse kust. Dit hangt samen met het ontwerp van de Zandmotor met een lagune en een duinmeer. Anders was de duingroei naar verwachting ~27 m³/m/jaar geweest.
- De groei van de duinen wordt belemmerd door invang van verstoven zand in de lagune en het duinmeer. Het is een ontwerpafweging om te kiezen voor duingroei of voor de mogelijkheden / functies die een lagune of duinmeer biedt.
- Zand wordt hoofdzakelijk ingevangen in de eerste duinenrij. Beheermaatregelen zijn nodig als doorstuiving van zand naar de achterliggende duinen wenselijk is.
- Door golven wordt zand van de Zandmotor kustlangs verspreid naar de stranden van Kijkduin en Ter Heijde, waar kustaangroei plaatsvindt.
- Het zand van de Zandmotor blijft behouden binnen het kustfundament. De Zandmotor waarborgt de lange termijn beschikbaarheid van zand op de Delflandse kust, aangezien er

(ook zonder de Zandmotor) door natuurlijke processen sediment naar Rijnland toe wordt getransporteerd.

- De landtong aan de noordzijde van de Zandmotor heeft binnen enkele jaren de lagune omsloten, waarna de uitwisseling van water via een toegangseul plaatsvond. De ligging van de toegangseul verandert door de tijd heen. Tijdens stormen kan een nieuwe toegangseul ontstaan.
- Kliffen (of steilranden) kunnen ontstaan op de Zandmotor tijdens stormen die samengaan met laag water. Een ontwerp met een lagere strandhoogte (of minder erosie) kan dit voorkomen.

Natuurontwikkeling

- Het aantal bodemdieren in de vooroever is na aanleg toegenomen (zowel biomassa als dichtheid en aantal soorten).
- Een invloed van de wijze van suppleren met eenmalig een grote hoeveelheid zand kon niet worden vastgesteld.
- De onderwaternatuur is diverser geworden na aanleg van de Zandmotor met meer verschillende leefgemeenschappen van bodemdieren. Dit is het gevolg van de invloed van de Zandmotor op golven, stromingen en bodemsediment. Een meer zeewaarts uitstekende suppletie, zoals de Zandmotor, heeft een groter effect op de bodemsedimentsamenstelling dan reguliere suppleties.
- Bij de lagune werden schelpdieren gevonden die op de omliggende kust weinig voorkomen. Als gevolg van de beperkte uitwisseling van water met de zee is de waterkwaliteit van de lagune sinds 2018 sterk achteruit gegaan, waardoor ook het aantal gevonden schelpen is afgenomen.
- Door het invangen van zand in de lagune en het duinmeer kan op termijn een natte strandvlakte (met groen strand) ontstaan.
- Op de haak is een laag van grof zand en schelpen ontstaan die erg onnatuurlijk is. Dit is het gevolg van het verstuiwen van de fijne zandkorrels. Dit komt door de relatief hoge kruinhoogte van de haak waardoor de toplaag van de bodem niet door golven (of golfoploop) kan worden omgewoeld.
- Op de Zandmotor ontstaan embryonale duinen, die op sommige plaatsen al aaneengroeien tot complexen van witte duinen. Deze

ontwikkeling duurde langer dan verwacht. Vegetatiegroei kan, indien gewenst, versneld worden door het aanpoten van helmgras.

- Helmgras trad op als eerste duinvormer, wat anders is dan de klassieke theorie waarin biestarwegras als eerste duinvormer optreedt.
- Er zijn in 2013 en 2014 een groot aantal vogels waargenomen op de Zandmotor, maar in latere jaren waren de aantallen niet groter dan op de kust van Noordwijk. Waardevol is het voorkomen van Aalscholvers op de Zandmotor in de eerste jaren na aanleg, omdat deze minder voorkomen op de omliggende kust. Voor drieteenstrandlopers (en andere foeragerende vogels) was er nog geen toename ten opzichte van andere stranden, maar deze soorten nemen nog wel toe. Het kost tijd voordat de bodemdierpopulatie op het strand (tevens het voedsel voor de drieteenstrandlopers) voldoende is ontwikkeld.
- Een invloed op zeezoogdieren en vissen kon niet worden vastgesteld.

Recreatief en maatschappelijk gebruik, beheer en omgevingseffecten

- Recreatie bij de Zandmotor was gebaat bij de rust en natuurlijkheid van het landschap (hoge waardering). De lagune zorgt voor een meerwaarde, omdat de relatief rustige condities gunstig zijn voor beginners, wat elders op de Hollandse kust niet zo is.
- Spontaan zijn er maatschappelijke functies ontstaan op de Zandmotor (o.a. kunst, cultuur en archeologie). Van tevoren dient nagedacht te worden over de mate waarin regisseren nodig is voor verschillende functies (o.a. maatschappelijk of kennisontwikkeling). Dit hangt af van de context (ligging maatregel en institutionele setting in het gebied). Ook als er niet wordt geregisseerd kan er meerwaarde ontstaan.
- Recreatieveiligheid was beheersbaar bij de Zandmotor. Er is rekening gehouden met muien, sterke getijstromingen en condities in de toegangseu. Op de kust van de Zandmotor

werden niet meer muien waargenomen dan op de omliggende Delflandse kust. Bepalend voor de risico's zijn het samengaan van onveilige omstandigheden en de aanwezigheid van bezoekers.

- Vegetatiegroei op de Zandmotor werd belemmerd door berijding, schoonmaken van het strand en betreding door bezoekers. Bij de Zandmotor is geen recreatiebeheer toegepast door afzetten van gebieden. Er dient een afweging gemaakt te worden tussen de belangen van recreatie en natuurontwikkeling.
- Er is geen effect op het grondwater omdat er drainagebuizen zijn geplaatst. Voor andere gebieden kan een verhoging van de grondwaterstand / zoetwaterbel mogelijk gunstig zijn,.
- De overstuiving van zand en inwaai van zout in de duinen van Solleveld is heel laag, waardoor verstruweling toeneemt in de duinen van Solleveld. Er is vegetatiebeheer nodig om successie te mitigeren. Alleen tijdens stormen kan zand (en zout) doorstuiven naar de duinen van Solleveld, wat ecologisch toch belangrijk kan zijn.
- Er was geen significante invloed op de omliggende natte infrastructuur.

Spin-off voor kennisontwikkeling

- Het monitoringsprogramma bij de Zandmotor heeft geleid tot een unieke dataset waarin met hoog detail de ontwikkeling van zowel de bodemhoogte, sedimentologie en ecologie (bodemdieren, vogels en vegetatie) is vastgelegd, terwijl er tegelijkertijd intensieve metingen zijn van hydrodynamica, grondwater en recreatief gebruik. De metingen bij de Zandmotor kunnen nog jaren gebruikt worden ter versterking van de kennisbasis van ons kuststelsel, en geven de mogelijkheid om ons op een gedegen manier voor te bereiden op toekomstige uitdagingen zoals doorgaande klimaatverandering.
- Er is een succesvolle samenwerking ontstaan tussen overheid (Rijk en provincie), kennisinstellingen en universiteiten, waarbij ook aanvullende wetenschappelijke financiering kon worden ingezet.

- De groep kennispartners die bij elkaar is gebracht voor het Zandmotoronderzoek was dusdanig groot, dat dit een aantrekkende werking had op andere (internationale) kennisinstellingen en universiteiten. Er was sprake van een netwerkeffect.
- Dankzij de Zandmotor is generieke kennis ontwikkeld over het fysische kuststelsel (hydrodynamica, morfologie, ecologie, grondwater), het uitvoeren van innovatieve veldmetingen, numerieke modellering en het efficiënt ontwerpen van grootschalige suppleties die een meerwaarde voor natuur en recreatie beogen.
- Toepassing van Zandmotorkennis in nationale en internationale projecten bevestigt het belang (de 'icoonfunctie') van de Zandmotor voor de waterbouwsector.

7.2 Aanbevelingen

De ervaring met de Zandmotor als multifunctionele suppletie leidt tot aanbevelingen voor toekomstige maatregelen. Deze volgen hieronder voor de onderwerpen monitoring, kennisontwikkeling, prioritering van kustfuncties in relatie tot ontwerpkeuzes, regie over het gebruik en omgevingseffecten.

Monitoring

Er zijn geen andere kustgebieden in de wereld waar al 10 jaar zo intensief (en multidisciplinair) is gemeten als bij de Zandmotor, waardoor een unieke dataset is ontstaan. De aanbeveling is de monitoring van de Zandmotor ook in de komende 10 jaar voort te zetten, zodat ook de lange termijn ontwikkeling in beeld wordt gebracht (zoals het tweede deel van de levensduur van de Zandmotor). Er dient in 2026 en 2031 (na 15 en 20 jaar) een heranalyse gedaan te worden van de ontwikkeling van de Zandmotor om een compleet beeld te krijgen van de ontwikkeling.

Het advies is de monitoring te richten op het voortzetten van de belangrijkste meetreeksen: morfologie, vegetatieontwikkeling, duinvorming, bodemdieren en vogels. Juist langdurige monitoring is waardevol voor het verkrijgen van uitvoeringstechnische en wetenschappelijke inzichten.

- Het meten van de bodemhoogte van de kustzone en duinen is van belang om inzicht te krijgen in de verspreiding van zand langs de kust. Er dient aandacht besteedt te worden aan de snelheid waarmee het netto noordwaarts transport van zand plaatsvindt en de mate van verstuuving naar de duinen. Specifieke aandacht is nodig voor de ontwikkeling van de lagune. De verwachting is dat deze de komende jaren sterk van vorm zal veranderen (o.a. door een doorbraak van de haak én daarna de verwachte sterke import van zand vanaf zee).
- Tweede prioriteit is de vegetatie op de Zandmotor en de daarmee samenhangende groei van de embryonale duinen. Dit is de afgelopen jaren goed op gang gekomen. Middels monitoring van bodemhoogte en vegetatie wordt inzicht verkregen in de groei van de duinen, de successie van vegetatie en de ecologische waarde.
- Lange termijn metingen van bodemdieren in de vooroever (en sedimentsamenstelling) blijven nodig om te zien of de bodemdiergemeenschappen uiteindelijk weer vergelijkbaar gaan worden met de situatie van voor de aanleg van de Zandmotor. Deze data zijn bovendien de enige bron van informatie over bodemdieren in ondiep kustwater. Ze dienen dus als referentie voor andere kustprojecten. De data kunnen ingezet worden voor het afleiden van relaties tussen abiotische condities en het voorkomen van bodemdieren, waardoor in de toekomst betere inschattingen gemaakt kunnen worden van de te verwachten invloed van een maatregel op bodemdieren.
- Het tellen van vogels is van belang voor het inschatten van de lange termijn effecten van de Zandmotor op de vogelpopulatie. Een relevante vraag is of het aantal steltlopers op het strand zal toenemen in de tijd (zoals verwacht wordt). Ook zijn de

vogeltellingen van belang voor het inschatten van de natuurwaarde van de nieuwe duinen.

Een lagere frequentie van de metingen dan in de voorgaande 10 jaar is mogelijk omdat de veranderingen minder snel gaan. Voor metingen van de bodemhoogte (o.a. duinen en onderwatervooroever) zijn tenminste 2 metingen per jaar nodig. Mogelijk zal er incidenteel een extra bodemhoogtemeting nodig zijn voor de analyse van de ontwikkeling van de lagune. Indien het gewenst is om een meting te hebben voor recreatieveiligheid, dan is één extra meting nodig in de zomer. Vegetatie en bodemdieren kunnen elke 2 tot 5 jaar gemonitord worden. Vogels dienen maandelijks geteld te worden, maar dit kan om de 2 à 3 jaar gebeuren.

Kennisontwikkeling

Er is nog veel nieuwe kennis te ontwikkelen op basis van de dataset van de Zandmotor. De huidige analyses focussen voornamelijk op het beschrijven van de geobserveerde ontwikkelingen, terwijl er met nadere analyses meer inzicht verkregen kan worden in de onderliggende fysische processen. Geadviseerd worden onderzoeken naar de ontwikkeling van zandbanken, bodemsamenstelling, vegetatie/duinen, vogelpopulaties en bodemdieren. Dit zijn ook precies deelgebieden waarin de huidige beschikbare kennis grote lacunes vertoont én daarom ook nog geen adequate numerieke modellen beschikbaar zijn. Nederlandse wetenschapsorganisaties kunnen het fundamenteel en toegepast onderzoek van de Zandmotor op deze gebieden stimuleren. De Zandmotor is ook validatie voor het onderzoeksinstrumentarium dat voor kustbeheer wordt gebruikt.

Ontwerpkeuzes in relatie tot beoogde functies

Voorafgaand aan het ontwerpen van een grootschalig zandsuppletie is inzicht over het belang van de verschillende kustfuncties (o.a. recreatie, natuur en kustonderhoud) nodig. Dit voedt afwegingen met betrekking tot de volgende ontwerpkeuzes:

- De afweging tussen een langgerekte kustsuppletie (mogelijk op de vooroever) die doorgaans effectief is voor kustonderhoud of een korte meer zeewaarts uitstekende suppletie met een hogere dynamiek waarbij er ook mogelijkheden zijn voor recreatie en natuur (o.a. lagune, droog strand en duinvorming).
- Het wel of niet opnemen van een duinmeer of lagune hangt af van de doelen ten aanzien van recreatie, natuurwaarden en mate van duingroei. Een lagune (of duinmeer) vergroot de natuurwaarde vergroot én mogelijkheden voor recreatie tijdelijk, maar de duingroei zal in die tijd minder groot zijn.
- De mate waarin het gebied toegankelijk gehouden wordt voor recreatie heeft invloed op de ontwikkeling van kwetsbare natuur (o.a. embryonale duinvegetatie én rust voor broedvogels). De invloed berijding op de natuurlijke ontwikkeling moet in het bijzonder in beeld zijn.
- Het aanleggen en laten ontwikkelen van een landtong. Dit draagt bij aan een dynamisch kustlandschap, wat zich echter minder voorspelbaar gedraagt voor (niet geïnformeerde) recreanten. Het vergt dan meer werk om recreanten te informeren én mogelijk ook een iets frequentere inzet van de reddingsdiensten.

Recreatieveiligheid

Voor nieuwe grootschalige suppleties is het van belang om aandacht te besteden aan de recreatieveiligheid. Het belangrijkste aandachtspunt hier is het voorzien van eventuele onveilige situaties én het onderzoek of deze mogelijk samengaan met de aanwezigheid van badgasten. De zwemveiligheidsapp bleek waardevol bij de Zandmotor, maar recreatieveiligheid vraagt voor andere gebieden wel specifieke monitoring en ontwikkeling.

Effecten op bestaande natuur en drinkwaterwinning

Kustverbreding leidt tot afname van de doorstuiving van zout, waardoor er sprake zal zijn van een versterking van de verstruweling van bestaande duinen. Het is daarom aan te bevelen om bij nieuwe grootschalige suppleties rekening te houden met een (bepaalde) toename van het natuurbeheer in achterliggende Natura2000

gebieden. Overigens ontstaat er op de Zandmotor ook nieuwe natuur. Aangeraden wordt om te onderzoeken hoe deze nieuwe natuur ook gewaardeerd kan worden in het natuurbeleid.

Bij de Zandmotor zijn drainageputten geplaatst om te voorkomen dat mogelijk vervuild grondwater afvloeit richting de waterwingebieden. Op veel plaatsen langs de Nederlandse kust is een dergelijke drainage niet nodig omdat het voor de natuur daar juist wenselijk is het grondwater in de duinen te laten stijgen. Een vernatting van de bestaande duinen kan als doelstelling overwogen worden voor een toekomstige grootschalige suppletie.

Mate van regisseren van gebruik en kennisontwikkeling

De aanbeveling is om in de ontwerpfase van een nieuwe grootschalige kustsuppletie al na te denken over de mate van regie over inrichting en gebruik (voor natuur, recreatie en maatschappelijke functies) en over de kennisontwikkeling. Zonder regie bepaalt de institutionele en sociale context in het gebied (bijv. aanwezigheid van een nabijgelegen universiteit) of initiatieven worden genomen. Zonder sterke instituties wordt regie en sturing belangrijker om kansen benut te krijgen.

Referenties

- Arens, S.M. (2021). Rapportages meetplannen 01 t/m 15, met betrekking tot strand- en duindynamiek, dynamische geomorfologie, hoogteveranderingen, fijne overstuiving, saltspray, embryonale duinen.
- 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*.
- DHV (2007). Waterbouwrapport Versterking Delflandse kust, Technische analyse t.b.v. versterking Delflandse kust. Rapport WG-SE20061125,19 Februari 2007, versie definitief. Door DHV, H+N+S landschapsarchitecten en Alterra.
- DHV (2010a). Projectnota/MER Zandmotor Delflandse kust. Dossier C6158-01.001. In opdracht van de Provincie Zuid-Holland en Rijkswaterstaat.
- DHV (2010b). Monitoring en Evaluatie Plan Zandmotor. In opdracht van de Provincie Zuid-Holland.
- Ecorys (2020). Onderzoek naar de economische en sociale meerwaarde van de Zandmotor. Ecorys rapport. Auteurs: M. Wienhoven, H. Schutte, A. van Langevelde, E. van Ossenbruggen, S. Schep (Wolfs Company) en Mark Grutters (Sweco). Opdrachtgever: RWS WVL.
- Herman, P.M.J., Moons, J.J.S., Wijsman, J.W.M., Luijendijk, A. and Ysebaert, T. (2021) A mega-nourishment (Sand Motor) affects landscape diversity of subtidal benthic fauna. *Frontiers in Marine Science*.
- 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.
- 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., 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.
- Huisman, B.J.A. & De Vet, P.L.M. (2021). Evaluatie van drones voor kustbeheer en onderzoek. Beschrijving van methodiek en toepassingen. Deltares rapport 11201431-003-ZKS-0011.
- Huisman, B.J.A., Quataert, E., Alvarez Antolinez, J.A. (2021). Sedimentbalans Delflandse kust 2011-2021. Analyse van morfologische verandering en sedimenttransport rond de Zandmotor in de periode 2011 tot 2021. Deltares rapport 11201431-001-ZKS-0008.
- Huizer, S., Oude Essink, G. H. P., Bierkens, M. F. P. (2016). Fresh groundwater resources in a large sand replenishment, *Hydrological Earth Systems Science*, 20, 3149–3166.
- Ijff, S., Arens, S.M., Vertegaal, C.T.M., Huisman, B.J.A. (2021). Monitoring natuur- en duinontwikkeling op de Zandmotor. Zandmotor evaluatie periode 2012-2020. Deltares rapport 11201431-003-ZKS-0012.
- Laan, N. (2019). Kunstwerk “Zand en Water”. Locatie : Zandmotor.
- Laan, N. (2020). Kunstwerk “Waterlijn”. Locatie : Zandmotor.

- 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.
- Loermans, J.H.T., J.M. Reitsma, J. de Jong, 2020. Habitatkartering Buitenduinen Solleveld 2012-2020. Bureau Waardenburg Rapport 20-237.
- Luijendijk, A.P., Ranasinghe, R., De Schipper, M.A., Huisman, B.J.A., Swinkels, C.M., Walstra, D.J.R., Stive, M.J.F. (2017). 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.
- Luijendijk, A.P., De Schipper, M.A., Ranasinghe, R. (2019). Morphodynamic Acceleration Techniques for Multi-Timescale Predictions of Complex Sandy Interventions. *Journal of Marine Science and Engineering* 7(3):78.
- Niekus, M.J.L.T., Kozowyk, P.R., Langejans, G.H., Ngan-Tillard, D., van Keulen, H., van der Plicht, J., Cohen, K.M., van Wingerden, W., van Os, B., Smit, B.I., Amkreutz, L.W.S.W., Johansen, L., Verbaas, A., Dusseldorp, G.L. (2019). Middle Paleolithic complex technology and a Neandertal tar-backed tool from the Dutch North Sea. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(44), 22081-22087
- Oppenheimer, M., B.C. Glavovic, J. Hinkel, R. van de Wal, A.K. Magnan, A. Abd-Elgawad, R. Cai, M. Cifuentes-Jara, R.M. DeConto, T. Ghosh, J. Hay, F. Isla, B. Marzeion, B. Meyssignac, and Z. Sebesvari, 2019: Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].
- 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.
- PZH (2015). *Het verhaal van de Zandmotor*. Het turbulente proces van een innovatie binnen het waterbeheer gezien vanuit verschillende invalshoeken. Oktober 2015. Provincie Zuid-Holland, Rijkswaterstaat en Royal Haskoning DHV. Auteur : Jan Baltissen.
- 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.
- Rijksoverheid (2009). De Waterwet. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0025458/2021-01-01>.
- Rijksoverheid (2012). Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte. Nederland concurrerend, bereikbaar, leefbaar en veilig. Ministerie van Infrastructuur en milieu.
- Rijksoverheid (2015). Nationaal Waterplan 2016-2021. Ministerie van Infrastructuur en Milieu & Ministerie van Economische Zaken.
- 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.
- Rijkswaterstaat, 2020. Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust.
- Satellietgroep (2015a). Public Expedition Zandmotor#3: Staged Landscape. Sarah Cameron Sunde (USA) - 36.5 / a durational performance with the sea, 2015. Foto: Florian Braakman.

- Satellietgroep (2015b). Public Expedition Zandmotor#2: Cultural Geology. Josje Hattink - Mistaking Clouds for Mountains, 2015. Foto: Josje Hattink.
- Shore, 2019. Veldrapport Drifter Stromingsmetingen Zandmotor. Shore rapport N201905-02. Auteurs M. Verkerk en R.C. de Zeeuw. Oktober 2019.
- Shore (2020). Zandmotor LiDAR Survey. Field report. Rapport N202010-07 ZandmotorLiDAR. Auteur: L. Veltman.
- Stronkhorst, J., Huisman, B., Giardino, A., Santinelli, G., Santos, F. (2017). Sand nourishment strategies to mitigate coastal erosion and sea level rise at the coasts of Holland (The Netherlands) and Aveiro (Portugal) in the 21st century. *Ocean & Coastal Management*: 156. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.11.017>.
- 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.
- Tulp, I., T. C. Prins, J. A. M. Craeymeersch, S. IJff and M. T. Van der Sluis (2018) Syntheserapport PMR NCV. Wageningen Marine Research, Deltares, Report number: C014/18, 282 pages.
- 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 Donk, S. C. & J. W. M. Wijsman (2020) Veranderingen in ecotopen over 10 jaar na aanleg van de Zandmotor. Monitoring en evaluatie 2010-2020. Wageningen Marine Research, Report number: C100/20, 38 pages.
- 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 Oudenhoven (2017). Twitter-bericht @AvanOudenhoven. 19 mei 2017.
- 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.
- Vertegaal, C.T.M. (2021). Evaluatie Pilot Zandmotor 2012-2020. Onderdeel natuur/duin en strand. Zandmotor rapport. In opdracht van Deltares/Rijkswaterstaat.
- Vreugdenhil, H., Geurts, D. en Slinger, J. (2021). Maatschappelijke meerwaarde van de Zandmotor. Een blik op de iconische waarde, kunst en cultuur, paleontologie en archeologie, educatie, economie en ruimtelijke ordening, en kennisverspreiding. Deltares rapport 1201431-003-ZKS-0008.
- Wijsman, J.W.M., van Hal R. en Jongbloed, R.H. (2015), Monitoring en Evaluatie Pilot Zandmotor Fase 2; evaluatie benthos, vis, vogels en zeezoogdieren 2010-2014. Imares C125/15 en Deltares rapport 1205045-000-ZKS-0107.
- Wijsman, J., Van den Ende D. en 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.

Wijsman, J. W. M., D. Van den Ende en E. Brummelhuis (2020)

Bodemdiergemeenschap van de vooroever en het natte strand van de Zandmotor in het najaar van 2019. Wageningen Marine Research, Report number: C084/20, 107 pages.

Wijsman, J. W. M., J. A. Craeymeersch and P. M. J. Herman (2021). A comparison of macrobenthos data sampled with Van Veen grab and benthic dredge based on ten years of monitoring at the Sand Motor, a mega nourishment at the Holland coast.

Ysebaert, T., J. Craeymeersch and D. Van Der Wal (2016) De relatie tussen bodemdieren en hydro- en morfodynamiek in het sublitoraal en litoraal van de Westerschelde. IMARES, Report.

WUR (2020). Beleving en gebruik van de Zandmotor. De vierde recreatiemonitoring, editie 2019. Wageningen University & Research rapport 3028. Auteurs : C.M Goossen, F. Langers, J. Donders. In opdracht van : Provincie Zuid-Holland.

A Beantwoording evaluatievragen

De evaluatievragen voor de Zandmotor zijn erop gericht om de vragen uit de Milieu Effect Rapportage (MER) en gerelateerd aan de vergunning / beheer te beantwoorden. In het Uitvoeringsprogramma van de Zandmotor monitoring (Tonnon et al, 2011) zijn deze vragen uitgewerkt en na de tussenevaluatie in 2016 licht gewijzigd om ze beter toetsbaar te maken (Taal et al., 2017; Huisman, 2018).

Ze zijn als volgt gegroepeerd :

- MER 1: het stimuleren van natuurlijke duingroei,
- MER 2: fysische / ecologische kennisontwikkeling en innovatie,
- MER 3: creëren van hoogwaardige natuur- en recreatiegebieden
- Beheer en beperken van negatieve effecten:
(1) op recreatieveiligheid, (2) van recreatief gebruik op de natuur, (3) op grondwater, (4) op natuur in de duinen van Solleveld en (5) infrastructuur.

A.1 MER I : Het stimuleren van natuurlijke duinaangroei

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?**

Van 2011 tot 2021 is de zandtoename in de duinen achter de Zandmotor 14 m³/m/jaar. Dit zand is vrijwel allemaal in de eerste duinenrij terecht gekomen. De duingroei bij de Zandmotor is daarmee iets groter dan de gemiddelde duingroei van de Delflandse

kust (13 m³/m/jr). Het invangen van zand door het duinmeer en de lagune zorgt ervoor dat de duingroei bij de Zandmotor niet veel hoger is dan voor de omliggende kust. Als deze aanzanding in het duinmeer en de lagune wordt meegenomen dan is het windtransport bij de Zandmotor naar verwachting aanzienlijk groter (~27 m³/m/jaar).

- **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?**

In 2011 is 21,5 miljoen m³ zand toegevoegd aan het kustgebied tussen Ter Heijde en Kijkduin over een lengte van ~2,5 km. Tien jaar later ligt er in het gebied van aanleg 5 miljoen m³ minder zand. In de gebieden direct ten zuiden en noorden van de Zandmotor (met een lengte van ~ 1 km elk) vinden we daar 3 miljoen m³ van terug. De resterende 2 miljoen m³ draagt voor het overgrote deel bij aan de handhaving van de omliggende kustlijn van Delfland (o.a. bij Ter Heijde, Kijkduin en Scheveningen). De Zandmotor zal naar verwachting nog vele jaren sediment blijven leveren aan de kust en duinen van Delfland.

- **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?**

Vrijwel al het gesuppleerde zand van de Zandmotor is nog aanwezig in het kustfundament van de Delflandse en Rijnlandse kust. Er heeft echter wel verspreiding plaatsgevonden binnen het kustfundament. Tussen 2011 en 2021 is er circa 200.000 m³/jaar aan sediment naar de duinen van de Delflandse kust gegaan (niet alleen vanaf de Zandmotor) en is er circa 150.000 m³/jaar noordwaarts getransporteerd richting Rijnland.

A.2 MER II : Kennisontwikkeling en Innovatie

EF2-1: Levert de Zandmotor nieuwe fysieke 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?**

De vormverandering bij de Zandmotor is anders dan bij reguliere (vooroever)suppleties. Deze vervormen vooral dwars op de kust en bij de Zandmotor vindt veel herverdeling plaats langs de kust. Hierdoor kwam er meer inzicht in de levensduur van de Zandmotor. Door het toevoegen van zand aan het systeem is de dynamiek van de zandbanken vergroot. De invloed van de Zandmotor op de getijstrooming zorgt voor herverdeling van zand op de vooroever wat leidt tot lokale sedimentsortering en mogelijkheden voor bodemleven. De duinen werden versterkt door een relatief constante aanvoer van zand vanaf de Zandmotor, die met name uit het intergetijdegebied kwam. Door het invangen van zand in het duinmeer en de lagune wordt het meegroeien van de duinen daarachter vertraagd. Ook de ontwikkeling van vegetatie en nieuwe duintjes op het strand kan zorgen voor een afname van het windtransport naar de bestaande duinen. Op het hogere strand van de Zandmotor komt relatief weinig zand beschikbaar, aangezien hier een beschermende laag van grover zand en schelpen is ontstaan door selectief transport van het fijne zand. De haak ligt te hoog voor de golven (en golfoploop) om deze laag te kunnen omwerken.

- **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?**

Het ontwerp leidde (met name in de eerste twee jaar) tot een risico op grote stroomsnelheden in de toegangseul van de lagune. Dit was onveilig voor badgasten die de geul tijdens vloed overstaken. Zij konden de lagune in worden gespoeld. Andere risicofactoren waren aanwezig bij de haak van de Zandmotor (o.a. sterke stromingen), maar zorgden niet voor problemen omdat er op die locaties en momenten weinig strandgebruikers zijn. De les is om bij het ontwerp goed te letten op het kunnen samengaan van risicovolle situaties (zoals muistromen, sterke stroming door een 'neer' of vloedstroom in een toegangseul) en het aantal te verwachten strandgebruikers.

- **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).**

Het gebruik van de Zandmotor en de ontwikkeling daarvan leren dat de locatie en het ontwerp een grote invloed hebben op het gebruik van het gebied. Het is echter ook, in belangrijke mate, de wijze van beheren die het gebruik van de Zandmotor bepaalt. De les is vanaf het begin een strategie te hebben voor het beheer. Een denkmodel waarbij de gewenste mate van aansturing/regie per gebruiksfunctie bepaald wordt helpt hierbij.

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?**

Grootschalige suppleties, zoals de Zandmotor, beïnvloeden zowel de golven als de getijstrooming. De golfforcering en resulterende stromingen zorgen voor erosie in ondiep water, waardoor de bodemsamenstelling in de brandingszone grover wordt. De grootste invloed van de Zandmotor op de bodemsamenstelling vindt echter plaats in het diepere water op de vooroever (> 6m waterdiepte), waar de Zandmotor zorgt voor een versnelling van de getijstrooming. Net noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor ontstaan gebieden met een fijnere bodemsamenstelling. De effecten op de bodemsamenstelling reiken verder dan het gebied waarin de Zandmotor is aangelegd (tot 3 km uit de kust). De mate waarin een suppletie zeewaarts uitsteekt is bepalend voor de invloed op de getijstrooming, en daarmee ook op de verandering in bodemsamenstelling van 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?**

Na aanleg van de Zandmotor werden in de vooroever meer soorten bodemdieren waargenomen én ook in grotere aantallen dan voor aanleg. De veranderingen in de omgevingscondities (golven, stromingen, bodemhoogteverandering en sediment) hebben gezorgd voor een vergroting van de diversiteit van leefgebieden. Met name de relatief luwere zone net noordelijk van de Zandmotor blijkt in elke meting een gebied te zijn met grote aantallen bodemdieren, wat een sterke indicatie is dat er sprake is van een effect door de Zandmotor wat niet bij een reguliere suppletie te verwachten is.

Door, zoals bij de Zandmotor, minder frequent te suppleren is er minder vaak bedekking van de bodemdieren. Het is echter lastig om dit effect goed te scheiden van andere omgevingsaspecten die zijn beïnvloed, zoals de golfforcering, getijstrooming en sedimentsamenstelling. Mogelijk is dit effect klein omdat er op de

ondiepe vooroever bodemdieren leven die aangepast zijn aan een hoge mate van sedimentdynamiek en daardoor de gesuppleerde vooroever snel hebben weten te herkoloniseren. Als de Zandmotor volledig is verspreid zal het bodemleven naar verwachting zijn teruggekeerd naar de oorspronkelijk situatie.

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?**
Er zijn veel studies uitgevoerd die generieke kennis hebben opgeleverd over hydrodynamica, morfologie, sediment, ecologie, grondwater en duinvorming. Ook is onderzoek gedaan naar de bestuurlijke aansturing van het project. De numerieke modellen en de expertise die opgedaan is met het modelleren zijn ook breder toepasbaar voor andere typen suppleties en andere kusten. De opgedane kennis en modellen dragen er aan bij dat accuratere voorspellingen gemaakt kunnen worden van de levensduur van grootschalige zandsuppleties, sedimentsortering op de vooroever én aanzanding van vaargeulen. Verder is de Zandmotor belangrijk geweest voor de ontwikkeling van een windtransportmodel (Aeolis) waarmee duinontwikkeling wordt onderzocht. Innovaties in het berekenen en presenteren van stromingen in ondiep water helpen reddingsbrigades muistromen beter in te schatten. Hiervoor is ook een app ontwikkeld. Tenslotte heeft de Zandmotor ruimte geboden om innovatieve meettechnieken te gebruiken en verder te ontwikkelen, onder meer via het gebruik van een drone. Dit bracht embryonale duinen in groot detail (enkele cm resolutie) in kaart.
- **EF2-3b In hoeverre wordt de ontwikkelde kennis toegepast bij innovatieve aanpakken in binnen- en buitenland?**

De ontwikkelde kennis is aantoonbaar gebruikt bij onderzoek naar alternatief kustbeheer in Jamaica en het Verenigd Koninkrijk. Verder wordt de Zandmotor veel gebruikt als voorbeeld van innovatief kustbeheer voor buitenlandse delegaties. De Zandmotor was ook inspiratie voor de grootschalige zandige kustversterking bij de Hondsbossche Duinen én voor de recente kustsuppletie bij Ameland in het kader van het project Kustgenese. Of alle kennis ook in alle projecten volledig is benut is niet bekend. Komende jaren moet blijken hoe de kennisontwikkeling van de Zandmotor verder door kan werken in toepassingen voor de Nederlandse watersector.

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

Er vond veel kennisverspreiding plaats, formeel en informeel en op meerdere niveaus (van wetenschappelijk tot gericht op breed publiek). Het onderzoek rond de Zandmotor had een positieve invloed op de activiteit in de wetenschappelijke netwerken, waaronder het NCK.

A.3 MER III : Natuur

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?**

Op de Zandmotor heeft de groei van vegetatie en embryonale duinen gezorgd voor een landschap met een grote mate van natuurlijkheid, wat elders niet voorkomt langs de Hollandse kust. Verwacht mag worden dat deze ontwikkeling zich zal doorzetten en dat de duinen uiteindelijk verhelen met de buitenste duinenrij van Solleveld. Hierdoor ontstaat een breder en robuuster complex van buitenduinen. Ook de duinversterking heeft door de tijd heen een

natuurlijker karakter gekregen met meer ruimtelijke variatie in de bodemhoogte en vegetatie.

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

De dynamische wijze van aanleg pakt vooral ten zuiden van de Zandmotor goed uit. Hier is een groot areaal embryonale duinen ontstaan (H2110). Op sommige plaatsen zijn al duincomplexen ontstaan die als witte duinen (H2120) aangemerkt kunnen worden. De vegetatieontwikkeling kwam wel pas na 2016 echt op gang, wat trager is dan verwacht. Daarna was sprake van een snelle groei van vegetatie en duinen. In het centrale en noordelijke deel van de Zandmotor hebben het duinmeer en de lagune echter een remmend effect gehad op de natuurlijke duinaangroei. Op de haak van de Zandmotor is het strand zo hoog dat er geen golfwerking of golfploop is in dit gebied. Gevolg is een oppervlak met grof zand en schelpen, waar de noodzakelijke dynamiek voor omwoelen en sorteren van zand ontbreekt.

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

Van recreatiebeheer is nauwelijks sprake geweest. Dit leidde ertoe dat duinontwikkeling niet ongestoord kon verlopen. Het effect van rijroutes van voertuigen is in het bijzonder goed te zien. Er is zijn aaneengesloten zones nieuwe duinen ontstaan die door rijbanen worden gescheiden. Dit geldt in het bijzonder voor het strand bij de strandopgang van het Schelpenpad. De verwachting is dat er beduidend meer oppervlak jonge duintjes zouden zijn ontstaan als er maatregelen waren ingesteld zoals het beperken van de rijroutes van voertuigen (met rasters of via bebording) of het geleiden van bezoekers vanaf het Schelpenpad naar het strand met afgerasterde looproutes.

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?**

De aanleg van de Zandmotor, en daarmee samenhangende verandering in golven, stromingen en sedimentsamenstelling, heeft geleid tot een toename van de diversiteit van leefgebieden in de vooroever en de lagune. Zeewaarts van de haak is het sediment grover geworden. Aan de noord- en zuidwestzijde van de Zandmotor ligt nu juist fijner sediment. In de relatief afgeschermdede lagune waait fijn zand in aan de westzijde, terwijl er slib en organisch materiaal sedimenteert op de bodem. Sediment in de toegangsgemaal is relatief grof. Als de Zandmotor langzaam verdwijnt zal de ruimtelijke variatie van de korrelgrootte op termijn weer teruggaan naar de uitgangssituatie met een verfijning van sediment in zeewaartse richting. Dit kan echter nog tientallen jaren duren.

- **EF3-1b2: Heeft de Zandmotor nieuwe habitats/ecotopen en meer variatie in habitats/ecotopen gecreëerd. Leiden deze tot hogere natuurwaarden in intergetijdengebied en ondiepe kustzone? Is dit te kwantificeren voor bodemdieren, vissen, vogels en zeezoogdieren?**

De aanleg van de Zandmotor heeft zowel op het land als in de ondiepe kustzone geleid tot een toename van de diversiteit van leefgebieden. Als gevolg daarvan is ook de biodiversiteit en natuurrijkheid groter geworden. De lagune is een uniek gebied voor dit deel van de Nederlandse kust. Het werd steeds beschutter en heeft nu nog nauwelijks in- en uitstroming van zeewater. Op langere termijn zal ze verzoeten en uiteindelijk een strandvlakte worden. Het habitat "duinmeer" is ook nieuw, met zeldzame, kenmerkende planten. Na het dichtwaaien kan dit ook een strandvlakte van hoge kwaliteit worden.

Op het strand van de Zandmotor gaat de duinontwikkeling sinds 2016 zeer snel en ontstaan er naast embryonale duinen (H2110) ook witte duinen (H2120). Zo'n ontwikkeling komt langs de Hollandse kust verder niet voor. Bodemdieren in de vooroever van de kust namen toe in diversiteit en biomassa. Vogels namen toe in aantallen en soorten. Bij de Zandmotor werden andere vogels waargenomen (o.a. meer aalscholvers en kokmeeuwen) dan bij Noordwijk, maar een groot verschil in het totaal aantal vogels is er niet. Voor vissen en zeezoogdieren is een invloed van de Zandmotor niet aantoonbaar.

- **EF3-1b3: Hoe heeft de bodemdiergemeenschap zich ontwikkeld in de lagune en de vooroever?**

Op de oevers van de lagune werden door de tijd heen schelpen van steeds meer soorten gevonden. Het aantal soorten nam toe van één naar maximaal 7 soorten. Er werden schelpen gevonden die op de stranden van de Hollandse kust verder niet voorkomen. Daarnaast zijn muggenlarven en kleine wormpjes gevonden in de diepere bodem van de lagune. In 2020 lijkt het aantal gedaald, wat verklaard wordt vanuit de afnemende uitwisseling van water met de zee.

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

De aantallen vissen die zijn gevangen tijdens de monitoring varieerden sterk waardoor geen directe beoordeling te geven is over de invloed van de Zandmotor op (juvenile) vissen. De toename in de aantallen en biomassa van bodemdieren zou echter als een positieve indicator gezien kunnen worden voor de aanwezigheid van (juvenile) vissen.

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

Kustbroedvogels komen tot op heden nauwelijks tot broeden op de Zandmotor. Wel zijn er in recente jaren een aantal broedvogels waargenomen waar het tot 2016 om een enkel exemplaar ging.

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

Vooraf in 2013 en 2014 waren er duidelijk meer zeevogels. Later nam het aantal fors af. Nabij de lagune en het duinmeer zijn de meeste vogels. Voor steltlopers is geen meerwaarde ten opzichte van andere stranden aangetoond, maar het aantal groeit wel met de tijd.

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

De betekenis van de Zandmotor voor deze soortgroep wijkt niet of nauwelijks af van stranden elders langs de Hollandse kust.

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?**

De Zandmotor is aantrekkelijk voor wandelaars, badgasten en kitesurfers en wordt door hen positief beleefd. De rust en natuurlijkheid van het gebied zijn belangrijk. Ook bewoners van het Westland en Den Haag weten de Zandmotor te vinden als recreatieve bestemming.

- **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?**

De Zandmotor lijkt niet te hebben geleid tot meer bezoekers op dit deel van de kust. Een aantoonbare bijdrage aan het werk- en ondernemingsklimaat in de regio (meer aantrekkingskracht op

ondernemers en expats) is er niet. Ook voor woningzoekenden lijkt de Zandmotor geen extra vestigingsfactor.

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

De Zandmotor biedt vooral extra ruimte voor natuurbeleving. Er zijn ook veel badgasten, maar minder dan op andere nabije stranden. De afstand tot de kustlijn speelt hier waarschijnlijk een rol. Het meest in het oog springend is het kitesurfen, waarvoor de Zandmotor een unieke plek biedt. Het ontwerp van de Zandmotor heeft hierop een belangrijke invloed gehad. Het kitesurfen zal in de toekomst vermoedelijk gaan afnemen door het verzanden van de lagune. De natuurbeleving zal waarschijnlijk toenemen door de natuurlijke aangroei van duinen.

A.4 Beheer

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?**

De zwemveiligheid bij de Zandmotor was beheersbaar. Muistromen en versnellingen van het getij hebben niet geleid tot incidenten. Deze muistromen komen bij de Zandmotor niet vaker voor dan op de omliggende kust. Wel werden in eerste jaren een aantal badgasten op de landtong verrast door het hoogwater, waarna ze de toegangsgewel niet meer eenvoudig konden oversteken.

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

De waterkwaliteit van de lagune is achteruit gegaan als gevolg van de steeds kleiner wordende uitwisseling van water met de zee via de geul. Dit leverde echter geen gezondheidsproblemen op.

- **EF4-1c: Was de recreatieveiligheid met betrekking tot drijfzand beheersbaar?**

Bij de Zandmotor zijn geen problemen geweest met drijfzand.

- **EF4-1d: Was de recreatieveiligheid met betrekking tot kliffen en/of steilranden beheersbaar?**

Op de zeewaartse rand van de haak van de Zandmotor ontstonden soms steilranden. In principe zouden strandgebruikers hier vanaf kunnen vallen. Ter plekke zijn echter maar weinig strandgebruikers, waardoor het risico in de praktijk niet groot was.

- **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.

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?**

Er is geen gericht onderzoek gedaan naar de invloed van recreatie en recreatiebeheer op vogels. Het is wel aannemelijk dat de aantallen verstoringgevoelige vogels en broedvogels hoger zouden zijn geweest zonder recreatief (mede)gebruik.

- **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. Ook zijn er geen extra bezoekers toegelaten tot dit gebied door Dunea.

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

Er is een duidelijke invloed van berijding met voertuigen op de duinontwikkeling. En in mindere mate ook van betreding door bezoekers. Er zijn parallel aan de duinvoet brede onbegroeide rijstroken ontstaan. Op de vegetatiekaart is te zien dat de duinvegetaties aan de zuidzijde van de Zandmotor een waaiervorm hebben als gevolg van betreding door bezoekers (en mogelijk auto's) in verschillende richtingen. Ook zijn er op sommige plaatsen kleine paadjes waargenomen in de embryonale duinen. De invloed van recreatief gebruik op de vegetatie heeft de ontwikkeling van de embryonale duinen waarschijnlijk vertraagd.

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

Het duinmeer wordt beperkt bezocht door recreanten. De ontwikkeling van embryonale duinen rond het duinmeer verloopt goed, wat een indicatie is dat de verstoring beperkt is.

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?**

Aannemelijk is dat drainagebuizen voorkwamen dat de grondwaterstand in de bestaande duinen is verhoogd als gevolg van de Zandmotor. Hierdoor konden eventuele verontreinigingen niet verspreiden richting vak 16. Er zijn geen gegevens beschikbaar

over verzilting en verontreiniging van grondwater in het waterwingebied.

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

Aannemelijk is dat drainagebuizen voorkwamen dat de grondwaterstand in de bestaande duinen verhoogd is verhoogd als gevolg van de Zandmotor. Hierdoor konden eventuele verontreinigingen niet verspreiden richting vak 17. Er zijn geen gegevens beschikbaar over verzilting en verontreiniging van grondwater in het waterwingebied.

- **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)?**

Door de aangebrachte putten voor de zeereep is er geen zout grondwater vanaf de Zandmotor richting de putten van Dunea gegaan. Op de Zandmotor heeft inmiddels een verzoeting van het grondwater 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)?**

Er zijn geen aanwijzingen dat oud-zout de ruwwaterkwaliteit in deelgebied 2 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)**

Door de aangebrachte drainage is er geen sprake van een verhoging van de grondwaterstand.

- **EF4-3f: Wat is de invloed van veranderingen in (grond) waterstanden in duingebied Dunea achter de derde duinregel?**
Door de aangebrachte drainage is er geen sprake van een verhoging van de grondwaterstand.

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?**

De zanddynamiek is voor alle meetlocaties in de duinen van Solleveld relatief laag. De dichte aanplanting van de Duinversterking vangt het grootste deel van het aanstuivende zand vanaf de Zandmotor in. Alleen tijdens stormen lijkt er nog zand over te stuiven naar de duinen van Solleveld. Om deze reden is extra beheer nodig via het verwijderen van duindoorn, weghalen/steken van helm en de aanleg van kerven. Deze beheermaatregelen zorgen voor een tijdelijke verhoging van de dynamiek voor de duur van enkele maanden.

- **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?**

Deze invloed is niet waarneembaar in de vegetatie van de duinen van Solleveld, mede omdat er veel beheersmaatregelen zijn genomen die een eventueel effect teniet doen. De zoutinwaai was al veranderd door de aanleg van de kustversterking in 2010. De Zandmotor heeft echter effect op de eerste duinenrij. Er werd daarom meer verstruweling waargenomen in het deel van de duinversterking dat achter de Zandmotor ligt. Net noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor was er duidelijk minder successie.

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

Achter het breedste deel van de Zandmotor is minder invang van zand en zout dan bij het smallere deel. Deze veranderingen zijn niet zodanig dat ze tot verschuivingen in de vegetatie hebben geleid in het duingebied achter de 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 toegangsheuvelen van de havens van Rotterdam en Scheveningen die aan de Zandmotor toegeschreven kan worden?**

Na de aanleg van de Zandmotor is de aanzanding van de havengeul van Rotterdam niet veranderd en is de aanzanding van de vaargeul van Scheveningen heel beperkt toegenomen. De invloed van de kustversterking Delflandse kust was groter dan de invloed van de Zandmotor. In jaren met relatief veel wind en stormen uit het westen en zuidwesten is er de meeste aanzanding.

- **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?**

Bij de uitlaat van het Van der Burg gemaal heeft de Zandmotor weinig invloed gehad. De duinen en het strand zijn hier wel zeewaarts verplaatst, maar dit kwam door de aanleg van de duinversterking in 2010.

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