

Sedimentbalans Delflandse Kust 2011-2021

Analyse van de morfologie bij de Zandmotor



Sedimentbalans Delflandse Kust 2011-2021
Analyse van de morfologie bij de Zandmotor

Auteur(s)

B.J.A. Huisman

E. Quataert

Sedimentbalans Delflandse Kust 2011-2021

Analyse van de morfologie bij de Zandmotor



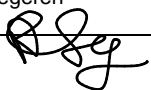
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	mevrouw C. van Gelder-Maas
Referenties	
Trefwoorden	Zandmotor, Morfologie, Sedimentbalans, Delfland, Kustlijnmodel

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	21-04-2021
Projectnummer	11201431-003
Document ID	11201431-003-ZKS-0013
Pagina's	47
Classificatie	
Status	concept Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Auteur(s)

	B.J.A. Huisman	
	E. Quataert	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	B.J.A. Huisman 	P.K. Tonnon 	A.G. Segeren 	
	E. Quataert			

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de sedimentbalans en morfologische ontwikkeling van de Delflandse kust met als doel de evaluatievragen van de Zandmotor met betrekking tot kustveiligheid (EF 1-1) te kunnen beantwoorden. Maar ook om informatie te geven voor de beantwoording van evaluatievragen over zwemveiligheid en ecologie van de Zandmotor.

In deze studie worden verschillende bathymetrische gegevens voor de Delflandse kust (i.e. jetski metingen, LiDAR, multibeam, vaklodingen en Jarkusprofielen) gebruikt om de volumeverandering in de duinen, het strand, brandingszone en diepe vooroever te kwantificeren alsmede de verplaatsing van duinvoet en de kustlijn. Een sedimenttransport model wordt gebruikt om meer inzicht te verkrijgen in de temporele variaties in kustlijnontwikkeling en sedimenttransport bij Scheveningen. Op basis van deze gegevens en het model is een sedimentbalans opgesteld, welke de basis vormt voor de beantwoording van de evaluatievragen.

Uit de studie komt naar voren dat er initieel sprake was van aanzienlijke erosie (-50 m/jaar) op de haak van de Zandmotor, wat leidde tot aanzanding op de flanken van de Zandmotor en direct aanliggende kust (5 tot 15 m/jaar). Door de tijd heen neemt de erosie- en aanzandingssnelheid af. Deze ontwikkeling kan vrijwel volledig verklaard worden door de bijdrage van het golfgedreven langstransport.

Bijna al het tussen 2011 en 2021 voor de Zandmotor en vooroeversuppleties aangebrachte sediment kon worden teruggevonden binnen het strand en de brandingszone van het deel van de Delflandse kust dat zuidelijk ligt van de haven van Scheveningen. Gedurende de beschouwde periode van 10 jaar is er door windtransport veel zand naar de duinen gegaan (in totaal 2 miljoen m³, wat neerkomt op 10% van het totaal gesuppleerd volume voor de Zandmotor. Daarnaast is er door golfgedreven stromingen en getij een (natuurlijk) zandtransport voorbij de haven van Scheveningen (gemiddeld 150.000 m³/jaar), wat over de beschouwde 10-jarige periode neerkomt op 7% van het gesuppleerde sediment. Dit noordwaarts transport blijft echter behouden binnen het kustfundament, maar als deel van de Rijnlandse kust.

Voor de lokale zandbalans bij de Zandmotor is het relevant dat het duinmeer en de lagune eolisch transport invangen, wat invloed heeft op de ontwikkeling van de huidige duinen en/of nieuwe embryonale duinontwikkeling. Ook kan er tijdens stormen door overwash nog een aanzienlijke hoeveelheid zand vanaf de landtong de lagune inspoelen, die hierdoor in grootte steeds verder afneemt. Op de diepe vooroever van de Zandmotor is er ook herverdeling van zand in kustlangse richting, wat lokaal geleid heeft tot sortering van het bodemsediment.

Deze studie legt de basis voor een beter inzicht in de processen die sediment van de Zandmotor herverdelen over de Delflandse kust. Om die reden draagt deze studie bij aan het begrip van de lange-termijn morfologische ontwikkeling van de Nederlandse kust. Zo kan de toekomstige onderhoudsbehoefte van de Nederlandse kust beter worden ingeschat én de wijze waarop megasuppleties hiervoor kunnen worden ingezet.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	6
1.1	Achtergrond	6
1.2	Ontwerp zandmotor	6
1.3	Evaluatievragen	7
1.4	Leeswijzer	8
2	Methodiek	9
2.1	Introductie	9
2.2	Data bronnen	9
2.3	Historie van suppleties Delfland	10
2.4	Deelgebieden	10
2.5	Analyse morfologische veranderingen	11
3	Morfologische veranderingen	15
3.1	Introductie	15
3.2	A1 : Beschrijving vormverandering Delflandse kust	15
3.3	A2 : Kwantificatie van morfologische verandering	21
3.3.1	Duinen	24
3.3.2	Strand	26
3.3.3	Brandingszone	29
3.3.4	Vooroever en diep water	30
3.4	A3 : Sedimenttransporten	32
3.5	A4 : Sedimentbalans Delflandse kust	38
4	Toetsing evaluatievragen	40
4.1	Evaluatievraag EF1-1a : Primaire waterkering	40
4.2	Evaluatievraag EF1-1b : Kustlijnontwikkeling	40
4.3	Evaluatievraag EF1-1c : Invloed op het kustfundament	41
4.4	Evaluatievraag EF2-1 : Fysische systeemkennis	41
4.5	Evaluatievraag EF2-2 : Meerwaarde voor de natuur	42
5	Conclusies	43
	Referenties	44

1 Introductie

1.1 Achtergrond

Tussen mei en juli 2011 is de grootschalige 'Zandmotor' suppletie geplaatst langs de Delflandse kust. Deze suppletie is er niet alleen op gericht om de kust te versterken met zand, maar ook om ruimte te bieden voor nieuwe (tijdelijke) natuur en recreatie. De Milieu Effect Rapportage (MER; PZH, 2010) stelt: "Als gevolg van de zeespiegelstijging kan de benodigde hoeveelheid zand voor het onderhoud van de Delflandse kust in de toekomst verdubbelen tot mogelijk 1 à 1,5 miljoen m³ per jaar. Tevens is geconstateerd dat er in de zuidelijke vleugel van de Randstad een groot tekort is aan recreatieruimte. Eén van de plaatsen waar de mogelijkheden voor recreatie kunnen worden versterkt, is de kust. Met de Zandmotor kan meer recreatie en natuurgebied samen gaan met het vergroten van de veiligheid". In de Projectnota / MER Zandmotor Delflandse Kust zijn de volgende doelstellingen geformuleerd:

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

1.2 Ontwerp zandmotor

De Zandmotor is aangelegd als een haakvormige suppletie met vooroeversuppleties aan beide zijden van de haak. In totaal is 21,5 miljoen m³ zand op de kust geplaatst. Het volume van de haak van de Zandmotor is in deze studie bepaald op 19 miljoen m³ op basis van een heranalyse van de bodemhoogte metingen bij de Zandmotor, waarbij de hele periode van midden 2010 tot eind 2011 is beschouwd. Een vergelijkbare analyse is gedaan om de volumes van de vooroeversuppleties vast te stellen. De noordelijke en zuidelijke vooroeversuppleties hadden een volume van respectievelijk 600.000 m³ en 1,7 miljoen m³. Een deel van het volume van de vooroeversuppleties is na het voltooiën van de haak aangebracht, in het najaar van 2011. Het extra verkregen oppervlak boven zeeniveau was na aanleg van de zandmotor circa 128 hectare. Dit gebied is bedoeld voor tijdelijke recreatie en natuurontwikkeling.



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

Aan de noordzijde van de Zandmotor is landwaarts van de 'haak' een lagune aanwezig, waar de beschutte ligging tegen golven en stroming zorgt dat er andere type ecologische habitat ontstaat dan op de onbeschermde kust. Tevens is een duinmeer aangelegd. Door de tijd heen wordt het zand van de Zandmotor langs de kust verspreid, waardoor ook de aanliggende kust versterkt wordt. Verwacht wordt dat er ook duinvorming plaats zal vinden aan de landwaartse kant van de Zandmotor.

1.3 Evaluatievragen

Ten behoeve van de concrete toetsing van de effecten van de Zandmotor zijn er evaluatievragen opgesteld die beschreven zijn in het Uitvoeringsprogramma (UVP) Monitoring en Evaluatie pilot Zandmotor (Tonnon et al, 2011) en recent enigszins bijgesteld om de vragen beter toetsbaar te maken (Taal et al., 2017; Huisman, 2021) wat onder andere betekende dat hypothesen zijn omgeschreven tot sub-evaluatievragen. De evaluatievragen hebben betrekking op 1) kustveiligheid, 2) fysische / ecologische kennisontwikkeling en innovatie, 3) het creëren van hoogwaardige natuur- en recreatiegebieden en 4) het beheer van het gebied (i.e. effecten van de Zandmotor op recreatieveiligheid, de natuurlijke omgeving, grondwater en infrastructuur). Om onderbouwde antwoorden te geven op de evaluatievragen is een monitoringprogramma opgesteld (Tonnon et al, 2011). Het monitoringprogramma beschouwd de morfologie, hydrodynamica, grondwater, sedimentsamenstelling, ecologie (vegetatie, bodemdieren en vogels), gebruik / recreatie en zwemveiligheid.

Deze rapportage richt zich op het onderbouwen van evaluatievraag EF 1-1 welke betrekking heeft op kustveiligheid.

- *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?*

Deze vraag wordt hier beantwoord middels de drie sub-vragen die zich richten de invloed op de primaire waterkering, kustlijnontwikkeling en kustfundament.

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

Hiervoor worden de gemeten bodemveranderingen over de periode 2011 t/m 2021 geanalyseerd én geïnterpreteerd in samenhang met berekende sedimenttransporten.

Aanvullend hierop wordt in deze studie informatie verzameld als basis voor de beantwoording van aanverwante vragen met betrekking tot fysische systeemkennis en ecologische meerwaarde van de Zandmotor:

- *EF2-1: Levert de Zandmotor nieuwe fysische kennis op waarmee kustonderhoud en een meerwaarde voor recreatie en natuur gezamenlijk te realiseren zijn?*
- *EF2-2: Heeft een megasuppletie als de Zandmotor een meerwaarde voor de natuur ten opzichte van reguliere suppleties? En waardoor wordt deze meerwaarde veroorzaakt?*

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de methodiek die gebruikt wordt voor de analyse van bodemveranderingen én aanvullende kennis over het fysische systeem uit numerieke modellen. De analyse van de bodemveranderingen en belangrijkste karakteristieken van de Delflandse kust worden in Hoofdstuk 3 beschreven, op basis waarvan een sedimentbalans is samengesteld. Aanvullende gegevens over sedimenttransporten uit numerieke modellen worden tevens uitgewerkt met als doel om informatie te verkrijgen over de ontwikkelingen op korte tijdschalen. De betekenis van de bevindingen voor de beantwoording van de evaluatievragen over kustveiligheid kan dan worden vastgesteld (Hoofdstuk 4). Ten slotte worden de conclusies beschreven in Hoofdstuk 5.

2 Methodiek

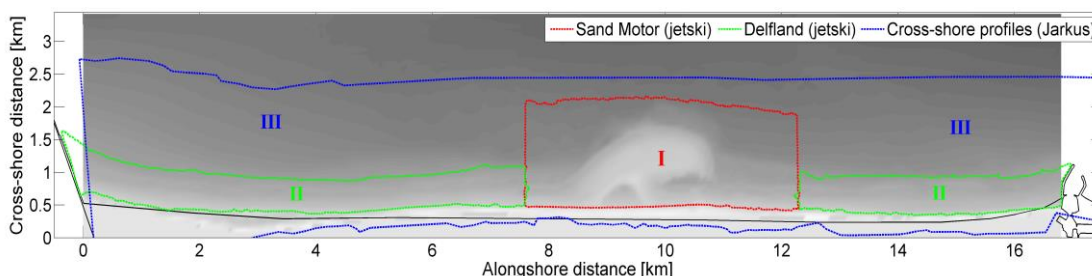
2.1 Introductie

De methodiek voor het beoordelen van de morfologische veranderingen op de Delflandse kust wordt in dit hoofdstuk beschreven. De gebruikte databronnen worden beschreven in Paragraaf 2.2. Paragraaf 2.3 en 2.4 geven een overzicht van de historie van de suppleties op de Delflandse kust en deelgebieden zoals gedefinieerd door Tonnon & Nederhoff (2016). In Paragraaf 2.5 wordt de analyse methode beschreven.

2.2 Data bronnen

Het monitoringprogramma van de Zandmotor bestaat uit het inwinnen van bodemhoogte metingen met een boot of jetski op de vooroever, een quad op het droge strand, een kar voor doorwaadbare gebieden én LiDAR surveys voor de duinen. In de eerste twee jaar na aanleg van de Zandmotor werden maandelijkse surveys uitgevoerd van de Zandmotor (zie gebied I in Figuur 2.1), welke vanaf het derde jaar tweemaandelijks zijn geworden. In de laatste monitoringjaren (2017 tot 2021) zijn drie bodemhoogte metingen per jaar uitgevoerd in het Zandmotor gebied. In oktober 2018, 2019 en 2020 is zeewaarts een iets ruimer gebied bemeten in de jetski metingen (tot NAP -14m). Voor de jaren 2013 t/m 2016 zijn er tweemaandelijks metingen uitgevoerd voor de aanliggende kust van Delfland (zie gebied II).

In aanvulling hierop worden de reguliere kustdwarse profielmetingen van Rijkswaterstaat voor de Nederlandse kust twee maal per jaar uitgevoerd (in plaats van jaarlijks). Tevens zijn deze metingen lokaal verdicht ter plaatse van de Zandmotor (i.e. 50 tot 100 m afstand kustlangs) en verlengd tot circa MSL -13.6m (zie gebied III in Figuur 2.1). In diep water zijn multibeam metingen beschikbaar die vanaf een boot zijn opgenomen voor de jaren 2011 en 2015. Deze multibeam metingen zijn echter uitgevoerd voor een zeer beperkte aantal dwarsraaien (circa 1 kilometer uit elkaar in kustlangse richting) waardoor de bruikbaarheid hiervan beperkt is.



Figuur 2.1 Overzicht van morfologische metingen

De gegevens van de verschillende databronnen zijn gecombineerd om zo kaarten van de bodemligging te verkrijgen op alle momenten dat een jetski survey beschikbaar is bij de Zandmotor. Bij het interpoleren van de databronnen krijgt de Jetski (single-beam) data, bij de Zandmotor of voor de Delflandse kust, voorrang op de JARKUS data. Deze JARKUS data wordt daarom met name voor dieper water buiten de brandingszone gebruikt (i.e. < -10m NAP bij de Zandmotor en < -6m NAP op de rest van de Delflandse kust) Eventuele ontbrekende bodemgegevens worden aangevuld met 'vaklodgingen' en 'LiDAR' surveys.

De data zijn geïnterpoleerd op een 30x30 m grid voor elk van de surveys afzonderlijk. Ten behoeve hiervan is een concave omhullende gemaakt van de (locaties van de)

bodemmetingen, waarbij gaten in de bathymetrische samples die groter zijn dan 2x de gemiddelde afstand tussen individuele samples worden uitgesloten van de interpolatie. Na het interpoleren van de individuele surveys, worden de gaten in de bathymetrie gevuld door metingen lineair in de tijd te interpoleren.

2.3 Historie van suppleties Delfland

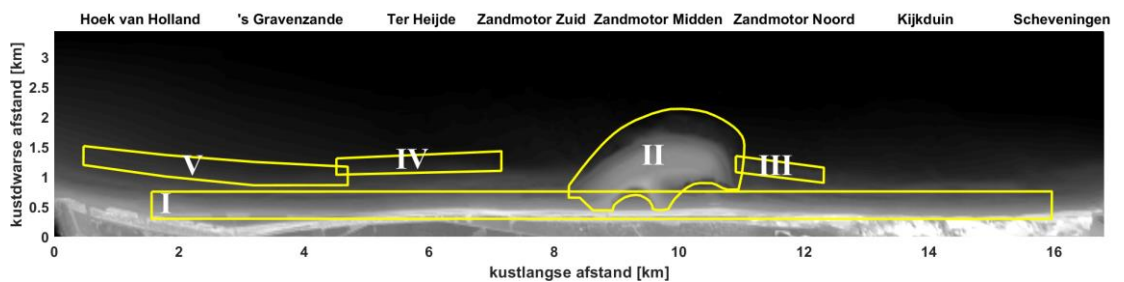
Een overzicht van deze ingrepen op de Delflandse kust is weergegeven in Tabel 2.1 en Figuur 2.2. Voor aanleg van de Zandmotor is de 'Kustversterking Delfland' uitgevoerd in de periode 2007 tot 2010, waarbij de duinen aanzienlijk zeewaarts zijn verplaatst (zie I in Figuur 2.2). De Zandmotor is in 2011 aangelegd. Het volume van de haak van de Zandmotor is in deze studie bepaald op 19 miljoen m³ (II in Tabel 2.1 en Figuur 2.2) op basis van een her-analyse van de bodemhoogtemetingen bij de Zandmotor, waarbij de hele periode van midden 2010 tot eind 2011 is beschouwd. Samen met de Zandmotor zijn ook twee vooroever-suppleties gerealiseerd van respectievelijk 0,6 miljoen m³ en 1,7 miljoen m³ (respectievelijk III en IV in Tabel 2.1 en Figuur 2.2), waarvoor een vergelijkbare analyse is gedaan van het suppletievolume op basis van de bodemhoogtemetingen. Opgemerkt moet worden dat de vooroever-suppleties deels na het voltooiën van de haak (na augustus 2011) zijn aangebracht in het najaar van 2011. Voor de noordelijke en zuidelijke vooroever-suppletie wordt het na augustus 2011 aangebrachte volume geschat op 0,1 en 1,2 miljoen m³. In 2013 is er ter hoogte van Hoek van Holland een vooroever-suppletie van 1,5 miljoen m³ uitgevoerd (V in Tabel 2.1 en Figuur 2.2).

Tabel 2.1 - Suppleties uitgevoerd in Delfland voor de periode van 2011 tot 2021.

	Locatie	Datum	Volume [10 ⁶ m ³]	Lengte [m]	Type
I	Kustversterking Delfland	04/2007 – 03/2010	15	13500	Duin
II	Kijkduin-Ter Heijde	03/2011 – 08/2011	19	1890	Strand
III	Kijkduin-Ter Heijde	06/2011 – 09/2011	0,6 ^{*1}	2160	Vooroever
IV	Kijkduin-Ter Heijde	07/2011 – 10/2011	1,7 ^{*2}	2180	Vooroever
V	Hoek van Holland	07/2013 – 10/2013	1,5	4000	Vooroever

*1 : waarvan 0,1 miljoen m³ na aanleg van de Zandmotor is gesuppleerd.

*2 : ongeveer 1,2 miljoen van deze suppletie is na aanleg van de Zandmotor aangebracht



Figuur 2.2 De locatie van de uitgevoerde suppleties in Delfland van 2011 tot 2021.

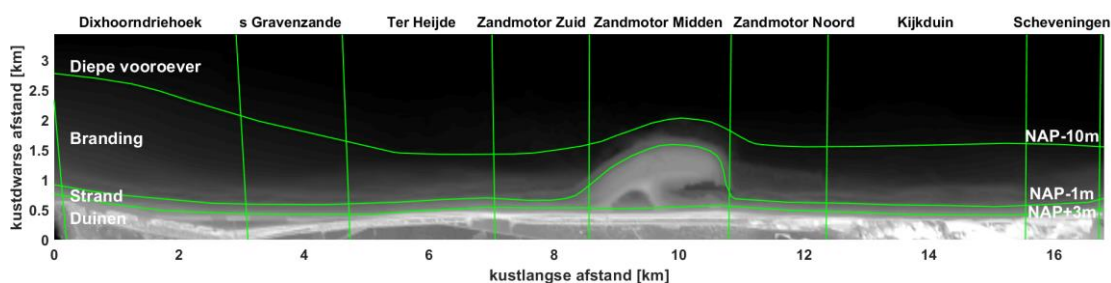
2.4 Deelgebieden

Eerst wordt er in de morfologische analyse een totaalbeeld gevormd voor de gehele Delflandse kust, waarna ingezoomd wordt op de ontwikkeling van afzonderlijke kustlengte deelgebieden en dieptezones. Ten slotte wordt er ingaan op de ontwikkeling van specifieke gebieden waarin de meest kenmerkende morfologische ontwikkelingen hebben plaatsgevonden.

Er worden acht kustlangse deelgebieden onderscheiden in dit rapport (conform Tonnon & Nederhoff, 2016), waarvan de Zandmotor er drie beslaat, zie Tabel 2.2 en Figuur 2.3. In kustdwarse richting wordt onderscheid gemaakt tussen vier dieptezones. Boven NAP +3m zijn er de duinen, tussen NAP-1m en +3m het strand, tussen NAP-10m en NAP-1m bevindt zich de actieve zone met de branding en diepe vooroever bevindt zich dieper dan NAP -10m.

Tabel 2.2 - Deelgebieden zoals gebruikt in deze studie (van Zuid naar Noord)

Deelgebied	Naam	Startraai	Eindraai	Lengte
1	Van Dixhoorndriehoek	11586	11870	2950
2	's Gravenzande	11412	11560	1640
3	Ter Heijde	11176	11394	2330
4	Zandmotor Zuid	11034	11147	1510
5	Zandmotor Midden	10807	10996	2240
6	Zandmotor Noord	10653	10773	1555
7	Kijkduin	10338	10623	3185
8	Scheveningen Zuid	10200	10288	1180



Figuur 2.3 Overzicht van deelgebieden langs de kust

2.5 Analyse morfologische veranderingen

De analyses in deze rapportage bestaan uit een beschrijving van kenmerkende morfologische ontwikkelingen bij de Zandmotor (A1), een kwantificering van de volumeveranderingen van de duinen, het strand, brandingszone en diepe vooroever (A2), bepaling van sedimenttransport met een kustlijnmodel (A3) en een zandbalans voor het kustfundament (A4).

A1 Beschrijving vormverandering Delflandse kust (Paragraaf 3.2)

De meest kenmerkende ontwikkelingen van de morfologie van de Zandmotor en Delflandse kust worden beschreven op basis van de morfologische data voor de periode van augustus 2011 (na de aanleg van de Zandmotor) tot en met januari 2021. Het primaire doel van deze analyse is om de grootschalige ontwikkelingen te identificeren die bepalend zijn voor de evaluatie van de invloed van de Zandmotor op kustveiligheid (EF 1-1). In de onderdelen A2 en A3 wordt een kwantificatie gegeven van de volumeveranderingen. Tevens dient de beschrijving van de morfologische kenmerken als informatie voor aanvullende onderzoeksvragen met betrekking tot de kennis van het fysische systeem (EF 2-1), ecologie van de Zandmotor (EF 2-2) én ontwikkeling van tijdelijke natuur op de Zandmotor (EF 3-1b). Karakteristieke ontwikkelingen die worden beschreven zijn 1) de erosie van de haak van de Zandmotor, 2) ontwikkeling van de lagune, het duinmeer en toegangskanaal 3) vormverandering van zandbanken en 4) verspreiding van vooroeversuppleties.

De erosie aan de buitenzijde van de haak van de Zandmotor wordt geïllustreerd op basis van de ligging van de dieptecontouren (op NAP -1m en NAP -5m) en de vormveranderingen van de dwarsprofielen. Dit laat zien op welke locaties (zowel kustlangs als kustdwars) het sediment van de Zandmotor geërodeerd en afgezet wordt. Dit onderdeel draagt bij aan zowel de kustveiligheidsvragen (EF1-1) als de fysieke systeemkennis van de Zandmotor (i.e. EF2-1a).

De ontwikkeling van de lagune, het duinmeer en de toegangseul worden beschouwd gebruik makend van contourplots van bodemhoogte. Het oppervlak van de lagune en het duinmeer worden bepaald als additionele informatie ten behoeve van de analyse van de bodemdiergemeenschap in de lagune (EF3-1b).

De ontwikkeling van de zandbanken bij de Zandmotor kwalitatief beschreven ten behoeve van de evaluatie van de zwemveiligheid (EF 2-1b).

Daarnaast wordt de morfologische ontwikkeling van de vooroeversuppleties bij Ter Heijde (2011; met volume van 1,7 miljoen m³) en Hoek van Holland (2013; met volume van 1,5 miljoen m³) toegelicht. De bijdrages van deze vooroeversuppleties zijn belangrijk voor de interpretatie van de omgevingsinvloed van de Zandmotor, omdat de invloedzones van de vooroeversuppleties overlappen met de invloedzone van de Zandmotor.

A2 Kwantificatie van volumeveranderingen (Paragraaf 3.3)

Op basis van de gemeten bodemhoogte veranderingen zijn de morfologische ontwikkelingen van de duinen (i.e. primaire waterkering; EF1-1a). Hiervoor is de periode van Augustus 2011 tot en met januari 2021 beschouwd voor de in vorige paragraaf genoemde kustlangse deelgebieden van de Delflandse kust (zie Figuur 2.3). Er is zowel naar de (meer)jaarlijkse positie als naar de trendmatige ontwikkeling gekeken voor de Zandmotor. Als referentie wordt vergeleken met de periode 1) voor aanleg van de Zandmotor en de Kustversterking Delfland (1990-2007) en 2) voor het begin van het suppletieprogramma (1975-1990). Voor deze referentieperiodes wordt dezelfde informatie gebruikt als door Tonnon & Nederhoff (2016). De periode 2007-2011 wordt niet beschouwd omdat deze de aanleg van de Kustversterking Delfland, Duincompensatie en Zandmotor bevat.

De zandtoename in de primaire waterkering (EF1-1a) wordt vastgesteld door de trend te bepalen in het duinvolume, de positie van de duinvoet te bepalen én de ligging van de afslaglijnen te bepalen. De indicatoren 'duinvolume', 'duinvoet positie' en 'afslaglijnen' worden beschreven (zie Tonnon & Nederhoff, 2016).

Het toevoegen van zand aan het strand en brandingszone (EF1-1b) is getoetst door de verandering in de momentane kustlijn (MKL) vast te stellen voor de Delflandse kust ten opzichte van de basiskustlijn (BKL). Hierbij is rekening gehouden met de in de beschouwde periode (van augustus 2011 t/m 2021) uitgevoerde suppleties. De indicatoren MKL en BKL en strandbreedte worden beschreven in de volgende paragraaf.

De volumeveranderingen op de diepe vooroever zijn bepaald op basis van de bodemhoogte gegevens van multibeam surveys ('vaklodingen') en kustdwarse profielmetingen (verlengde 'Jarkusraaien') over de periode augustus 2011 tot januari 2021.

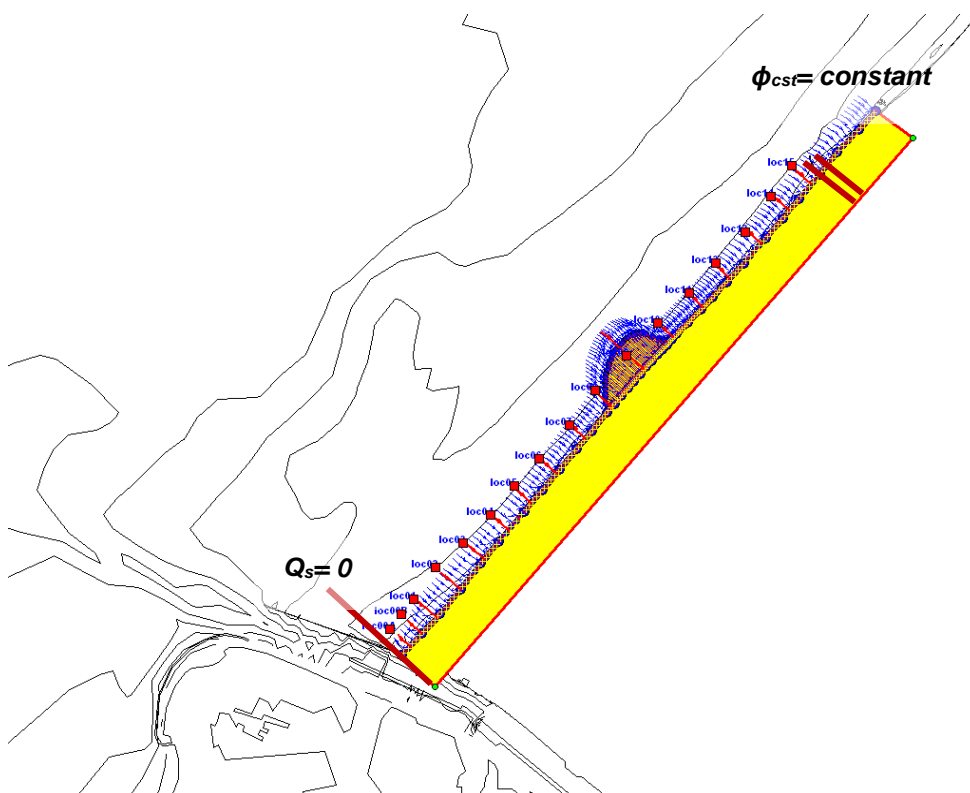
A3 Invloed van Zandmotor op transporten (Paragraaf 3.4)

Aanvullend aan de data-analyse is een kustlijnmodel (UNIBEST-CL+) toegepast dat het langsgedreven transport berekend langs de Delflandse kust (zie Figuur 2.4). Doel van deze analyse is om:

- 1 Inzicht te krijgen in korte termijn morfologische veranderingen.
- 2 Het langstransport op de Delflandse kust te kwantificeren.

3 Te begrijpen hoe golfcondities bijdragen aan sedimentherverdeling.

Het kustlijnmodel transporteert zand alleen langs de kust en niet in kustdwarse richting. De startkustlijn van het model is bepaald op basis van de MKL posities van de Jarkusraaien voor augustus 2011. De gridresolutie van het model is ~125 meter, terwijl een actieve hoogte van 8.5 meter wordt toegepast. JARKUS profiel gegevens van augustus 2011 zijn gebruikt voor het afleiden van 17 kustdwarse profielen in het model, welke gelijkmatig verdeeld zijn over de Delflandse kust (van Hoek van Holland tot Scheveningen haven). De kustdwarse profielen hebben een zeewaartse rand op NAP -8 m. Een tijdserie van nearshore golfcondities op 8 m waterdiepte is bepaald voor elk van deze kustdwarse profielen voor de periode 2011 t/m 2021, welke herleidt zijn uit een hiervoor opgezet Delft3D-wave model voor de Nederlandse kust.



Figuur 2.4 Overzicht van het toegepaste kustlijnmodel met positie van lokale klimaatpunten en dwarsraaien.

Het model gebruikt de gemiddelde zeeffkromme voor de Zandmotor zoals deze is vastgesteld door Huisman et al. (2016). De mediane korreldiameter (D_{50}) is 278 μm , terwijl de 10 en 90 percentiel waarde van de korreldiameter 151 en 482 μm bedragen. De transportcapaciteit in het model is gekalibreerd door voor de Delflandse kust een reductie van 35% toe te passen op de berekende transporten met TRANSPOR2004 (Van Rijn, 2007a/b). Dit is in lijn met bijvoorbeeld de Delft3D studies voor de Zandmotor waarin een reductie van 50% werd toegepast op het transport (Luijendijk et al., 2021; Huisman et al., 2021). Uitgangspunt voor de randvoorwaarden is verder dat er geen transport is vanuit het Zuiden ($Q_s=0$) terwijl de kusthoek aan de noordzijde ter plaatse van Scheveningen strand gelijk blijft in de tijd. Bij Scheveningen is een havendam toegevoegd die het transport ten dele blokkeert (afhankelijk van de optredende golfconditie).

Er zijn drie zandsuppleties (van na aanleg van de Zandmotor) in het model meegenomen. Het deel van het volume van de zuidelijke en noordelijke vooroeversuppletie van de Zandmotor dat

na aanleg van de Zandmotor is geplaatst wordt respectievelijk geschat op 1,2 miljoen m³ en 0,1 miljoen m³ (zie Tabel 2.1). Daarnaast is er in 2013 een vooroeversuppletie geplaatst van 1,5 miljoen m³ bij Hoek van Holland en 's Gravenzande. In totaal betreft dit een volume van Zowel de berekeningen van het langstransport (met Unibest LT) als de kustlijnberekeningen (met UNIBEST CL) zijn over de periode van augustus 2011 tot oktober 2021 uitgevoerd.

De met het model berekende kustlijnposities zijn gevalideerd met de gemeten kustlijnen over de beschouwde periode (2011-2021). Tevens zijn scatterplots gemaakt van de jaarlijkse volumeverandering in de kustlangse deelgebieden (zie Figuur 2.3).

Het gevalideerde model is hierna gebruikt om de invloed van individuele golfcondities op de verspreiding van zand vanaf de Zandmotor te onderbouwen. Doel is dat deze informatie bijdraagt bij aan de fysische systeemkennis van de Zandmotor (EF2-1a).

A4 Sedimentbalans (Paragraaf 3.5)

De bijdrage van de Zandmotor aan het kustfundament (evaluatievraag EF1-1c) wordt getoetst door een zandbalans op te stellen voor de Delflandse kust. Er wordt hierin onderscheid gemaakt tussen de kustdwarse en kustlangse deelgebieden (Figuur 2.3). Er is een zandbalans gemaakt voor zowel de initiële (augustus 2011 tot augustus 2012) als meerjarige volumeverandering van het kustfundament (voor de periode augustus 2011 tot januari 2021).

3 Morfologische veranderingen

3.1 Introductie

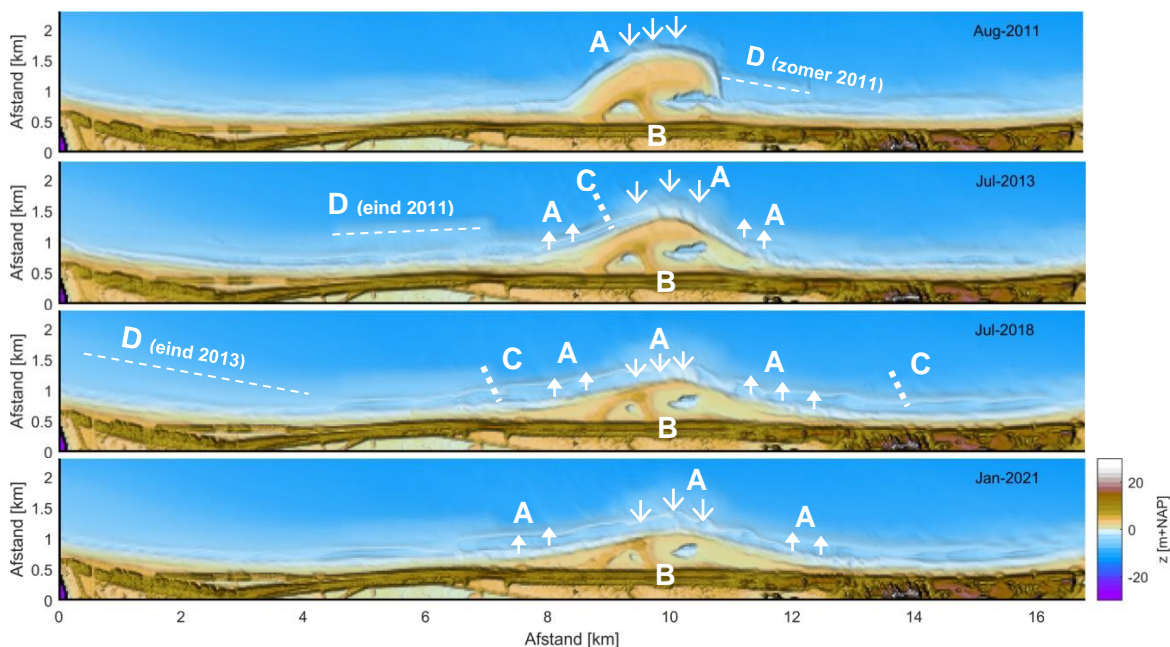
De ontwikkeling van de morfologie van de Delflandse kust over de periode na aanleg van de Zandmotor (2011 t/m 2021) wordt in dit hoofdstuk beschreven. In-situ bodemhoogte metingen van de Zandmotor inclusief aanliggende Delflandse kust (met single-beam Jetski metingen op zee en RTK-gps op land) zijn gecombineerd met halfjaarlijkse kustprofielmetingen van Rijkswaterstaat. Aanvullend is gebruik gemaakt van LiDAR data in de duinen en multibeam raaimetingen op de vooroever (zie ook Paragraaf 2.2). In dit hoofdstuk wordt achtereenvolgens het volgende beschreven:

- Kwalitatieve beschrijving van morfologische ontwikkelingen (Paragraaf 3.2).
- Kwantificatie van de volumeontwikkeling in deelgebieden (Paragraaf 3.3).
- Berekende langstransporten (Paragraaf 3.4)
- Sedimentbalans voor de Delflandse kust (Paragraaf 3.5).

3.2 A1 : Beschrijving vormverandering Delflandse kust

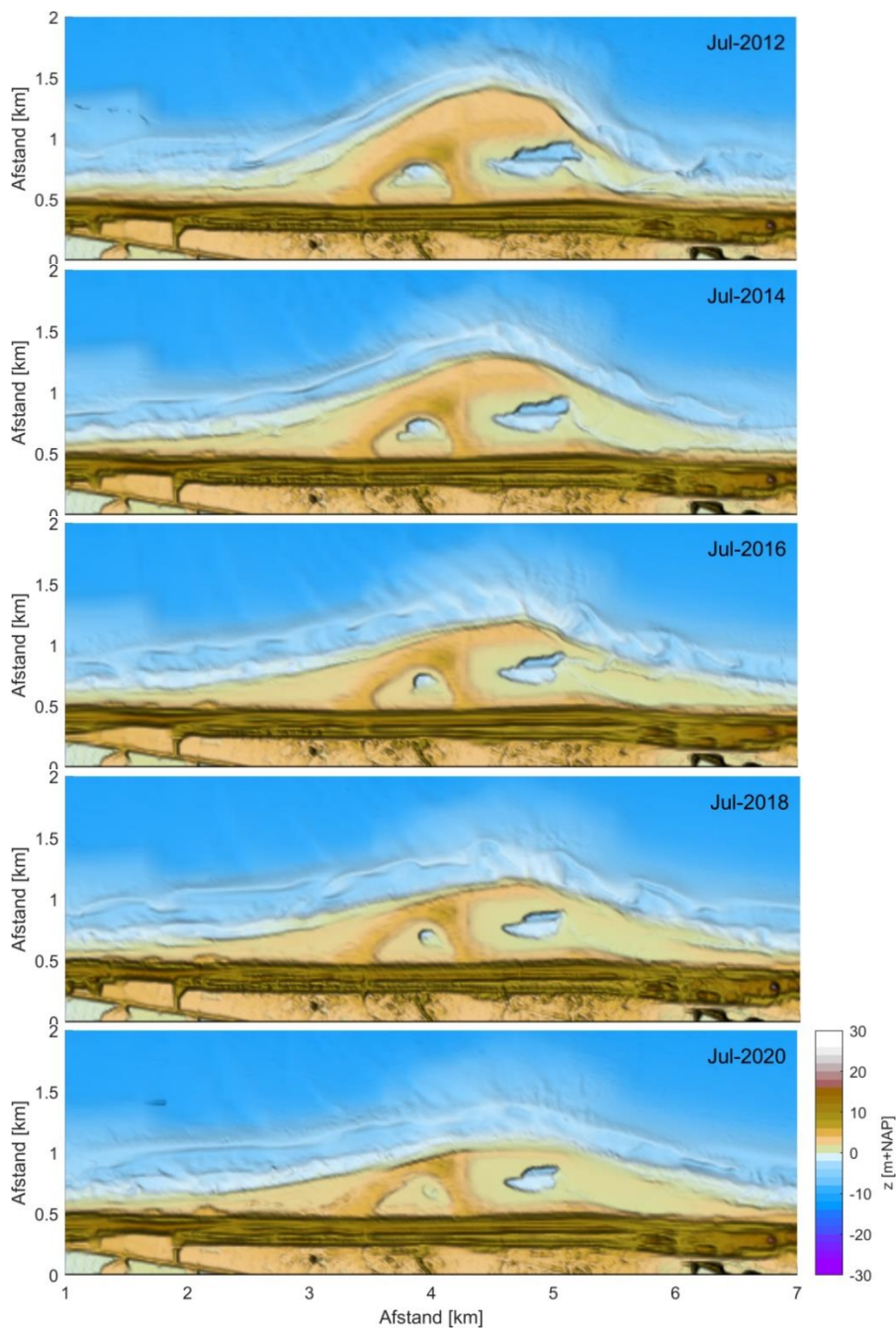
De ontwikkeling van de bodemligging van de Delflandse Kust na aanleg van de Zandmotor wordt weergegeven in Figuur 3.1. De ontwikkeling van het gebied wordt gekenmerkt door:

- A : Erosie van de Zandmotor en aanzanding op omliggende kust (i.e. landtong)
- B : Morfologische verandering van duinmeer, lagune en toegangskanaal
- C : Ontstaan van complexe zandbanken
- D : Plaatsing en morfologische ontwikkeling van vooroeversuppleties



Figuur 3.1 Bodemligging Delflandse Kust vlak na aanleg van de Zandmotor voor vier momenten in de tijd (augustus 2011, juli 2013, juli 2021 en januari 2021) inclusief kenmerkende ontwikkelingen en aanlegdatum. A t/m D corresponderen met in de tekst genoemde ontwikkelingen van de Zandmotor en vooroeversuppleties.

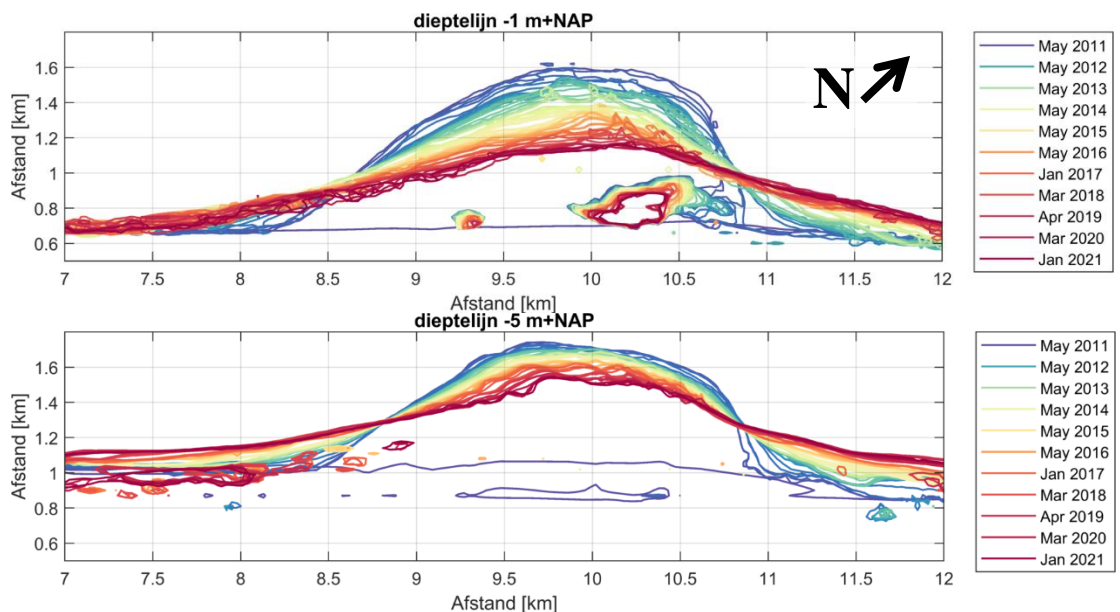
Over de afgelopen tien jaar is de Zandmotor sterk van vorm veranderd, waarbij de breedte in kustdwarse richting is verkleind en de lengte in kustlangse richting vergroot (Figuur 3.2). Ook valt op dat de haak steeds smaller wordt. Ter plaatse van de lagune is de haak in 2020 bijna volledig is verdwenen.



Figuur 3.2 Bodemligging Zandmotor tussen 2012 en 2020 in juli

De vormverandering van de Zandmotor is ook goed te zien in de ontwikkeling van de -1m NAP dieptelijne over de afgelopen tien jaar (Figuur 3.3). In het eerste jaar na de aanleg verandert de vorm van de Zandmotor sterk (zie blauwe lijnen). In januari 2021 heeft ruim 500 meter erosie plaats gevonden op het meest zeewaartse punt van de Zandmotor ter plaatse van de waterlijn.

Tevens is dit punt in noordelijke richting verplaatst. Vanaf 2016 is de erosie op de -1m NAP dieptelijn echter aanzienlijk kleiner dan in de eerste 5 jaar na aanleg. Ook in de diepere contouren, zoals de -5 m NAP dieptelijn in Figuur 3.3, is de afvlakking van de vorm van de Zandmotor te zien (~200 meter in 2021). De kop van de Zandmotor verplaatst zich op de -5m NAP dieptelijn echter minder snel landwaarts dan de -1m NAP dieptelijn.

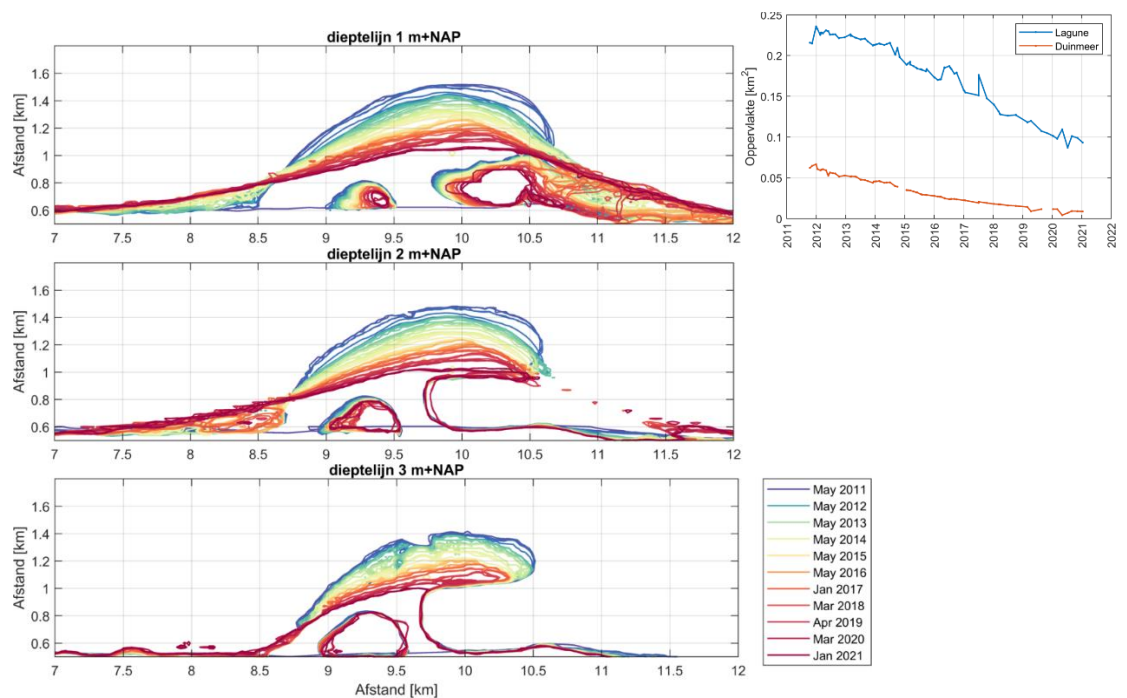


Figuur 3.3 Bodemligging Delflandse Kust vlak na aanleg van de Zandmotor (augustus 2011) tot en met januari 2021.

Zand van de kop van de Zandmotor wordt langs de kust verplaatst in noordelijke en zuidelijke richting, als gevolg waarvan zich aan de noordzijde een landtong ('spit') ontwikkeld. Het aanzandingsgebied op de omliggende kust blijft zich in de jaren erna uitbreiden. Aan de noordzijde is sprake van aanzienlijke aanzanding (tot 300 meter in de periode van 2011 tot 2021). Een deel van deze aanzanding is echter gerelateerd aan de vooroeversuppletie (Volume 600.000 m³) welke in de zomer van 2011 aan de noordzijde van de Zandmotor is geplaatst op 3 tot 8 meter waterdiepte. De aanzanding aan de zuidzijde van de Zandmotor op de -1m NAP dieptelijn (maximaal circa 200 meter) vond voornamelijk plaats in de eerste 2 jaar na aanleg van de Zandmotor, terwijl de NAP -5m contour geleidelijk aanzandt over de beschouwde periode. In de latere jaren is de verandering in de -1m NAP dieptelijn ook gerelateerd aan de migratie van zandbanken.

Door de groei van de landtong aan de noordzijde van de Zandmotor is een lagune ontstaan (Figuur 3.2) die via een geul in verbinding staat met de zee. Daarnaast is in 2011 een duinmeer aangelegd aan de zuidzijde van de Zandmotor. De omtrek van zowel de lagune als het duinmeer is in de afgelopen tien jaar kleiner geworden (Figuur 3.4), wat het gevolg is van het invangen van door de wind getransporteerd zand (Hoonhout en de Vries, 2017). Deze afname van het oppervlak is met name duidelijk aanwezig rond de +1m NAP dieptelijn, maar ook aanwezig op de -1m NAP dieptelijn (Figuur 3.3). De locatie en omtrek van de lagune en duinmeer bij de +3m NAP dieptelijn veranderen echter nauwelijks. Er ontstaat dus een vrij vlak gebied net boven NAP. De overheersende zuidwestelijke windrichting én aanvoer van zand in het intergetijdegebied zorgen er voor dat de lagune en het duinmeer met name aan de zuidwestzijde opvullen. Het duinmeer en de lagune vangen eolisch transport af dat anders ten

goede zou komen aan de ontwikkeling van de huidige duinen en/of nieuwe embryonale duinontwikkeling.



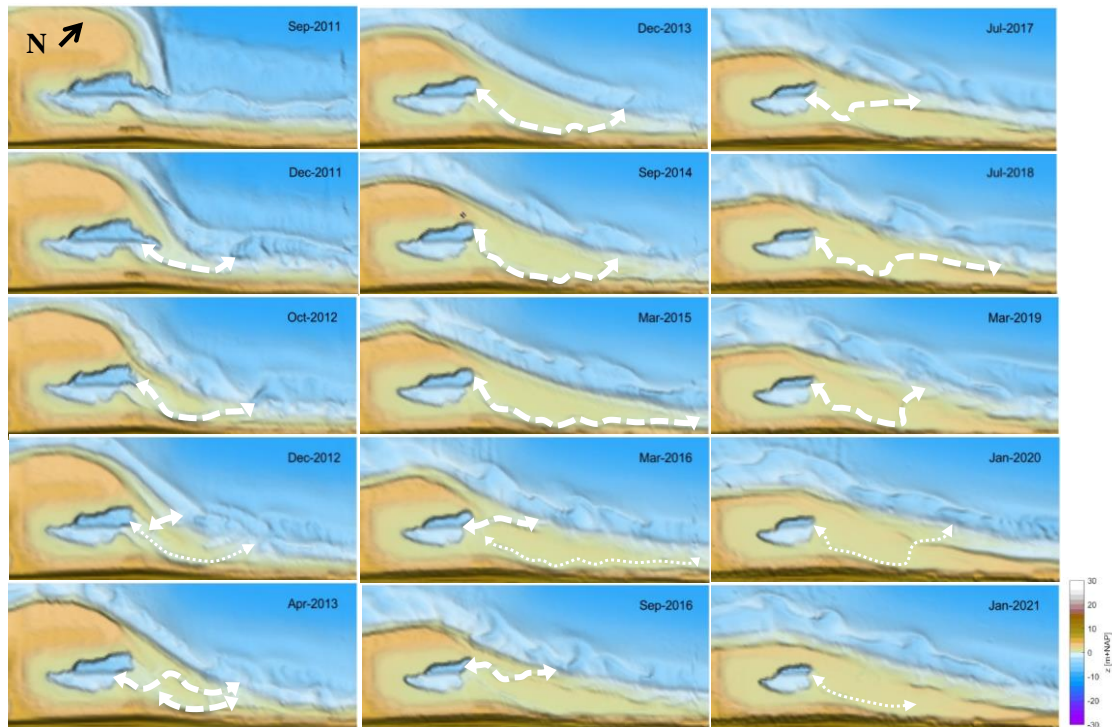
Figuur 3.4 Ontwikkeling van de 1, 2 en 3m NAP dieptelijn over de 10 jaar na aanleg van de Zandmotor. Het oppervlak van de lagune en het duinmeer wordt voor de 1m NAP dieptelijn weergegeven.

Na het afsluiten van de lagune door de landtong van de Zandmotor heeft zich een geul ontwikkeld aan de noordflank van de Zandmotor die de lagune met de zee verbindt (Figuur 3.5). De (hoofd)geul ontstaat in de eerste maanden na aanleg van de Zandmotor en loopt langs het reeds bestaande strand noordelijk van de Zandmotor. In het eerste jaar na aanleg is de geul smal, diep en relatief kort. Met het uitspreiden van het sediment van de Zandmotor wordt de geul langer (1200 m in oktober 2012, 1500 m in maart 2015 en 2000 m in juli 2018) en steeds ondieper.

Op twee momenten in de afgelopen tien 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 3.5). In beide gevallen migreert de tweede geul vervolgens noordwaarts richting het strand en verdwijnt ten slotte wanneer deze te dicht bij de dicht bij het strand liggende hoofdgeul komt.

Langs de gehele Delflandse kust zijn in de ondiepe kustzone (-1 tot -8 m NAP) verschillende bankpatronen te zien (Figuur 3.6). Radermacher et al. (2021) laat zien dat er als gevolg van zandsuppleties in de afgelopen 40 jaar steeds meer zandbanken zijn op de Delflandse kust, aangezien er voor het suppletieprogramma vrijwel geen zandbanken waren. Ook de Zandmotor heeft effect op de zandbanken. Op de zuidelijke flank van de Zandmotor is in de eerste jaren na aanleg van de Zandmotor (2012 tot 2014) een langgerekte kustlangse bank te zien (Figuur 3.6). Aan de noordflank is het bankpatroon in de eerste twee jaren meer onregelmatig en vertoont variabiliteit in de kustlangse richting. In juli 2014 is er aan zowel de noord- als zuidflank een kustlangs uniforme zandbank te zien. Vanaf juli 2015 verandert dit vervolgens in een bankenpatroon met veel kustlangse variabiliteit voor beide flanken, afgezien van de zuidflank in juli 2017. Een verklaring voor dit complexe bankengedrag rondom de Zandmotor wordt gegeven door Rutten et al. (2017) op basis van camerabeelden van het gedrag van de zandbanken rondom de Zandmotor voor de periode tussen maart 2013 en juli

2015. Zij concludeerden dat de kustlangse variabiliteit van de banken (vorm, diepte en afstand tot de kustlijn) verschillend is voor de noord- en zuidflank van de Zandmotor en voornamelijk gedreven wordt door de invalhoek van de golven ten opzichte van de kustlijn. De kustlangse variabiliteit van banken aan de noordflank nam toe gedurende een langere periode met vanuit het noorden komende golven in de zomer (i.e. loodrecht op de noordelijke flank), terwijl aan de zuidflank de variabiliteit toenam na enkele kortdurende zuidwestelijke stormen. Bij zijdelings invallende golven nam de kustlangse variabiliteit aan beide flanken af.

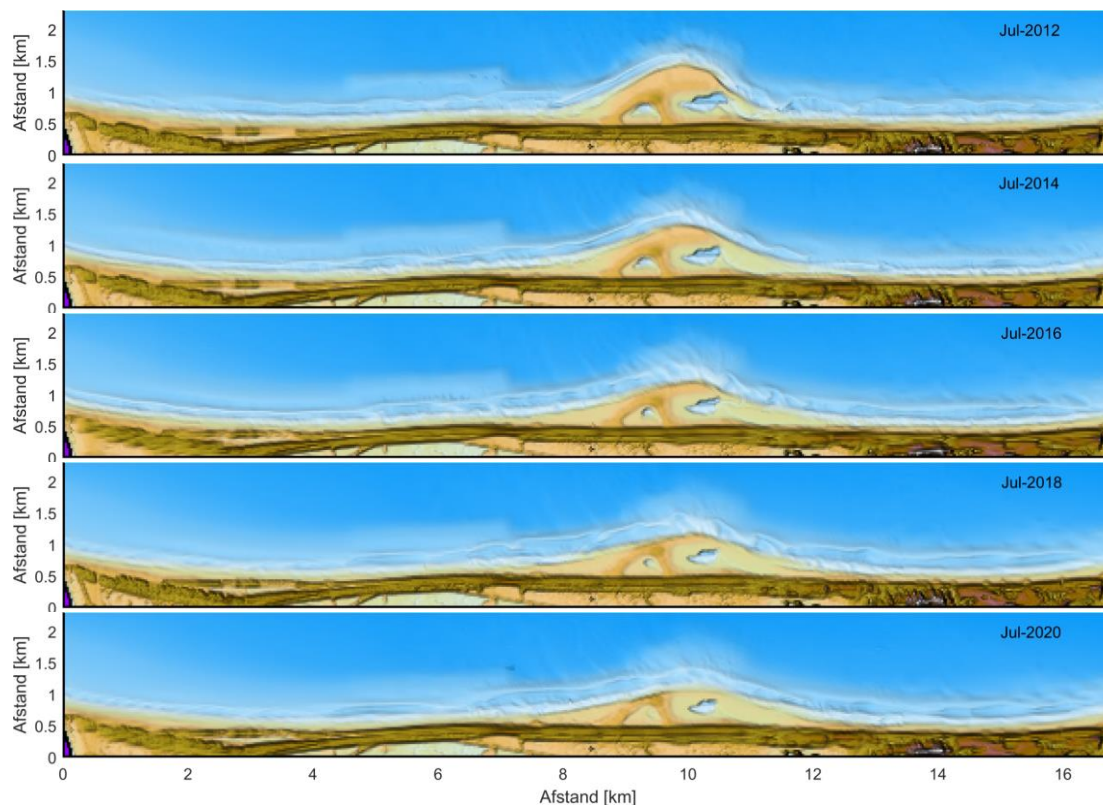


Figuur 3.5 Ontwikkeling van de geul aan de noordflank van de Zandmotor in de afgelopen 10 jaar.

Ten noorden van de Zandmotor, bij Kijkduin en Scheveningen, is in de periode na aanleg van de Zandmotor een grotere kustlangse variabiliteit van de banken aanwezig (zie juli 2012 in Figuur 3.6). Vanaf 2014 ontwikkeld zich echter weer een langgerekte kustlangse bank.

Ten zuiden van de Zandmotor zien we bij ter Heijde een ander bankenpatroon dan bij de Van Dixhoorndriehoek en 's Gravenzande. Bij ter Heijde wordt een grotere kustlangse variabiliteit waargenomen sinds de aanleg van de Zandmotor (en vooroeversuppleties). Opmerkelijk is dat de zandbanken bij de Van Dixhoorndriehoek en 's Gravenzande dichter bij de kust liggen. Direct na aanleg van de vooroeversuppletie (eind 2013) wordt er bij de Van Dixhoorndriehoek en 's Gravenzande tijdelijk minder kustlangse variabiliteit waargenomen in het bankenpatroon (zie de zuidelijke deelgebieden in juli 2014 in Figuur 3.6).

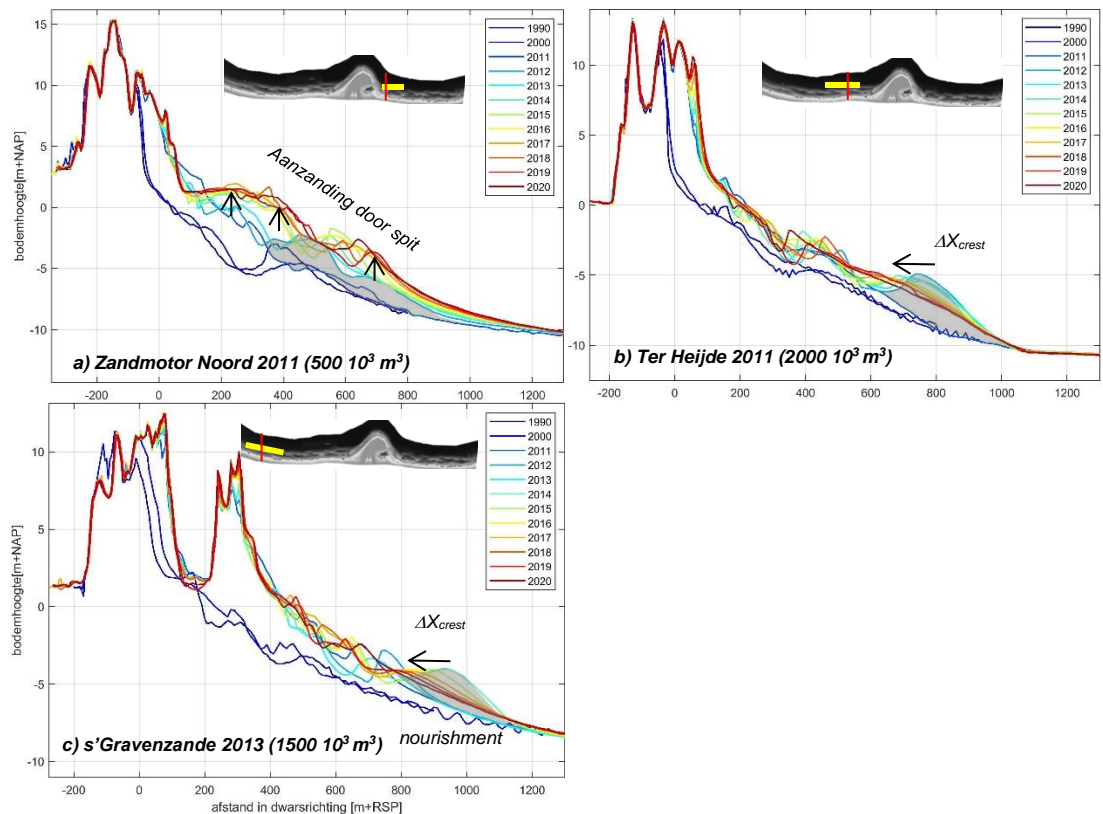
Naast de aanleg van de Zandmotor wordt verondersteld dat ook de vooroeversuppleties in 2011 en 2013 invloed hebben gehad op de morfologische ontwikkeling van de brandingszone. Radermacher et al. (2021) onderzochten het effect van beide type suppleties op het bankengedrag langs de Delflandse kust. Zij concluderen dat in de tijd dat er niet werd gesuppleerd zeer weinig kustlangse variabiliteit in de zandbanken aanwezig was. De aanleg van de Zandmotor resulteerde in de formatie van zandbanken met hoge kustlangse variabiliteit en grotere verschillen in kustlangs gedrag.



Figuur 3.6 Bodemligging Delflandse Kust na aanleg van de Zandmotor (juli 2012) tot en met juli 2020.

Vooroeversuppleties worden over het algemeen zeewaarts aangelegd van de bestaande banken én duwen de bestaande banken richting de kust. Dit geldt ook voor twee van de vooroeversuppleties die in de beschouwde periode (2011-2021) op de Delflandse kust zijn aangelegd. In Figuur 3.7b en Figuur 3.7c valt te zien dat de kruin van zowel de suppletie bij Ter Heijde (najaar 2011) als bij 's Gravenzande (najaar 2013) richting de kust migreert. Verondersteld wordt dat deze vooroeversuppleties een geleidelijke bijdrage leveren aan de zandbalans van de ondiepe brandingszone (Van Duin et al., 2004). De vooroeversuppletie die noordelijk van de Zandmotor werd geplaatst is echter al op korte termijn begraven onder sediment dat aangevoerd wordt vanaf de kop van de Zandmotor (Figuur 3.7a). Deze suppletie vormde een ondiepe zone waarover de landtong ('spit') van de Zandmotor zich vanaf 2012 heeft kunnen ontwikkelen.

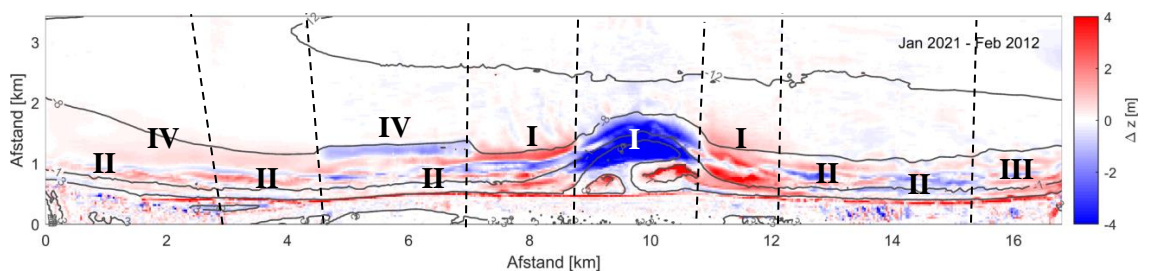
Opgemerkt wordt verder dat het enkele maanden heeft gekost om de vooroeversuppleties te plaatsen. Als gevolg daarvan is een deel van het suppletiezand van de samen met de Zandmotor aangelegde vooroeversuppleties (bij Ter Heijde en Zandmotor Noord) na de bodemmeting van Augustus 2011 aangebracht. Op basis van een analyse van de bodemveranderingen in de stortpolygonen (die visueel zijn bepaald op basis van de bodemhoogtemetingen) wordt ingeschat dat er na augustus 2011 respectievelijk nog 0,1 en 1,2 miljoen m³ geplaatst is van de Zandmotor Noord en Ter Heijde suppleties. De vooroeversuppletie bij Hoek van Holland en 's Gravenzande is geplaatst in het najaar van 2013, waardoor deze pas in 2014 zichtbaar is in de bodemhoogtemetingen.



Figuur 3.7 Dwarsprofielen ter hoogte van de uitgevoerde vooroeveroppleties. Het grijs gearceerde gebied geeft het toegevoegde sediment van de suppletie weer voor desbetreffende dwarsraai. De rode lijn in het overzichtskaartje is een indicatie van de locatie van de dwarsraai, terwijl de vooroeveroppletie indicatief is weergegeven met een gele markering.

3.3 A2 : Kwantificatie van morfologische verandering

In deze paragraaf wordt een kwantitatieve beschrijving gegeven van de morfologische ontwikkeling in de kustlangse en kustdwarse zones van de Delflandse kust (zie Figuur 3.1). Figuur 3.8 geeft het verschil in bodemligging weer tussen januari 2021 en februari 2012 (na aanleg van de Zandmotor).



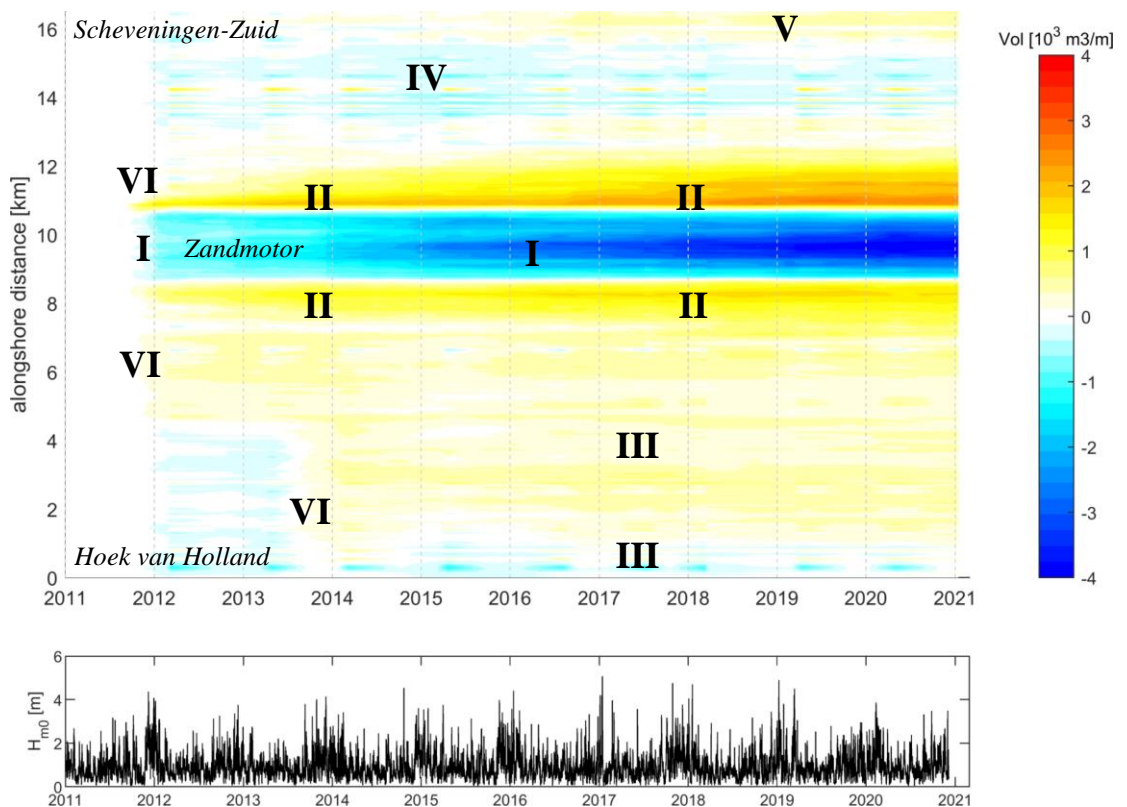
Figuur 3.8 Sedimentatie (rood) en erosie (blauw) op basis van de gemeten bodemligging tussen Februari 2012 en Januari 2021. De zwarte lijnen geven de deelgebieden aan. De belangrijkste ontwikkeling zijn aangeduid met de noties I t/m IV.

De grootste bodemhoogteveranderingen zijn te zien ter plaatse van de Zandmotor, bestaande uit erosie rondom de kop van de Zandmotor en sedimentatie in beide aanliggende deelgebieden (zie I in Figuur 3.8). Merk op dat ook op diep water zeewaarts van de Zandmotor

enige erosie en sedimentatie optreedt. In de ondiepe kustzone is afwisselend erosie en sedimentatie te zien welke wordt veroorzaakt door de ontwikkeling van zandbanken (zie II in Figuur 3.8). Bij Scheveningen is voornamelijk sedimentatie te zien (zie III). De suppleties bij ter Heijde (eind 2011) en de suppletie ter hoogte van de Van Dixhoorndriehoek en 's Gravenzande (eind 2013) zijn tevens waarneembaar als gebieden met aanzanding in Figuur 3.8 (zie IV).

De volumeverandering van de Delflandse kust na aanleg van de Zandmotor (i.e. van augustus 2011 tot en met januari 2021) kan samengevat worden op basis van een plot van de MKL zandvolumes in de tijd (zie Figuur 3.9). Op basis hiervan kan gesteld worden dat de ontwikkelingen worden gekenmerkt door:

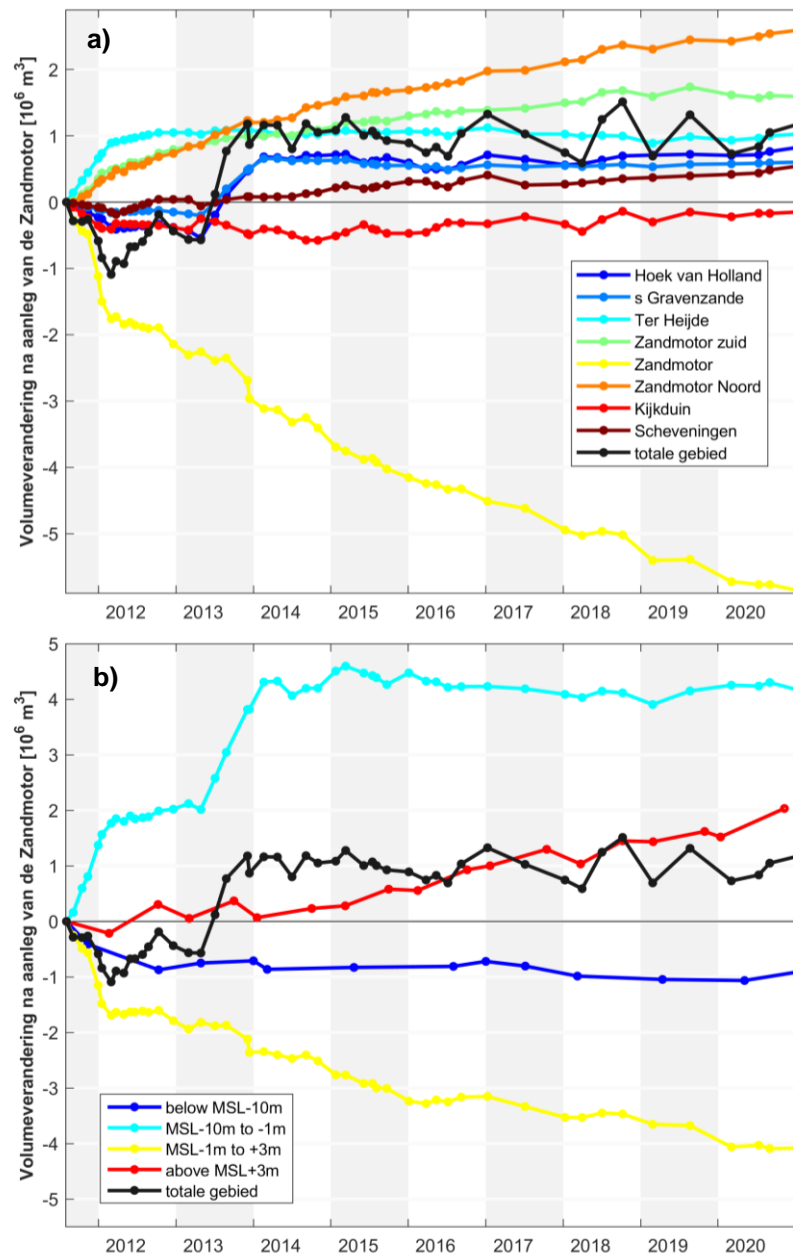
- I. Continue erosie bij de kop van de Zandmotor (van 0,6 tot 1,5 miljoen m³/jaar),
- II. Aanzanding op de aanliggende kust (0,3 tot 0,6 miljoen m³/jaar),
- III. Zeer geleidelijke erosie in de periode 2011 tot 2016 bij Hoek van Holland, 's Gravenzande en Ter Heijde (0,05 tot 0,2 miljoen m³/jaar per deelgebied),
- IV. Erosie bij Kijkduin die geleidelijk noordwaarts verplaatst (tot 100 m³/m ten opzichte van augustus 2011),
- V. Lichte aanzanding bij Scheveningen-Zuid (0,05 tot 0,3 miljoen m³/jaar) en
- VI. Sprongen in de volume balans als gevolg van de vooroever-suppleties zuidelijk en noordelijk van de Zandmotor (respectievelijk 1,2 en 0,1 miljoen m³ na augustus 2011) én de vooroever-suppletie bij Hoek van Holland - 's Gravenzande (1,5 miljoen m³ eind 2013).



Figuur 3.9 Samenvatting van volumeverandering Delflandse kust ten opzichte van 2011.

De volumeveranderingen tussen 2011 (na aanleg van de Zandmotor) en 2021 kunnen ook geaggregeerd per dieptezone of kustlangs deelgebied worden weergegeven (Figuur 3.10), waardoor ook de volumeveranderingen inzichtelijk worden. De netto erosie bij de Zandmotor

én de aanzanding in de brandingszone van de deelgebieden Zandmotor-Zuid en Zandmotor-Noord vallen duidelijk te onderscheiden. Met name in de eerste 2 à 3 jaar na aanleg vindt er erosie en sedimentatie plaats rondom de Zandmotor. In de jaren daarna zet de erosie en sedimentatie zich meer geleidelijk door. De suppleties bij Ter Heijde (eind 2011) en bij de Van Dixhoorndriehoek en 's Gravenzande (eind 2013) zorgen lokaal voor een (tijdelijke) toename in het volume (de blauwe lijnen in Figuur 3.10a én de lichtblauwe lijn in Figuur 3.10b). Ook valt op dat de duinen netto aanzandend zijn, terwijl er juist sprake is van sterke erosie bij het strand van de Zandmotor (gele lijnen) en beperkte erosie op de vooroever en in de brandingszone.

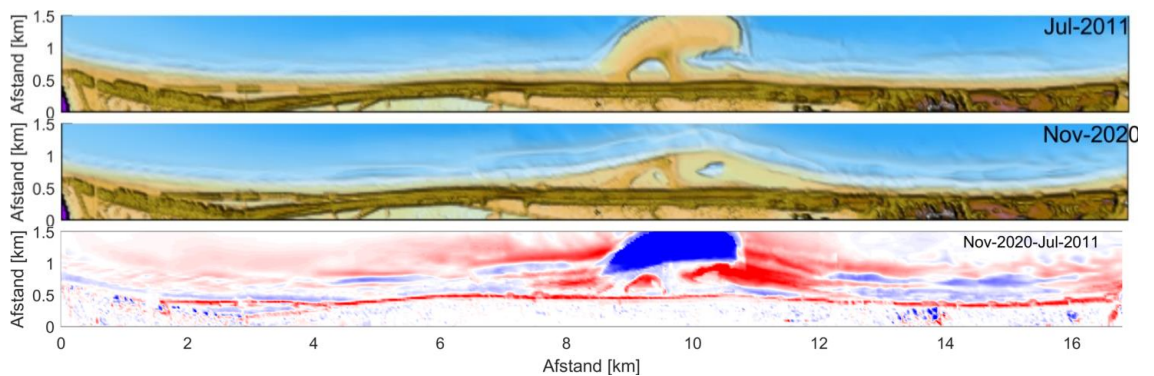


Figuur 3.10 Volumeverandering tussen augustus 2011 en januari 2021 per deelgebied voor elk jaar ten opzichte van 2011 (na aanleg van de Zandmotor) voor de gehele kustdwarse zone (boven) en per kustdwarse zone voor alle deelgebieden (onder). In de figuur worden de suppleties zichtbaar die uitgevoerd zijn in het najaar van 2011 bij Ter Heijde en noordelijk van de Zandmotor (deels na de aanleg Zandmotor) en in 2013 bij 's Gravenzande en Hoek van Holland.

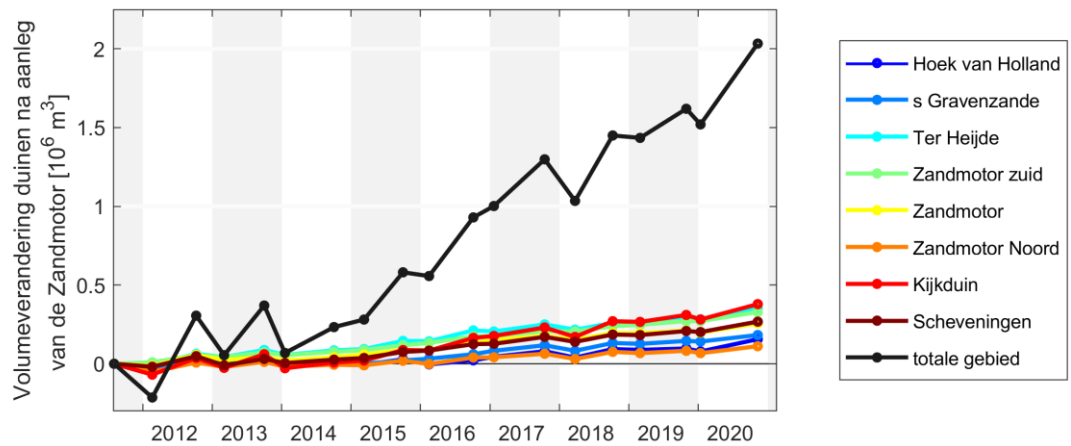
3.3.1 Duinen

In deze paragraaf wordt een analyse gegeven van de ontwikkeling van de ontwikkeling van de duinen per deelgebied en periode. De duinen zijn gedefinieerd als het gebied boven NAP+3m, exclusief het deel van de haak van de Zandmotor dat hoger ligt dan NAP+3m .

In Figuur 3.11 is het verschil tussen de bodemligging in 2020 en 2011 van het duingebied weergegeven. Hieruit volgt dat er over de hele Delflandse kust een toename van de duinhoogte te zien is. Bij 's Gravenzande is de zeewaartse zijde van de duinen in 2021 over een kustlangse lengte van ~4km (ter plaatse van de 'duincompensatie Maasvlakte 2') aanzienlijk geërodeerd ten opzichte van 2011 (Figuur 3.11). Landwaarts van dit erosiegebied vond echter sedimentatie plaats, wat duidt op een landwaarts transport. Het duinvolume is voor elk deelgebied in 2021 toegenomen ten opzichte van 2011 (zie Figuur 3.12). Het gaat om een stijging van 10000 tot 40000 m³/jaar per deelgebied. Totaal is het duinvolume met circa 2 miljoen m³ toegenomen over de periode 2011 tot 2021. Dit vertaald zich in een gemiddeld dwarstransport van 13 m³/m/jaar naar de duinen. Het transport varieert van 6 m³/m/jaar bij Hoek van Holland tot 24 m³/m/jaar voor deelgebied Zandmotor-Zuid en Scheveningen. Bij het centrale deel van de Zandmotor gaat het om gemiddeld 14 m³/jaar.



Figuur 3.11 Verschil in bodemligging van het duingebied tussen 2021 en 2011

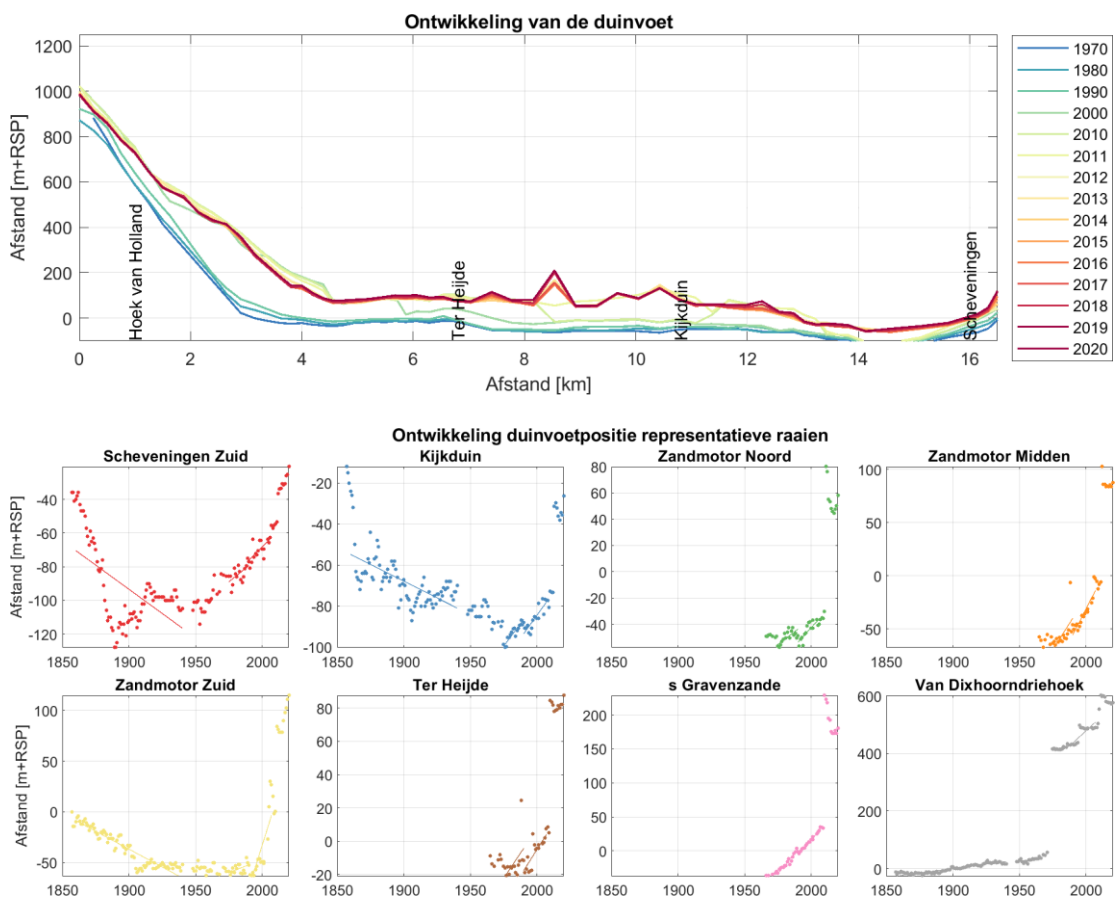


Figuur 3.12 Volumeverandering van de duinen (dieptezone boven 3m NAP) per deelgebied voor elk jaar ten opzichte van 2011 (na aanleg van de Zandmotor).

De ontwikkeling van de positie van de duinvoet langs de Delflandse kust is gedefinieerd als de doorsnede van het profiel met de NAP +3 m lijn en is weergegeven in Figuur 3.13. In het verleden is de duinvoet sterk achteruitgegaan over de periode 1850 tot 1970 (gemiddeld 0,4

tot 0,8 m/jaar). Sinds de jaren '70 is er echter sprake van een stabiele duinvoet positie, terwijl de duinvoet sinds het handhaven van de basiskustlijn zeewaarts verplaatst.

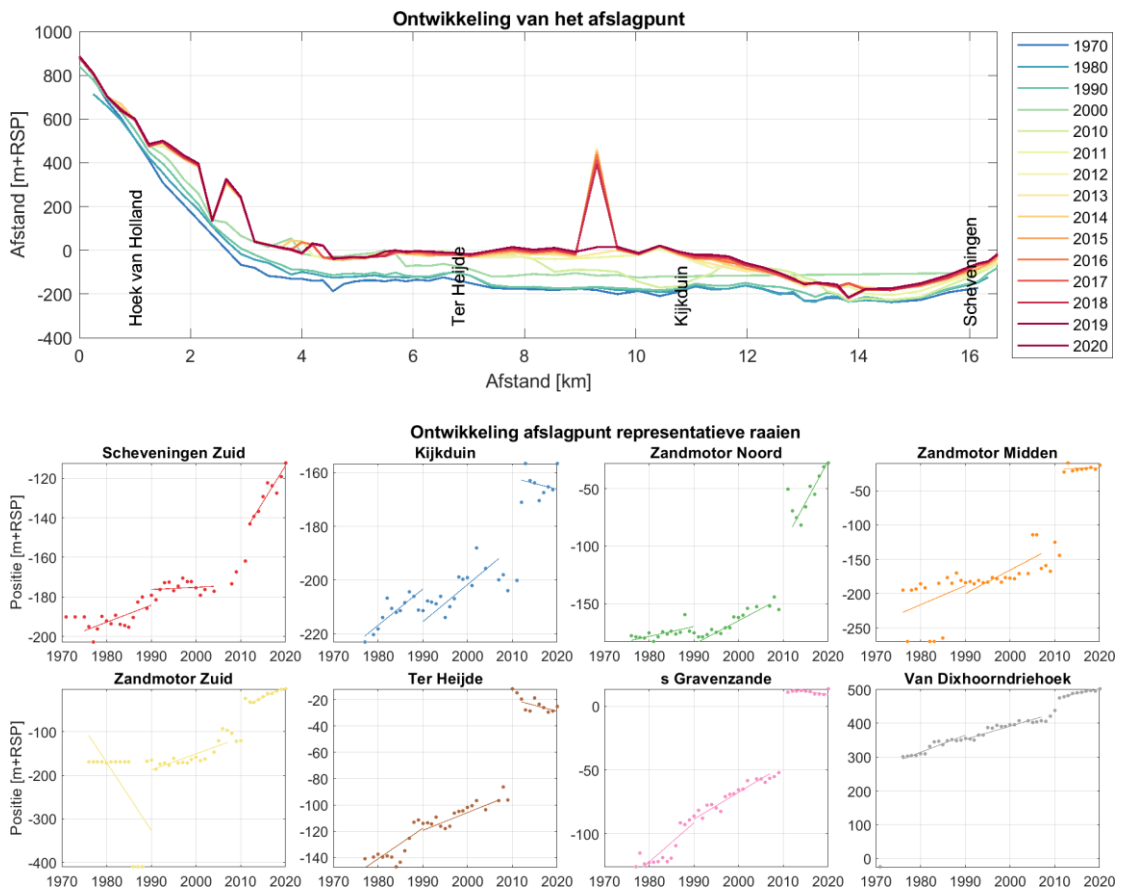
Tussen 2000 en 2011 is er een sprong in de ligging van de duinvoet als gevolg van de aanleg van de Kustversterking Delfland die (in het kader van het 'zwakke schakels' programma) tussen 2007 en 2010 is gerealiseerd (Figuur 3.13). Na aanleg van de Zandmotor varieert de positie van de duinvoet ten opzichte van RSP over de deelgebieden. Gemiddeld verplaatst de duinvoet zich echter met 80 cm per jaar landwaarts tussen 2012 en 2021, aangezien de sterk zeewaarts verplaatste duinvoet nu meer invloed ondervindt van stormcondities die tot dichterbij het duin kunnen komen. De toename in het duinvolume resulteert dus niet in een toename van de duinvoet positie ten opzichte van RSP. Dit kan worden verklaard doordat de aanzanding van de duinen, door wind-gedreven transport, plaatsvindt bovenop en net landwaarts van de kruin van de eerste duinrij, terwijl er erosie plaatsvindt aan de zeewaartse zijde van het duin (en duinvoet). Zand wordt door eolische processen blijkbaar van de duinvoet naar de kruin van de duinen verplaatst. Er lijkt dus geen directe relatie te zijn tussen de ontwikkeling van de positie van de duinvoet en de uitgevoerde strand- en onderwatersuppleties.



Figuur 3.13 Ontwikkeling van de duinvoet ten opzichte van RSP op basis van JARKUS-raaien tussen 1860 en 2020. Boven : top-view van duinvoet ontwikkeling. Onder : Duinvoet voor representatieve raaien in de tijd.

Voor het bepalen van de ontwikkeling van het afslagpunt is gebruik gemaakt van het duinafslagmodel DUROS+. Bij een toename van het afslagpunt komt het afslagpunt meer zeewaarts te liggen. Dit betekent dat de situatie lokaal veiliger wordt. Hierbij wordt opgemerkt dat DUROS+ niet ontwikkeld is voor situaties met een sterk gekromde kust en complexe bodemligging, zoals bij de Zandmotor.

De ontwikkeling van het afslagpunt langs de Delflandse kust is weergegeven in Figuur 3.14. Het afslagpunt is over de periode 1975 tot 2007 voor vrijwel alle deelgebieden zeewaarts verplaatst of stabiel gebleven als gevolg van onderhoud van de kust (gemiddeld 0 tot 4 m/jaar). Tussen 2007 en 2011 is er een sprong in de positie van het afslagpunt te zien (i.e. 40 tot 80 m meer zeewaarts) als gevolg van de aanleg van de Kustversterking Delfland. Hierna is de verandering van de positie van het afslagpunt beperkt voor de meeste deelgebieden. Bij de Van Dixhoordriehoek, Scheveningen-Zuid en Zandmotor-Noord en Zuid is sprake van een zeewaartse verplaatsing van het afslagpunt (3 tot 8 m/jaar), terwijl er een kleine teruggang is bij Zandmotor-Midden, Ter Heijde, 's Gravenzande en Kijkduin voor de periode 2012 tot 2021. In de periode 2012-2021, na aanleg van de Kustversterking Delfland en de Zandmotor, verplaatste het afslagpunt gemiddeld voor de gehele Delflandse kust met 0,9 m/jaar in zeewaartse richting.

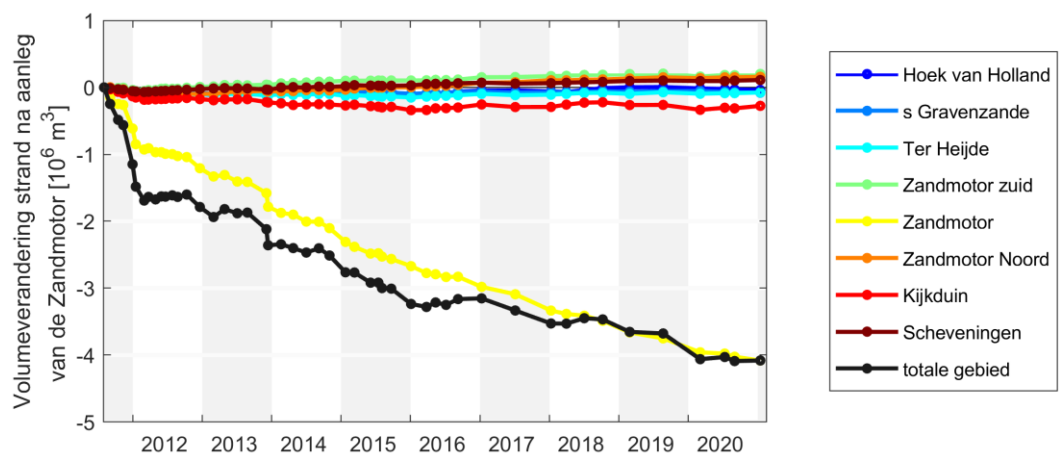


Figuur 3.14 Ontwikkeling van het met DUROS+ berekende afslagpunt ten opzichte van RSP op basis van JARKUS-raaien tussen 1860 en 2020. Boven : top-view afslagpunt. Onder : Afslagpunt op representatieve raaien

3.3.2 Strand

Deze paragraaf beschrijft de ontwikkeling van het strand. De dieptezone van het strand wordt gedefinieerd als het gebied tussen -1m en 3m NAP, en omvat ook het deel van de Zandmotor boven -1m NAP.

De volumeontwikkeling van het strand over de afgelopen tien jaar is per deelgebied weergegeven in Figuur 3.15. In algemene zin is het volume strand sterk afgenomen als gevolg van het eroderen van de haak van de Zandmotor. Dit zand gaat niet verloren, maar komt ten goede van de ondiepe kustzone en de duinen. De grootste volumeverandering van het strand is te zien bij Zandmotor-midden en wordt veroorzaakt door het eroderen van de kop van de Zandmotor. Dit erosieproces zorgt voor een sterke afname in volume in het eerste jaar na aanleg van de Zandmotor (ruim 1 miljoen m³), en zet zich in de jaren daarna in beperktere mate voort (0,2 tot 0,7 miljoen m³/jaar). Bij deelgebied Zandmotor zuid en noord neemt het zandvolume elk jaar toe door de vormverandering van de Zandmotor (bij beide +0,2 miljoen m³ over de beschouwde 10 jaar). De zuidelijke gebieden (Hoek van Holland, 's Gravenzande en Ter Heijde) laten een afname zien van het zandvolume op het strand (0,04 tot 0,08 miljoen m³ over de beschouwde 10 jaar). Ten noorden en zuiden van de Zandmotor is er sprake van erosie op het strand van Kijkduin (0,3 miljoen m³) en aanzanding van het strand van Scheveningen (+0,1 miljoen m³).

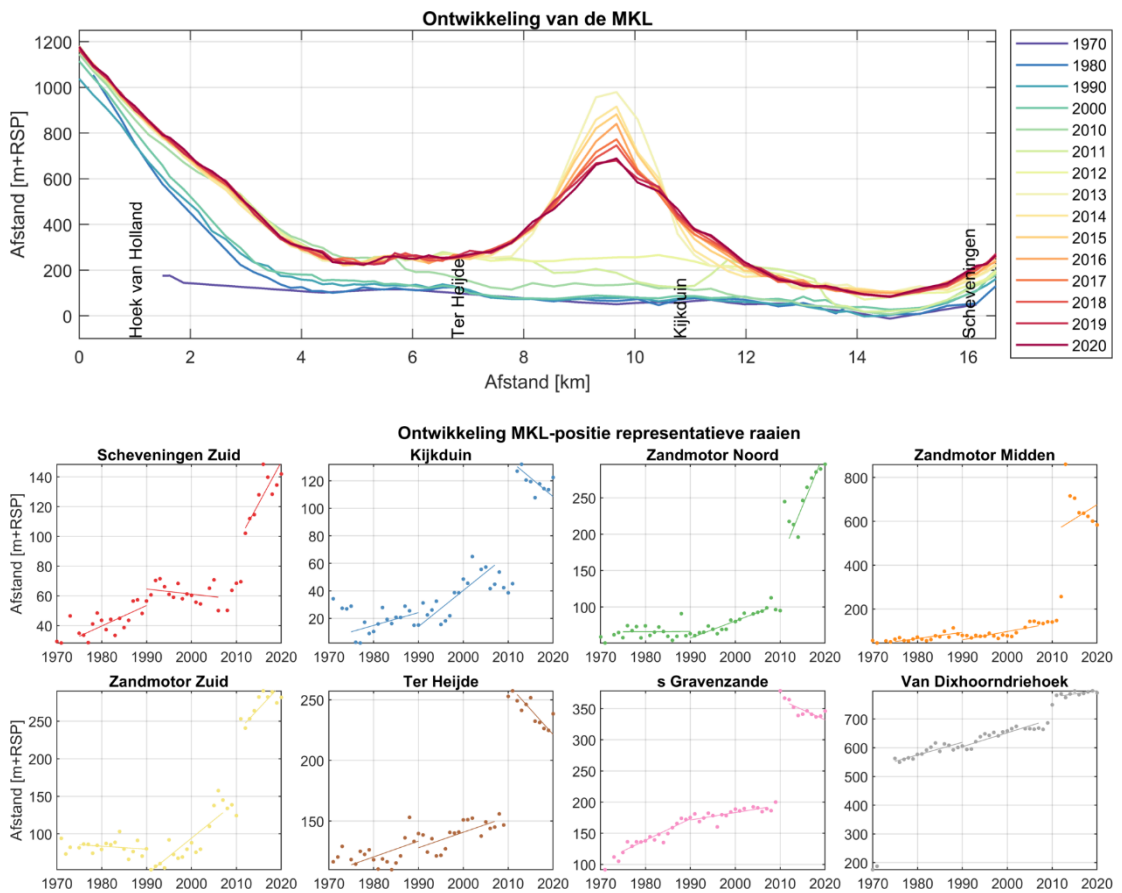


Figuur 3.15 Verandering van volume sediment in deelgebieden op het strand van de Delflandse kust (tussen NAP -1m en +3m)

De Momentane kustlijn (MKL) geeft de gemiddelde ligging van het strand en een deel van de vooroever weer ten opzichte van RSP. De MKL-positie wordt berekend met de methode zoals gebruikt in Tonnon en Nederhoff (2016) en is weergegeven in Figuur 3.16. Voor de raaien bij de Zandmotor wordt er een uitzondering gemaakt en wordt zowel de Zandmotor als het oorspronkelijke strand en duin meegenomen bij het bepalen van de MKL-positie.

In Figuur 3.16 is te zien dat er in de periode 1975 tot 1990 sprake is van een geleidelijk aangroeiende of stabiele MKL-positie als gevolg van suppleties. Alleen bij Zandmotor-Zuid is sprake van enige teruggang in deze referentieperiode. Ook voor de periode 1990 tot 2007 is een vergelijkbaar beeld te zien (i.e. stabiele of aangegroeide kust door suppleties). Tussen 2007 en 2010 is vervolgens een sterke toename van de MKL-positie te zien als gevolg van de Kustversterking Delfland in het kader van het Zwakke Schakels programma (gemiddeld 154 m; Figuur 3.16). In 2011 is een toename van de MKL-positie te zien bij deelgebied Zandmotor-Midden van gemiddeld 642 meter. De MKL-positie schrijft daarna bij de haak van de Zandmotor met ruim 300 meter terug over de periode 2012 tot 2021 (~30 m/jaar). Noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor is de MKL-positie na 2012 met 5 tot 15 m/jaar zeewaarts verplaatst als gevolg van aanzanding (zie representatieve raaien in Figuur 3.16). Een minder sterke zeewaartse verplaatsing van gemiddeld 2 en 7 m/jaar wordt over de periode 2012 tot 2020 geobserveerd bij respectievelijk de Van Dixhoordriehoek en Scheveningen-Zuid. Bij Ter Heijde en 's Gravenzande is de MKL-positie min of meer stabiel, terwijl de MKL-positie bij

Kijkduin enigszins landwaarts is verplaatst (2 m/jaar). De MKL-positie is gemiddeld over alle raaien met 30 cm per jaar landwaarts geschoven voor de periode 2012 tot 2020.

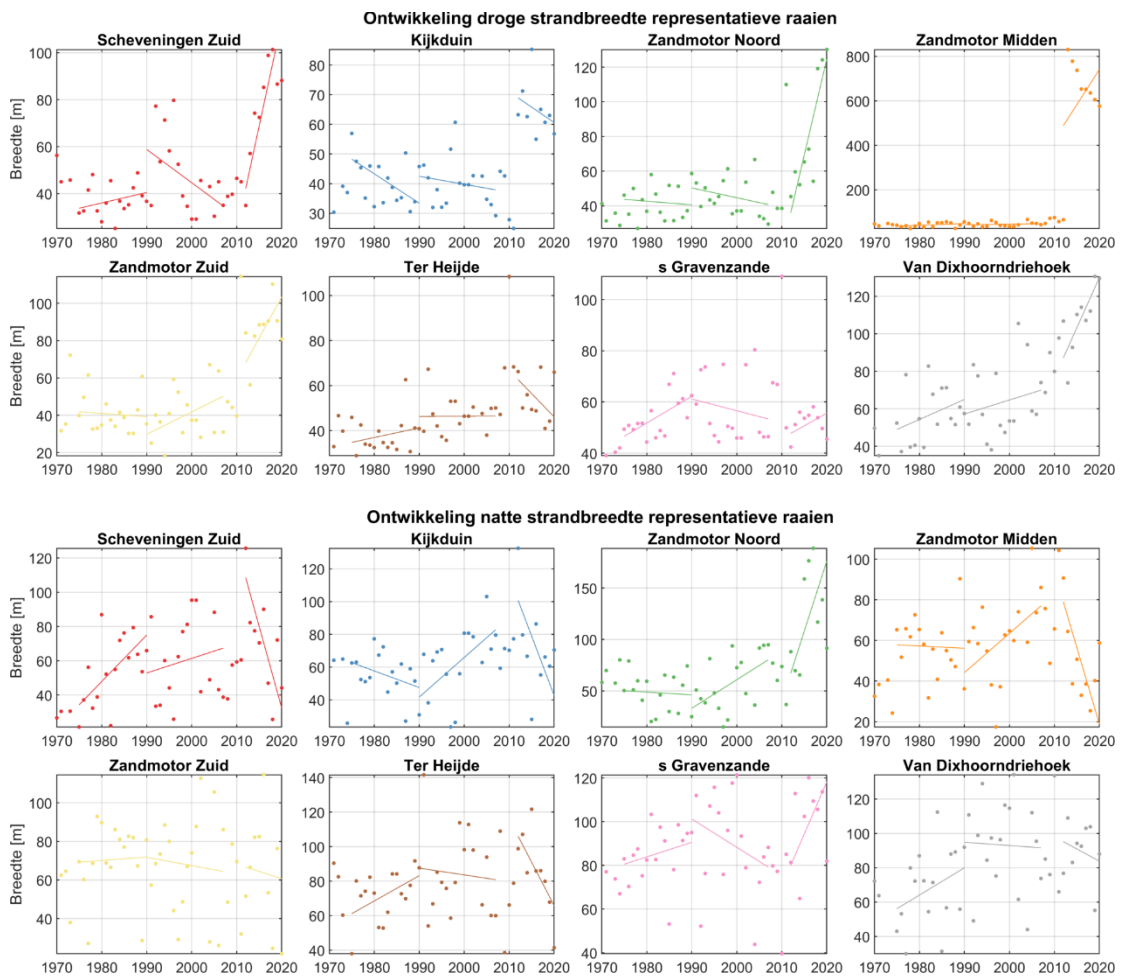


Figuur 3.16 Ontwikkeling van de MKL-positie ten opzichte van RSP op basis van JARKUS-raaien tussen 1970 en 2020. Boven : top-view ontwikkeling van MKL-positie. Onder : MKL voor representatieve raaien in de tijd.

De strandbreedte is geen indicator in het beleid van Rijkswaterstaat, maar wel van belang voor bijvoorbeeld recreatie. We gebruiken hier het natte strand en het droge strand. Het natte strand is de horizontale afstand tussen het snijpunt van het strandprofiel met de laagwaterlijn (LW) en hoogwaterlijn (HW). Het droog strand is de afstand tussen de snijpunten van het strandprofiel met de hoogwaterlijn (HW) en de duinvoet (+3m).

Gemiddeld genomen nam de strandbreedte tussen Hoek van Holland en Scheveningen in de periode 1975-1990 toe met 70 cm per jaar. Na de beleidskeuze voor het dynamisch handhaven van de kustlijn in 1990 nam de breedte van het droge strand met gemiddeld 40 cm per jaar toe. Na de aanleg van de Kustversterking Delfland en de Zandmotor (over de periode 2012 tot 2021) neemt de totale strandbreedte gemiddeld genomen echter af (-70 cm/jaar) als gevolg van erosie van de haak van de Zandmotor. Het natte strand wordt smaller (-90 cm/jaar), terwijl de droge strandbreedte juist toeneemt (+14 cm/jaar) in deze periode. De ontwikkeling van de strandbreedte hangt samen met de ontwikkeling van de duinvoet. Indien er sprake is van langdurige aanzanding of erosie dan verplaatsen zowel duinvoet als strandbreedte meestal in dezelfde richting (bijv. Zandmotor-Midden, Scheveningen-Zuid en de Van Dixhoordriehoek).

Echter in sommige gevallen is sprake van een landwaartse verplaatsing van de duinvoet in combinatie met een toename van de strandbreedte (o.a. 's Gravenzande).



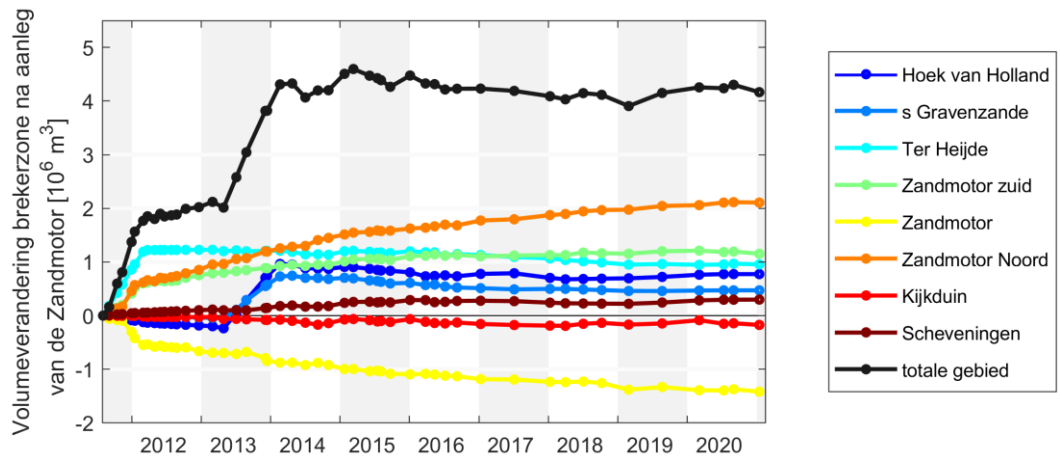
Figuur 3.17 Ontwikkeling van de natte en droge strandbreedte in de periode 1970 tot 2020 voor representatieve raaien binnen elk deelgebied. onder : natte strand; boven : droge strand.

3.3.3 Brandingszone

De brandingszone is hier gedefinieerd als het gebied tussen -8m en -1m NAP. De volumeveranderingen in de brandingszone na aanleg van de Zandmotor worden voornamelijk beïnvloed door de uitgevoerde suppleties tussen 2011 en 2013. Na aanleg van de Zandmotor daalt het volume in Zandmotor-Midden door erosie als gevolg van golf-gedreven langstransport (Figuur 3.18), terwijl er in de omliggende deelgebieden juist sprake is van aanzanding.

Ook de aanleg van de twee vooroeversuppleties na september 2011 ten noorden (0,6 miljoen m³) en ten zuiden (1,7 miljoen m³) van de Zandmotor zorgden voor een sterke toename in volume in 2012 bij Ter Heijde, Zandmotor-Zuid en Zandmotor-Noord. Bij Ter Heijde begint het volume vanaf 2016 weer af te nemen, aangezien het zand van de vooroeversuppleties zich naar het noorden en zuiden begint te verplaatsen. Bij Zandmotor-Noord en Zuid blijft het volume echter toenemen door de aanvoer van zand vanaf de Zandmotor. De vooroeversuppletie bij de Van Dixhoordriehoek en 's Gravenzande in 2013 (1,5 miljoen m³) zorgt voor een toename van het volume in 2014 in deze gebieden. In de jaren erna neemt het

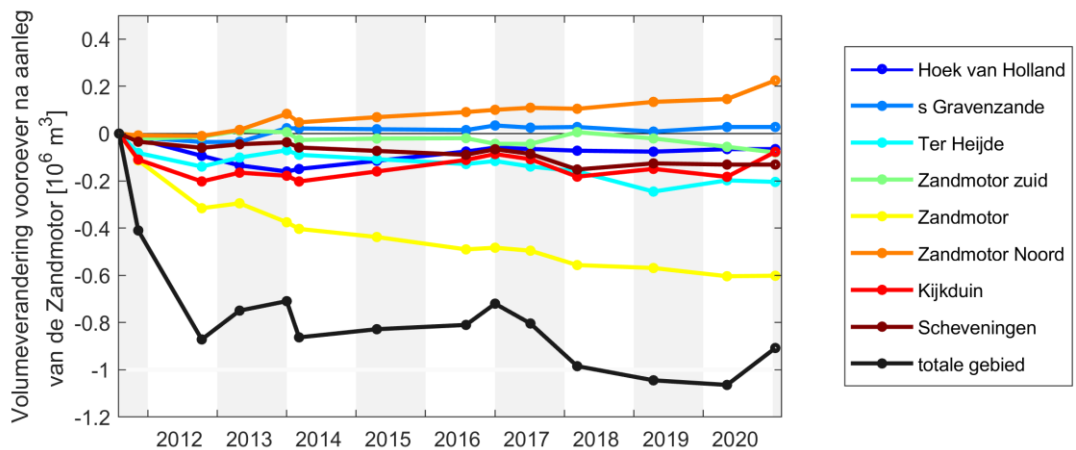
volume langzaam af. Bij Kijkduin en Scheveningen zijn er kleine variaties in het volume, waarschijnlijk veroorzaakt door de migratie van zandbanken.



Figuur 3.18 Verandering van volume sediment in deelgebieden van de brandingszone van de Delflandse kust (tussen NAP -1m en -10m).

3.3.4 Vooroever en diep water

Voor het bepalen van de volumeontwikkeling van de dieptezone tussen -14m en -10m NAP is gebruik gemaakt van de JARKUS grids, Vaklodingen en Jetski data rondom de Zandmotor. Opgemerkt moet echter worden dat de dekking van de metingen verschillend is (zie Figuur 2.2). Multi-beam data bevat de bodemligging van de vooroever en diep water waarvoor metingen beschikbaar zijn uit 2012 en juli 2015. Deze dataset is in Tonnon en Nederhoff (2016) al geanalyseerd en de belangrijkste bevindingen zullen hier worden herhaald.

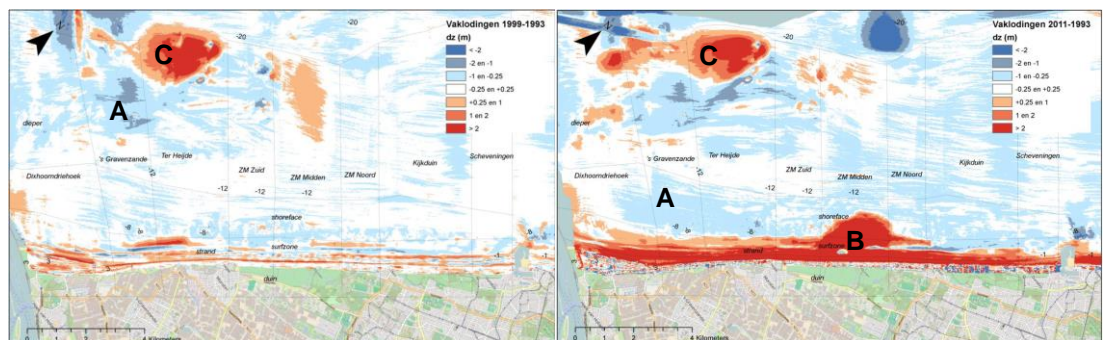


Figuur 3.19 Verandering van volume sediment in deelgebieden op de vooroever van de Delflandse kust (zeewaarts van NAP -10m)

Figuur 3.19 laat de volumeveranderingen zien voor het gebied tussen -20m en -8m NAP, op basis van de JARKUS data en Jetski data. Er is veel jaarlijkse variatie in het volume te zien voor alle deelgebieden. Alleen de deelgebieden 's Gravezande en Zandmotor Noord laten een

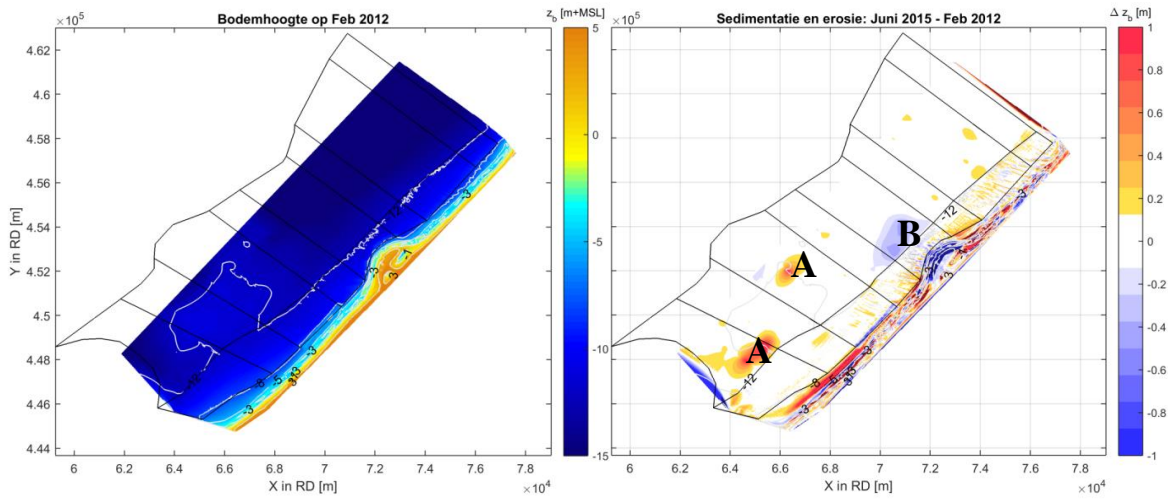
toename in het volume zien ten opzichte van 2011. De aanzanding op diep water noordelijk van de Zandmotor (+0,2 miljoen m³ over de beschouwde periode) is waarschijnlijk het gevolg van de erosie zeewaarts van de Zandmotor (-0,6 miljoen m³). De erosie in dit gebied sluit aan bij de berekende verspreiding van fijn zand en silt vanaf de Zandmotor naar dit gebied (Huisman et al., 2018). Tevens is er de afgelopen decades een trend van erosie waargenomen in de diep water zone van de Delflandse kust. Mogelijke oorzaken hiervan zijn bijvoorbeeld een landwaarts transport van sediment door dichtheid gedreven stromingen als gevolg van de zoetwater uitstroom van de Rijn (De Boer et al., 2009).

Indien de Vaklodingen en multibeam gegevens voor de Delflandse kust worden geanalyseerd kan een beeld verkregen worden voor een groter gebied wordt beschouwd dan gemeten met de verlengde Jarkusprofielen. Hierin valt te zien dat er erosie is waar te nemen op de diepe vooroever (alle blauwe gebieden; zie A in Figuur 3.20) en aanzanding aan de kust (als gevolg van suppleties; zie B) en op de diepwater stortlocaties van de haven van Rotterdam (zie C).



Figuur 3.20 Bodemverandering in Vaklodingen voor de periode 1993 – 1999 en 1993 - 2011 uit Tonnon en Nederhoff (2016). De kustlangse en kustdwarse deelgebieden zijn aangegeven met een grijze lijn.

In Figuur 3.23 is de met behulp van multi-beam gemeten bodemhoogte weergegeven na aanleg van de Zandmotor. In het algemeen zien we na de aanleg van de Zandmotor lokaal depositie op de dieper gelegen delen van het profiel. Het valt op dat er overwegend sedimentatie is opgetreden rond de voormalige Loswal Noord (zie A in Figuur 3.23). Mogelijk gaat het om herverdeling van het daar aanwezige zand kunnen dat over een vrij groot gebied wordt geërodeerd (i.e. te klein om zichtbaar te zijn in de meting) en later tot bezinking komt in de luwte van deze nog steeds aanwezige, zeer grote, structuur. Echter gezien de absentie van erosie is het ook mogelijk dat er hier sediment uit de Nieuwe vaarweg is gestort.

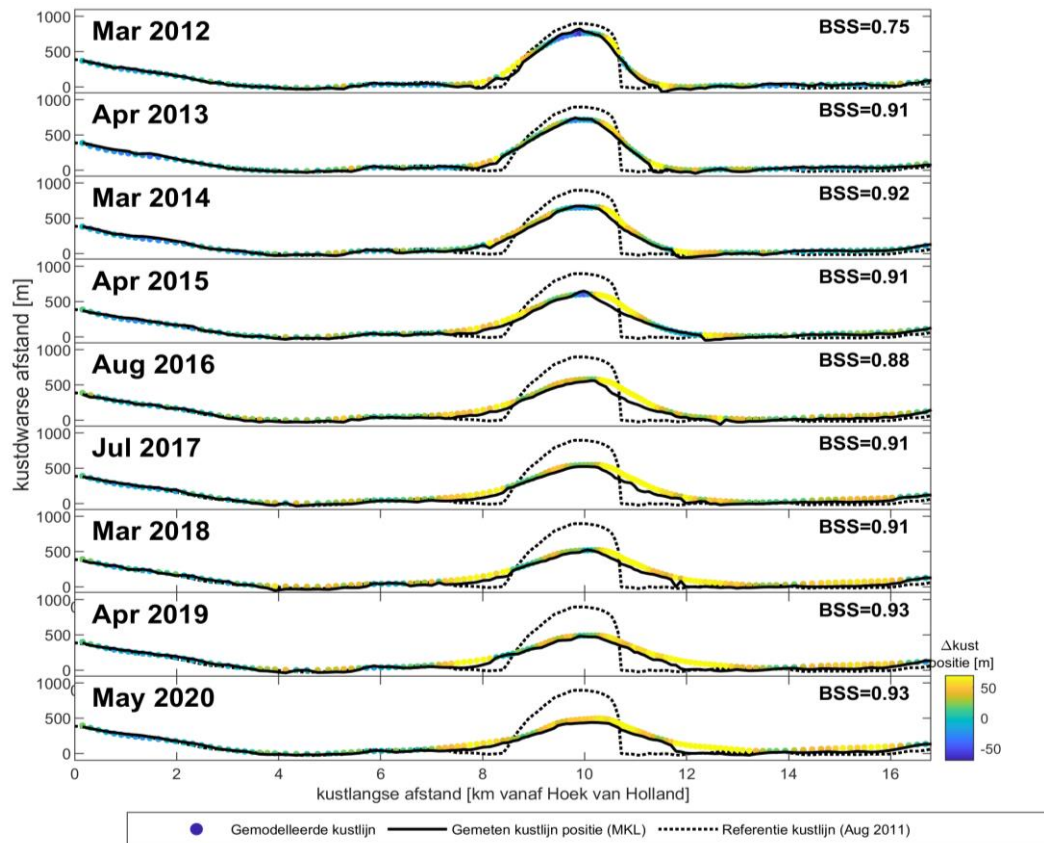


Figuur 3.21 Bodemligging zoals geconstrueerd op basis van de datapunten (multibeam) speciaal uitgevoerd voor de Zandmotor in combinatie met Jetksi metingen. Daarnaast zijn de gebruikte polygonen weergegeven (zwart). Raaimetingen lopen niet helemaal tot de -20 m +NAP Uit Tonnon en Nederhoff (2016).

Zeewaarts van de Zandmotor treedt erosie op (zie B in Figuur 3.21). Dit komt overeen met het gebied waarin vergroving van het sediment plaats vindt na aanleg van de Zandmotor (Huisman et al., 2016). Verwacht wordt dat er langsherverdeling plaats vindt van zand zeewaarts van de Zandmotor naar de diepe vooroever van het deelgebied Zandmotor-Noord waar sprake is van enige aanzanding. Opgemerkt moet worden dat het aantal bemeten raaien (circa 18) in de multibeam metingen te laag is om echt goede conclusies te trekken over de volumeveranderingen op diep water na aanleg van de Zandmotor. Deze gegevens zijn daarom niet expliciet meegenomen bij het vaststellen van de sedimentbalans

3.4 A3 : Sedimenttransporten

Deze paragraaf toont berekeningen van volumeverandering en sedimenttransport voor de Delflandse kust. Deze berekeningen geven informatie over de morfologische ontwikkelingen die op korte en middellange tijdschalen plaats vinden, en als gevolg niet direct zichtbaar zijn in de veldmetingen. De veldmetingen geven immers alleen een beeld op een bepaald aantal vaste momenten in de tijd. De veldmetingen zijn echter wel essentieel voor het afregelen van de lange-termijn trend van het model over de periode 2011 tot 2020. Langstransporten op de Delflandse kust kunnen worden gekwantificeerd, alsmede het sedimentverlies naar de Rijnlandse kust. Tevens wordt inzicht verkregen in de invloed van verschillende (golf)condities op de sediment herverdeling van de Delflandse kust. Figuur 3.22 laat de berekende kustlijnpositie voor de jaren 2012 tot 2020 zien ten opzichte van de waargenomen MKL-positie.

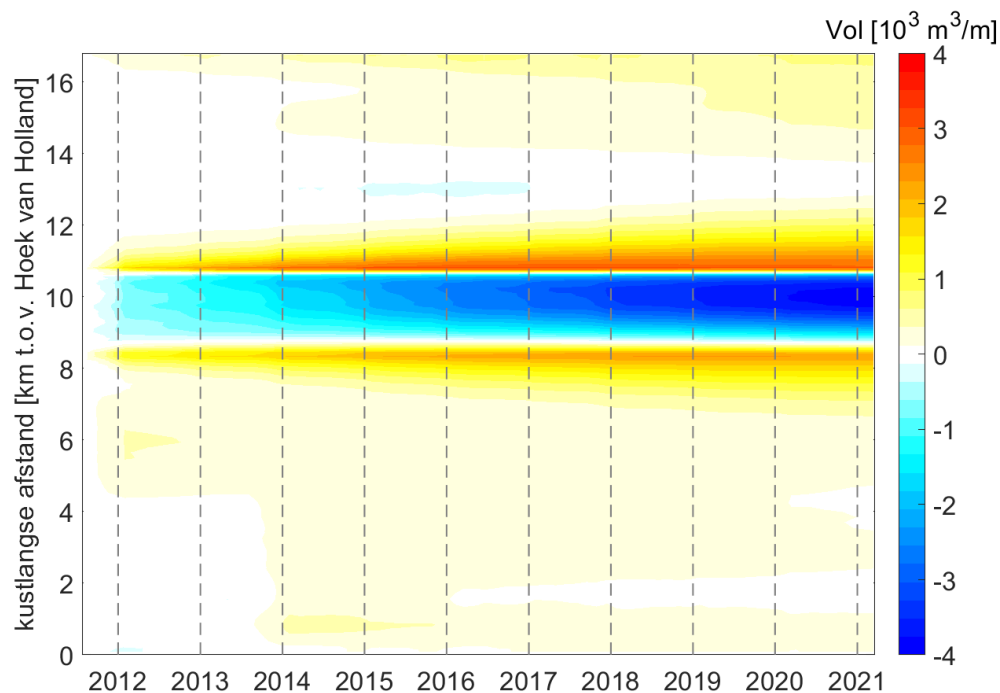


Figuur 3.22 Vergelijking van de gemeten en berekende kustlijnposities voor Maart 2012 tot Maart 2018. De afwijking van de gemodelleerde kustlijnposities wordt met gekleurde symbolen weergegeven. De MKL positie van de kustlijn wordt weergegeven met een zwarte lijn. R^2 en BSS zijn respectievelijk de kwadratische regressiecoëfficiënt en de Brier Skill Score van de kustlijnposities.

Uit de vergelijking van het model met de meetgegevens valt op dat een redelijk goede representatie van de kustlijn wordt verkregen. De erosiesnelheid is met de gekozen instelling heel goed gerepresenteerd. Het model heeft echter wel de neiging om de Zandmotor meer af te platten dan in werkelijkheid het geval is, waardoor er een overschatting is van de aanzanding op de flanken van de Zandmotor. Tevens is er een onderschatting bij Hoek van Holland en 's Gravenzande als gevolg van de schaduwwerking van de havendammen.

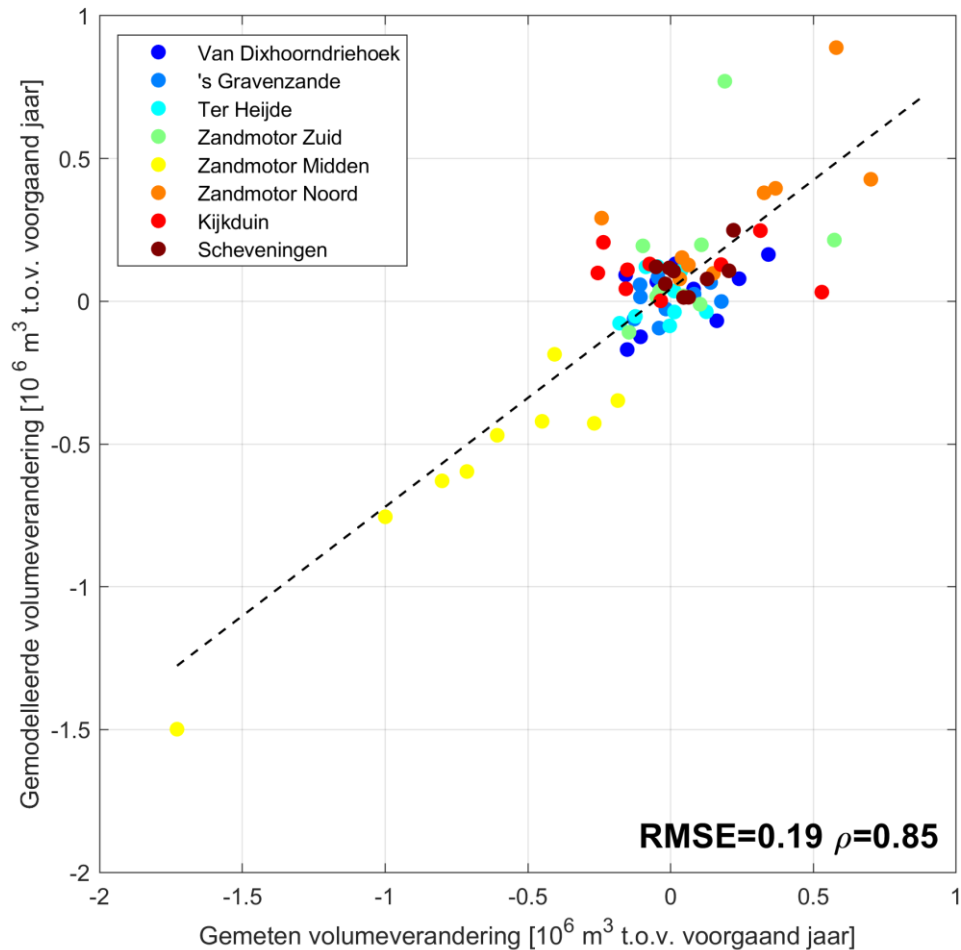
De mate waarin het model een betere voorspelling van de kustlijnpositie geeft dan de initiële startsituatie (dus 2011 kustlijn zonder modellering) kan worden uitgedrukt met de Brier Skill score. Bij een waarde van 1 is het model perfect in overeenkomst met de metingen, terwijl er geen meerwaarde is van het model (ten opzichte van de gewone startsituatie in 2011) als de score 0 is. Voor deze situatie werd een positieve score verkregen van 0,75 tot 0,93 wat goed tot uitstekend is. Dit geeft een indicatie dat het model bruikbaar is voor het onderzoeken van wat er in tussenliggende periode gebeurt, alsmede het onderzoeken van andere situaties.

De gemodelleerde volumeverandering van de Delflandse kust ten opzichte van augustus 2011, welke verkregen is op basis van de gemodelleerde kustlijnverandering en een actieve hoogte van 8.5 m, wordt weergegeven in Figuur 3.23. Deze gemodelleerde volumeverandering is zeer vergelijkbaar met de metingen in Figuur 3.9.



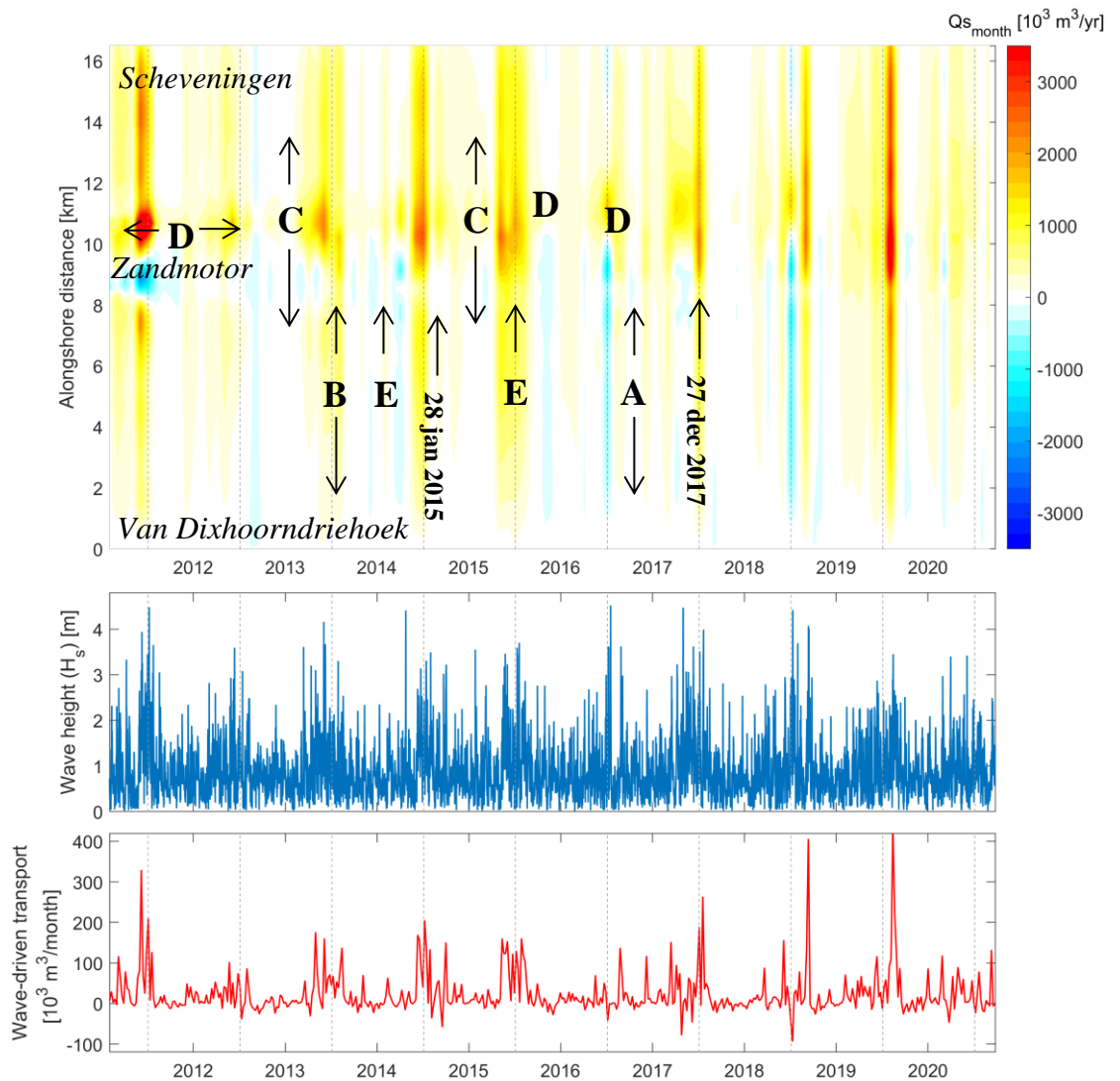
Figuur 3.23 Gemodelleerd volume van de Delflandse kust in de tijd.

De gemeten volumeveranderingen per jaar (op basis van de MKL-positie van de kustlijn) zijn per deelgebied uitgezet tegen de gemodelleerde volumeveranderingen (Figuur 3.24), waaruit een goede performance blijkt (regressiecoëfficiënt van 0,85) voor het voorspellen van de volumeontwikkeling van de kust. Blijkbaar kan een groot deel van de ontwikkelingen op de Delflandse kust verklaard worden op basis van alleen golfgedreven langtransport. Niet meegenomen in het model zijn bijvoorbeeld getijstrooming, eolisch transport naar de duinen, kustdwarse transporten door stormcondities, residuele stromingen door waterstandsverschillen (bijv. door golfforcering en zandbanken) en windgedreven stroming.



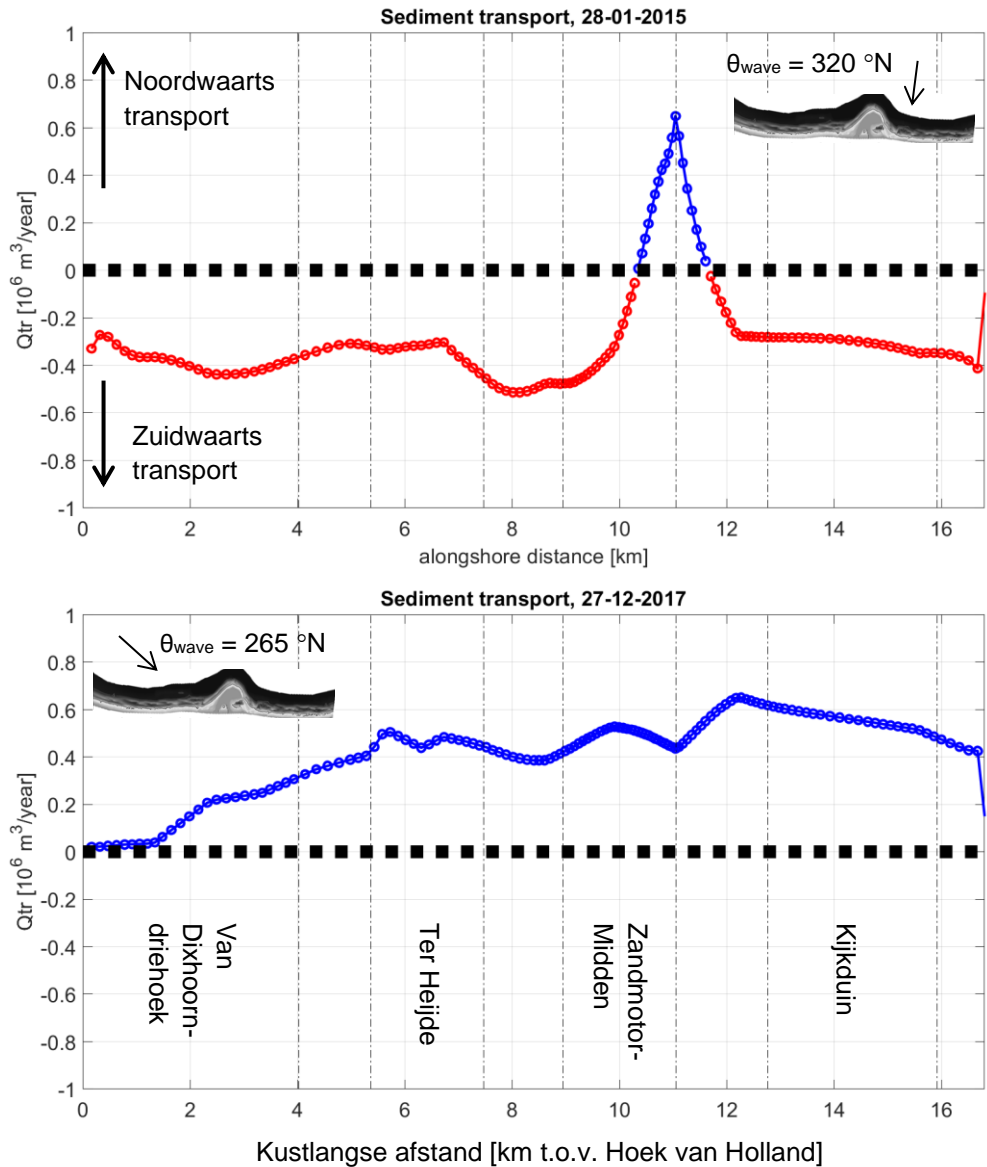
Figuur 3.24 Vergelijking van de gemeten en berekende jaarlijkse volumeveranderingen voor de periode 2011 tot 2018. De deelgebieden zijn met gekleurde symbolen weergegeven.

Het sedimenttransport op de Delflandse kust varieert aanzienlijk in de tijd (Figuur 3.25). Opvallend is dat er periodes zijn met sterk transport uit het noorden of uit het zuiden (respectievelijk de blauwe of rode verticale strepen; zie bijvoorbeeld A en B in Figuur 3.25), terwijl er voor de tussenliggende momenten (meestal in de zomer) vrij weinig transport is als gevolg van een beperkte golfhoogte of kleine hoek van de inkomende golven (zie C in Figuur 3.25). Ter plaatse van de noordelijke flank van de Zandmotor is met name in het eerste jaar na aanleg sprake van een omkering van het transport omdat de kusthoek hier sterk verandert (zie in D in Figuur 3.25). Na het eerste jaar is de vorm van de Zandmotor dusdanig afgevlakt dat er geen omkering van het transport meer plaats vindt bij de Zandmotor bij noordwaarts transport (zie bijvoorbeeld de zomer van 2014 en december 2015, aangeduid als E in Figuur 3.25). Dit komt overeen met de momenten in de tijd dat er aanzanding op een volledige flank van de Zandmotor werd waargenomen (i.e. tot aan de kop van de Zandmotor).



Figuur 3.25 Tijd-ruimte plot van gemodelleerd sedimenttransport voor de Delflandse kust (2011-2018) en de maandelijks gemiddelde golfhoogte en transport-proxy.

Figuur 3.26 laat twee transportpatronen zien voor typische momenten met een zuidwaarts of noordwaarts gericht transport. De illustreert de ruimtelijke variabiliteit in de transport die gerelateerd is aan de kustlijnoriëntatie. Voor het zuidwaarts gericht transport (als gevolg van golven uit 320 °N) is duidelijk een omkering van het transport zichtbaar op de noordelijke flank van de Zandmotor (zie bovenste paneel in Figuur 3.26). Voor condities vanuit het zuiden wordt een dergelijk omkering van het transport (op de zuidelijke flank) echter niet waargenomen, omdat de zuidelijke flank een veel meer afgeronde vorm heeft. Opvallend is wel dat er condities zijn met noordwaarts transport en grote hoek van inval (uit 265 °N; i.e. kleiner dan -45° t.o.v. de kustlijn) waarbij er een noordwaarts transport ontstaat wat vrijwel niet gehinderd wordt door de Zandmotor zelf (zie onderste paneel in Figuur 3.26).

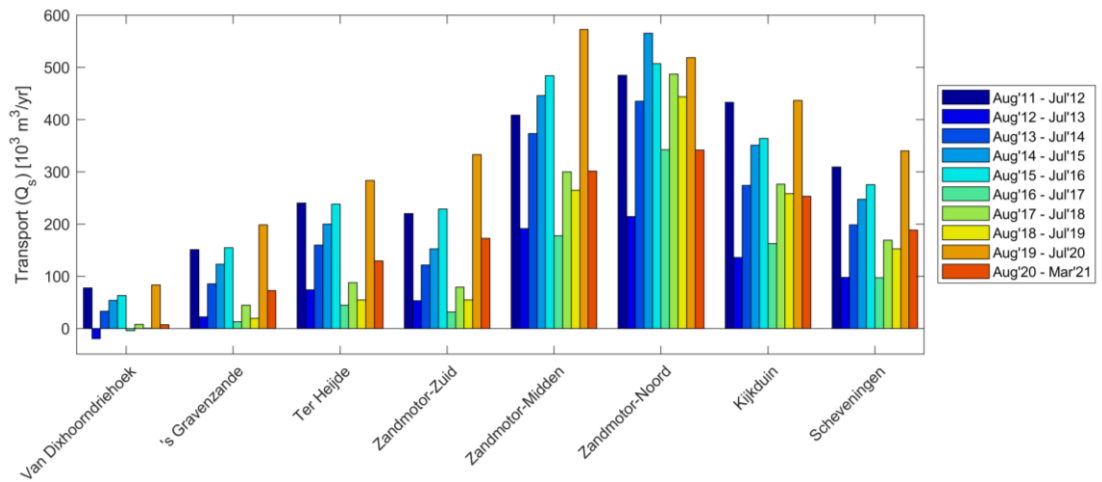


Figuur 3.26 Langtransport gedurende voor twee momenten in de tijd voor de winters van 2015 en 2017. Blauw duidt op noordwaarts transport, terwijl rood duidt op zuidwaarts transport.

Opmerkelijk is dat niet alle winters even zware golfcondities kennen, waardoor de grootte van de transporten van jaar tot jaar sterk kan verschillen. De winters van 2012-2013 en 2016-2017 waren duidelijk minder energetisch dan voor de andere jaren.

Het gemiddeld jaarlijkse sedimenttransport op de Delflandse kust bedraagt 250.000 m³/jaar naar het Noorden over de periode van augustus 2011 tot juli 2021, maar het gemiddelde transport varieert aanzienlijk per locatie en over de beschouwde jaren. Figuur 3.27 laat zien dat de transporten in de zuidelijke deelgebieden (Van Dixhoorndriehoek en 's Gravensande) meestal kleiner zijn dan voor de rest van Delfland, omdat deze deelgebieden enigszins in de luwte van de havendammen van de Nieuwe Waterweg liggen. Desalniettemin is ook hier nog steeds sprake van een netto noordwaarts transport. Met het model dat is afgeregeld op de kustlijnverandering aan de Delflandse kust wordt ingeschat dat het transport zuidelijk van de havendammen van Scheveningen 100.000 tot 300.000 m³/jaar is. Per jaar kan het transport echter sterk verschillen. De bypass van de havendammen van Scheveningen wordt geschat

op 150,000 m³/jaar, maar kan voor sommige jaren aanzienlijk hoger zijn. Op dit moment lijkt er nog geen directe invloed te zijn van de ontwikkeling van de Zandmotor op de transporten bij Scheveningen. Eerder lijken jaarlijkse variaties in golfcondities een rol te spelen voor het transport bij Scheveningen.



Figuur 3.27 Gemiddelde netto jaarlijkse sedimenttransporten op de Delflandse kust voor de periode 2011 tot 2021. De verschillende jaren worden met de gekleurde balken weergegeven.

3.5 A4 : Sedimentbalans Delflandse kust

Middels een volumebalans kan een beeld verkregen worden van de ontwikkeling van Delflandse kust als geheel. Dit resulteert in een toename van het volume van ~1,2 miljoen m³ voor de Delflandse kust (zie Tabel 3.1). Om de daadwerkelijke volumebalans te maken moet echter ook een correctie gemaakt worden voor de uitgevoerde suppleties in de beschouwde periode. Het na Augustus 2011 aangebrachte volume van de vooroever-suppleties ter hoogte van Ter Heijde en Zandmotor-Noord bedroeg respectievelijk 1,2 miljoen m³ en 0,1 miljoen m³. Bij de Van Dixhoorndriehoek en 's Gravenzande is in 2013 een suppletie aangebracht van 1,5 miljoen m³. Na een correctie voor het na 3 augustus 2011 gesuppleerde volume wordt een netto afname van het sedimentvolume gevonden van 1,6 miljoen m³ voor het Delflandse kustvak met een geschatte onzekerheid van een half miljoen m³. Over de beschouwde periode resulteert dit in een gemiddelde volumeafname in het Delflandse kustvak van 170.000 m³/jaar.

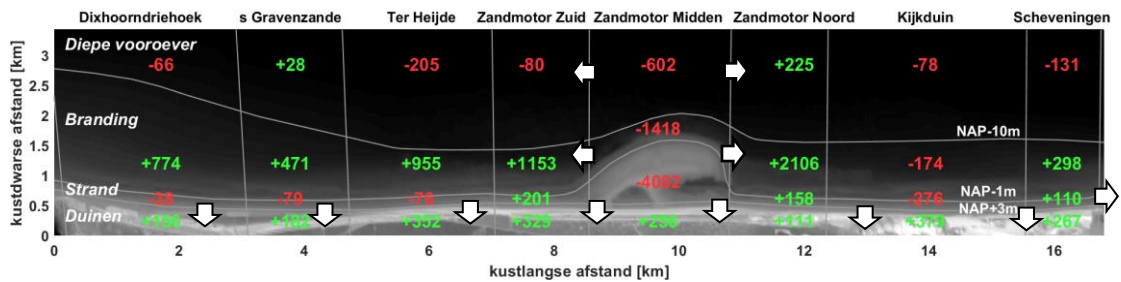
Tabel 3.1 - Volumeverandering binnen het Delflandse kustvak tussen 2021 en 2011

volumebalans 2021-2011	Volumeverandering [10³ m³]	Volumeverandering [10³ m³/jaar] *2
duinen	2000	+210
strand	-4100	-430
brandingszone	4200*1	+440
Diepe vooroever	-900	-95
alle dieptezones	1200	130
- suppletievolume	2800	295
alle dieptezones excl. suppleties	-1600 (+/- 500)	-170 (+/-50)

*1 van de gemeten volumeverandering van +4,2 miljoen m³ is een deel gerelateerd aan suppleties (~2,8 miljoen m³)

*2 uitgaande van een periode van 9.5 jaar (i.e. van begin augustus 2011 tot februari 2021)

Een ruimtelijk overzicht van de volumeveranderingen wordt gegeven in Figuur 3.28. In rood en groen worden de volumeafname of toename weergegeven in 10^3 m^3 over de beschouwde periode van 10 jaar.



Figuur 3.28 Volumeverandering tussen augustus 2011 en januari 2021 voor elk deelgebied en per dieptezone (in 10^3 m^3). Toename in volume in rood en afname in blauw. De gemodelleerde volumeverandering (kustwars geïntegreerd; in 10^3 m^3) en berekend netto langstransport (in $10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) zijn weergegeven in oranje.

In de diep-water dieptezone vindt een aanzienlijk volumeverlies plaats (900.000 miljoen m^3). Alleen voor de deelgebieden Noord van de Zandmotor is op diep-water aanzienlijke sedimentatie opgetreden. Het volume van de erosie op de diepe vooroever is echter onzeker, omdat alleen de verlengde Jarkusraaien konden worden gebruikt voor de volumebalans. Verwacht wordt dat er ook op de niet bemeten gebieden van de diepe vooroever sprake was van (enige) erosie, zoals ook voor de periode 1993 tot 2011 het geval was (zie Figuur 3.20). De gekwantificeerde erosie van de vooroever zal daarom waarschijnlijk een ondergrens vormen voor de werkelijke volumeverandering van de diepe vooroever.

Vanuit de brandingszone en het strand is er sediment door de wind naar de bestaande duinen getransporteerd (~ 2 miljoen m^3). De duingroei bedraagt gemiddeld 210.000 m^3 per jaar. Dit gaat gemiddeld om $\sim 13 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ voor de Delflandse kust. Bij de Zandmotor verschilt de duingroei aanzienlijk. Er is sprake van een grote duingroei aan de zuidzijde en een zeer beperkte duingroei aan de noordzijde waar de lagune een deel van het zand invangt.

Op basis van de kustlijnmodellering is ingeschat dat het langsgedreven transport in de ondiepe kustzone bij Scheveningen ongeveer 150.000 m^3/jaar bedroeg, alhoewel dit per jaar wel sterk kan verschillen. Na aanleg van de Zandmotor is dit niet wezenlijk veranderd. Deze schatting sluit qua ordegrrootte aan bij de geschatte volume afname van de Delflandse kust op basis van de bodemhoogte metingen van $\sim 170.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (zie Tabel 3.1). Van het tussen 2011 en 2021 voor de Zandmotor en vooroeversuppleties aangebrachte sediment kon 93% worden teruggevonden in de sedimentbalans (de 1,6 miljoen m^3 is 7% van het totaal). Opgemerkt wordt dat het resterende verschil tussen de gemeten aangroei van de Delflandse kust en de met het model berekende transport bij Scheveningen gezocht moet worden in de nauwkeurigheid van de metingen op de diepe vooroever en eventuele onnauwkeurigheden in de suppletievolumes. Verondersteld wordt dat er een onzekerheid van een half miljoen kan zitten in de gemeten zandvolumes over de beschouwde periode.

In de gebieden ten zuiden van de Zandmotor (de Van Dixhoorndriehoek en 's Gravenzande) is er sprake van enige erosie op het strand en sterke aanzanding in de brandingszone door de vooroeversuppletie in 2013 (respectievelijk $+0,8$ en $+0,5$ miljoen m^3). Ook het effect van de vooroeversuppletie eind 2011 is goed te onderscheiden in de brandingszone bij Ter Heijde ($+0,95$ miljoen m^3). Aanzanding in de brandingszone van de regio Zandmotor Noord wordt in het eerste jaar veroorzaakt door de vooroeversuppletie van 600.000 m^3 (waarvan 200.000 m^3 na augustus 2011) en later door aanvoer vanaf de Zandmotor.

4 Toetsing evaluatievragen

De monitoring van de morfologie van de Zandmotor richt zich primair op de beantwoording van evaluatievraag over kustveiligheid (EF1-1):

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?

Deze vraag wordt hier beantwoord middels de drie sub-vragen die zich richten op de invloed op de primaire waterkering, kustlijnontwikkeling en kustfundament. Daarnaast wordt ook informatie gegeven die relevant is voor de beantwoording van de evaluatievragen met betrekking tot fysische systeemkennis van de Zandmotor (EF 2-1) en meerwaarde voor de natuur (EF 2-2).

4.1 Evaluatievraag EF1-1a : Primaire waterkering

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

De duinen van de Delflandse kust zijn tussen over de periode van 2011 en 2021 aangegroeid met circa 2 miljoen m³, waarvan circa 700.000 m³ ten goede is gekomen aan het duingebied achter de Zandmotor (i.e. Zandmotor Zuid, Midden en Noord; tot 2.5 km van het centrum van de Zandmotor). Deze groei vond zeer geleidelijk plaats als gevolg van het inwaaien van zand dat vanaf het strand en intergetijdegebied komt. De duingroei bij de Zandmotor was gemiddeld 14 m³/m/jaar. Voor de Delflandse kust als geheel bedroeg dit gemiddeld 13 m³/m/jaar, in totaal 2 miljoen m³ over de beschouwde 10 jaar. Het invangen van zand in de lagune en het duinmeer zorgde er voor dat de waterkerende duinen bij de Zandmotor niet harder groeiden dan elders langs de Delflandse kust. Als deze aanzanding in het duinmeer en de lagune wordt meegenomen dan is het transport bij de Zandmotor naar verwachting aanzienlijk groter (~27 m³/m/jaar; Hoonhout & De Vries, 2017). In de eerste 5 jaar na aanleg van de Zandmotor groeide met name de eerste duinrij in de hoogte, maar in de laatste 5 jaar is er ook sprake van toenemende (embryonale) duingroei op de Zandmotor zelf. De effecten op de veiligheid zijn echter niet direct merkbaar, omdat er voor aanleg van de Zandmotor al een grote veiligheidsbuffer was toegevoegd door de kustversterking 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.

4.2 Evaluatievraag EF1-1b : Kustlijnontwikkeling

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

De kustlijn van Delfland is in de periode van 2011 tot 2021 gemiddeld 154 meter zeewaarts verplaatst door de aanleg van de 'Kustversterking Delfland' (in het kader van de Zwakke Schakels). Als gevolg van de Zandmotor is de MKL-positie lokaal (gemiddeld over het deelgebied Zandmotor-Midden) een additionele 500 meter zeewaarts verplaatst. Na de aanleg van de Zandmotor is sprake van een sterke teruggang van de MKL-positie ter plaatse van

deelgebied Zandmotor-Midden. Initieel was dit circa 50 m/jaar én een vooruitgang op de aanliggende deelgebieden Zandmotor-Noord en Zandmotor-Zuid van 5 tot 15 m/jaar. Bij Kijkduin is de MKL-positie 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. Voor de zuidelijke deelgebieden (Hoek van Holland, 's Gravenzande en Ter Heijde) wordt ook in de komende jaren slechts een beperkte invloed verwacht van de zandmotor op de momentane kustlijnpositie, aangezien het sediment zich met name noordwaarts verplaatst. De lokale kustlijn is door de 'Kustversterking Delfland' echter dusdanig zeewaarts gelegd dat de basiskustlijn in de komende jaren in alle deelgebieden ook zonder additionele suppleties gehandhaafd blijft.

Qua zandvolumes is er 21,5 miljoen m³ zand toegevoegd aan het kustgebied tussen Ter Heijde en Kijkduin over een lengte van ~2,5 km voor de aanleg van de Zandmotor in 2011. Tien jaar later ligt er in dit 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). Dit zal waarschijnlijk nog een hele tijd in de toekomst het geval zijn. Een sedimentbalans van de Delflandse kust, zuidelijk van de haven van Scheveningen, geeft aan dat 93% van het tussen 2011 en 2021 voor de Zandmotor en vooroeversuppleties aangebrachte sediment kon worden teruggevonden. De resterende 7% bevindt zich noordelijk van de haven van Scheveningen als gevolg van het natuurlijk zandtransport. Zandtransport naar dieper water lijkt zeer beperkt te zijn. Verwacht wordt dat er eerder een transport naar de kust toe plaats vindt.

4.3 Evaluatievraag EF1-1c : Invloed op het kustfundament

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. Wel heeft er een verspreiding van zand plaats gevonden binnen het kustfundament. Uit de sedimentbalans van de Delflandse kust voor de jaren tussen 2011 en 2021 komt naar voren dat circa 2 miljoen m³ sediment naar de duinen is gegaan en 1,5 miljoen m³ noordwaarts is getransporteerd richting Rijnland. Dit komt overeen met berekeningen van het noordwaarts transport bij Scheveningen die een schatting van 150.000 m³/jaar geven. Dit noordwaartse transport bij Scheveningen blijft dus ook behouden binnen het kustfundament.

4.4 Evaluatievraag EF2-1 : Fysische systeemkennis

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

De ervaring met de Zandmotor geeft inzicht in 1) het gedrag van de grootschalige suppleties tegenover vooroeversuppleties, 2) de fysische en ecologische processen die bepalend zijn voor duingroei, 3) de ontwikkeling van de lagune en het duinmeer en 4) de invloed van suppleties op de zandbanken.

Op basis van veldobservaties wordt duidelijk dat de vormverandering bij de Zandmotor heel anders is dan bij vooroeversuppleties. Vooroeversuppleties vervormen met name 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. Opvallend is dat de kustlangse

herverdeling van zand bij de Zandmotor al goed gemodelleerd kan worden met een kustlijnmodel dat alleen het golfgedreven langtransport meeneemt. In feite biedt dit mogelijkheden om snel inzicht te krijgen in de te verwachten ontwikkelingen van grootschalige suppleties (of zandige kustversterkingen). Voor de korte-termijn ontwikkeling van vooroeversuppleties is het echter ook belangrijk om het dwarstransport naar de kust toe mee te nemen.

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 grootte van de suppletie, maar zeker zoveel door het invangen van zand in een landwaarts gelegen lagune of duinmeer (Hoonhout & De Vries, 2017). In de lagune en het duinmeer zorgt door de wind aangevoerd zand voor aanzanding aan de westelijke zijde. Door het invangen van zand 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.

Ook werd gevonden dat het intergetijdegebied van groot belang is voor het aanbod van eolisch getransporteerd zand, aangezien er op het hogere strand van de Zandmotor relatief weinig zand beschikbaar komt. 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.

Erosie op de diepe vooroever levert een beperkte bijdrage aan de totale sedimentbalans van de kust. Sediment van de diepe vooroever wordt het profiel opgevoerd naar de brandingszone. Tevens vindt er op de diepe vooroever erosie plaats zeewaarts van de Zandmotor en afzetting van dit sediment op het aangrenzende deelgebied noordelijk van de Zandmotor (op de diepe vooroever), wat tevens zorgt voor sortering van bodemmateriaal.

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. 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 zijn.

4.5 Evaluatievraag EF2-2 : Meerwaarde voor de natuur

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

Op deze vraag is geen direct antwoord te geven vanuit deze studie. Wel is informatie verzameld over fysische condities die relevant kunnen zijn voor de ecologie van de lagune en de ontwikkeling van embryonale duinen.

In de eerste plaats is de morfologische ontwikkeling van de getijdegeul naar de lagune van belang voor de ecologie. Deze getijdegeul is door de tijd heen steeds langer en ondieper geworden, waardoor de getijslag binnen de lagune door de tijd heen is verkleind. Dit heeft implicaties op de voedselbeschikbaarheid, het zuurstofgehalte in het water én de temperatuur van het water in de lagune. Op de Zandmotor is verder sprake van groei van embryonale duinen (Van Puijenbroek et al., 2017). Het huidige ontwerp van de Zandmotor (met lagune en duinmeer) zorgt er door het afvangen van eolisch transport echter voor dat de groei van de embryonale duinen enigszins wordt beperkt.

5 Conclusies

De morfologische ontwikkeling van de Delflandse kust is onderzocht op basis van gemeten bodemhoogte en berekeningen met een kustlijnmodel. Hieruit komt naar voren dat:

- De duinen van de Delflandse kust aanzienlijk zijn versterkt (duinvoet 60 tot 100 m zeewaarts) door de 'Kustversterking Delfland' (2009 en 2010) en de Zandmotor (zomer 2011). Het duinvolume groeit nog steeds door windtransport van zand vanaf het strand. De duinen van de Delflandse kust zijn met circa 2 miljoen m³ gegroeid over de periode 2011 tot 2021 (gemiddeld 13 m³/m/jaar).
- Ook de kustlijn is door de suppleties aanzienlijk zeewaarts verplaatst (~150 meter) door de 'Kustversterking Delfland'. Lokaal is de kustlijn ter plaatse van de Zandmotor gemiddeld nog 500 meter extra zeewaarts verplaatst. Na aanleg van de Zandmotor is sprake van sterke erosie van 50 m/jaar bij de kop van de Zandmotor en aanzanding van 5 tot 15 m/jaar in de deelgebieden noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor.
- Vrijwel al het gesuppleerde sediment van de Zandmotor en vooroeversuppleties kan teruggevonden worden in het Delflandse kustvak, zuidelijk van de haven van Scheveningen (93%). Het resterende deel is waarschijnlijk ten goede gekomen aan de Rijnlandse kust, aangezien er een netto noordwaarts transport van ongeveer 150.000 m³/jaar wordt berekend. Netto blijft het zand van de Zandmotor dus beschikbaar binnen het kustfundament van de Delflandse en Rijnlandse kust.
- Op de diepe vooroever vindt in de beschouwde periode erosie plaats (~100.000 m³/jaar). Verwacht wordt dat een deel van dit zand ten goede is gekomen aan de ondiepe kust (brandingszone). Als gevolg van de Zandmotor is er een langsherverdeling van zand op de diepe vooroever naar de omliggende deelgebieden noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor.

Wat betreft de drijvende processen voor de herverdeling van zand én consequenties voor de omgeving wordt het volgende geconcludeerd:

- De kustveranderingen bij de Zandmotor kunnen voor een groot deel toegeschreven worden aan golfgedreven langtransport. De vooroeversuppleties bij Ter Heijde (2011) en Hoek van Holland (2013) lijken op korte termijn echter juist in kustdwarse richting te verplaatsen.
- Het netto sedimenttransport op de Delflandse kust (en bypass van zand naar Rijnland) kan van jaar tot jaar zeer sterk verschillen als gevolg van de optredende golfcondities.
- Het duinmeer en de lagune vangen eolisch transport af dat anders ten goede zou komen aan de ontwikkeling van de huidige duinen en/of nieuwe embryonale duinontwikkeling. Ook embryonale duinen vangen zand in dat anders in de zeereep terecht zou zijn gekomen.
- Door de tijd heen is de geul van de lagune steeds langer geworden en verondiept, waardoor de getijslag in de lagune verkleind is, wat invloed heeft op de fysische condities in de lagune.
- Suppleties hebben op lange-termijn invloed op het voorkomen van zandbanken op de Delflandse kust. Tevens kunnen geprononceerde grootschalige suppleties invloed hebben op de kustlangse uniformiteit van zandbanken.

Referenties

- De Boer, G.J., Pietrzak, J.D. & Winterwerp, J.C., 2009. SST observations of upwelling induced by tidal straining in the Rhine ROFI, *Continental Shelf Research*, Vol. 29 (1): 263-277.
- Deltares en IMARES (2013). Analyse en evaluatie - van doelen naar metingen en weer terug. (Hypothesendocument). Versie 2.2, juli 2013.
- Deltares (2014). KPP Onderzoek Bodemdynamiek 2014 KPP Onderzoek Bodemdynamiek.
- Deltares (2016a). Argus video-based monitoring at the Sand Motor, report 1205045-006-ZKS-0013, 1 February 2016, final.
- Deltares (2016b). Ontwikkelingen van de Zandmotor, rapportage over vier jaar uitvoering van het monitoring- en evaluatieprogramma. Concept februari 2016.
- DHV bv, H+N+S landschapsarchitecten en Alterra (2007). Waterbouwrapport Versterking Delflandse kust, Technische analyse t.b.v. versterking Delflandse kust. Rapport WG-SE20061125, 19 Februari 2007, versie definitief.
- DHV (2010). Monitoring en Evaluatie Plan Zandmotor. Juni 2010.
- Hoonhout, B.M., De Vries, S. (2017). Aeolian sediment supply at a mega nourishment. *Coastal Engineering* 123: 11–20.
- Huisman, B.J.A., De Schipper, M.A., and 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. (2017). Project management plan Monitoring pilot Zandmotor Fase 2B: periode 2017 t/m 2021. Deltares projectnummer 11201431-001-ZKS-0003, In opdracht van Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.
- Huisman, B.J.A., Taal, M.D., Arens, B., Vertegaal, C.T.M. (2017). Offerte Monitoring en Evaluatie Zandmotor Fase 2B: periode 2017 t/m 2021. Deltares projectnummer 11201431-001-ZKS-0001, In opdracht van Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.
- Huisman, B.J.A. (2021). Herziening evaluatievragen Zandmotor monitoring 2017-2021. Deltares Memo 11201431-001-ZKS-0004, In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. 23 april 2021.
- Huisman, B.J.A., Ruessink, B.G., Schipper, M.A.D., Lujendijk, A.P., and Stive, M.J.F. (2021). Modelling of bed sediment composition changes at the lower shoreface of the Sand Motor. *Coastal Engineering*, 132: 33–49.
- Huisman B.J.A., Walstra D.J.R., Radermacher M, de Schipper M.A., Ruessink B.G. Observations and Modelling of Shoreface Nourishment Behaviour. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019; 7(3):59.

- Luijendijk, A.P., Ranasinghe, R., Schipper, M.A., Huisman, B.J.A., Swinkels, C.M., Walstra, D.J.R., and Stive, M.J.F. (2017). The initial morphological response of the Sand Engine: A process-based modelling study. *Coastal Engineering*, 119: 1–14.
- Projectgroep MER Loswal Noord (1995). Een nieuwe Loswal Noord voor het lossen van baggerspecie in zee? Milieu-effectrapport Verkeer en Waterstaat Zuid-Holland & Gemeentelijk havenbedrijf.
- Van Puijenbroek, M.E.B., Limpens, J., De Groot, A.V. en Riksen, M.J.P.M., Gleichman, M., Slim, P.A., Van Dobben, H.F., en Berendse, F. (2017). Embryo dune development drivers: beach morphology, growing season precipitation, and storms. *Earth Surface Processes and Landforms* 42 (11): 1733-1744.
- PZH (2010). Projectnota/ MER. Aanleg en zandwinning Zandmotor Delflandse kust. Auteur: Provincie Zuid-Holland. Februari 2010, definitief.
- Radermacher, M., De Schipper, M.A., Price, T.D., Huisman, B.J.A., Aarninkhof, S.G.J., and Reniers, A.J.H.M. (2021). Behaviour of subtidal sandbars in response to nourishments. *Geomorphology*, 313: 1–12.
- RIKZ, 2002. Het storten van baggerspecie in de Verdiepte Loswal. November 2002.
- Roelvink, J.A., Reniers, A.J.H.M., van Dongeren, A.R., van Thiel de Vries, J.S.M., McCall, R.T., Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11-12): 1133–1152.
- Rutten, J., Ruessink, B.G., Price, T.D. (2017). Observations on sandbar behaviour along a man-made curved coast. *Earth Surface Processes and Landforms*
- Shore monitoring & research (2013). Morfologische ontwikkeling van de Zandmotor pilot in de eerste 2 jaar na aanleg' versie 3.1, 20-11-2013.
- Shore Monitoring & Research (2016). Morfologische ontwikkeling van de Zandmotor pilot in de periode 2 tot 4,5 jaar na aanleg' versie 1,1, 01-02-2016.
- Steetzel, H, Van Santen, R. (2010). Relatie Kustlijnzorg – Kustveiligheid, resultaten uit het verleden. Alkyon rapport A2681.
- 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., Van der Valk, L., Holzauer, H., Baptist, M.J., Wijsman, J.W.M., Vertegaal, C.T.M. en Arens, S.M. (2011). Uitvoeringsprogramma Monitoring en Evaluatie Pilot Zandmotor. *Deltares/IMARES*. Rapport 1203519-000.
- Tonnon, P. K., Nederhoff, C. (2016). Monitoring en Evaluatie Pilot Zandmotor, eindevaluatie onderdeel morfologie. Deltares rapport 1205045-006-ZKS-0014, 12 februari 2016.

Tonnon, P.K., Huisman, B.J.A., Stam, G.N., and Van Rijn, L.C. (2021). Numerical modelling of erosion rates, life span and maintenance volumes of mega nourishments. *Coastal Engineering*, 131: 51–69.

TRDA (2007). Technisch Rapport Duinafslag 2006, ENW.

Van Rijn, L.C. (1995); Sand budget and coastline changes of the central coast of Holland between Den Helder and Hoek van Holland period 1964-2040. Delft Hydraulics, report H2129, project kustgenese.

Van Rijn, L. C. (1997). Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland. *Coastal Engineering*, 32: 61–90.

Vellinga, P. (1986). Beach and dune erosion during storm surges. Proefschrift, Technische Universiteit Delft.

WL|Delft Hydraulics (2006). Dune erosion – Product 2: Large-scale model tests and dune erosion prediction method. Rapport, project H4357.

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