

Invloed suppleties op bodemsamenstelling

Modellering van verandering in korrelgrootte

A.T.M. de Bakker
B.J.A. Huisman

11201431-001

Titel

Invloed suppleties op bodemsamenstelling

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat-WVL	11201431-001	11201431-001-ZKS-0018	49

Trefwoorden

Zandmotor, Morfologie, Sedimentbalans, Delfland, Kustlijnmodel

Samenvatting

In het kader van het project Monitoring Zandmotor 2017-2021 wordt onderzoek uitgevoerd naar de effecten van suppleties op de ecologie van de vooroever bij de Zandmotor. Een fysische parameter die hiervoor belangrijk kan zijn, is de samenstelling van de bodem (korrelgrootteverdeling). De korrelgrootte is namelijk van invloed op de geschiktheid van het gebied voor benthos en vissen (o.a. schuilen van platvissen).

Om de invloed van suppleties op de ecologie te kunnen bepalen moeten daarom eerst de veranderingen in korrelgrootteverdeling in kaart worden gebracht. In de huidige rapportage worden veranderingen in sedimentsamenstelling bij de Zandmotor onderzocht, en de achterliggende fysische mechanismen (evaluatievraag *EF2-2a*; *EF3-1b1*) vastgesteld. Verder wordt ook de bredere toepasbaarheid van de resultaten bij de Zandmotor onderzocht (*EF2-3a*) voor andere vormen megasuppleties en vooroeversuppleties.

Middels numerieke simulaties met Delft3D is vastgesteld dat vooroever- en megasuppleties een verschillend effect hebben op de bodemsamenstelling van de omliggende kust, omdat andere hydrodynamische processen een dominante rol spelen bij de verspreiding van het sediment. De sedimentsamenstelling op en rondom een typische vooroeversuppletie wordt sterk beïnvloed door golfkarakteristieken, initiële korrelgrootteverdeling van het suppletiemateriaal en de diepteligging van de vooroeversuppletie. Voor megasuppleties zijn daarentegen met name de getijkarakteristieken en de breedte van de megasuppletie van invloed. De resultaten laten zien dat de effecten op de bodemsamenstelling rondom een megasuppletie sterker zijn én in een groter gebied aanwezig dan rondom een vooroeversuppletie. In het rapport worden praktische aandachtspunten benoemd ten behoeve van de praktijk van het kustbeheer.

Referenties

Opdracht tot uitvoering van het meerwerk op project "Zandmotor meerwerk 2019-2020", zaaknummer 31131954.0002

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	nov 2019	Anouk de Bakker Bas Huisman		Bart Grasmeijer		Frank Hoozemans	

Status

definitief

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Ontwerp Zandmotor	1
1.3	Evaluatievragen	2
1.4	Leeswijzer	3
2	Methodiek	5
2.1	Introductie	5
2.2	Literatuuroverzicht	5
2.3	Studiegebied en data bronnen	7
2.4	Numeriek model en scenario's	8
2.4.1	Modelbeschrijving en modelopzet	8
2.4.2	Scenario's	9
2.5	Analysetechnieken	11
2.6	Beantwoording evaluatievragen	12
3	Resultaten korrelgrootteveranderingen	13
3.1	Introductie	13
3.2	Megasuppleties	13
3.2.1	Zandmotor	13
3.2.2	Andere configuratie megasuppleties	18
3.3	Vooroeversuppleties	19
3.3.1	Halfjaar simulatie Ter Heijde 1997	19
3.3.2	Gevoeligheidsanalyse	23
3.4	Discussie	37
4	Conclusie en toetsing evaluatievragen	39
4.1	Belangrijkste bevindingen	39
4.2	Toetsing evaluatievragen	42
4.2.1	Evaluatievraag EF3-1b1: Sedimentsamenstelling van vooroever en lagune	42
4.2.2	Evaluatievraag EF2-2a: Mechanismen verandering sedimentsamenstelling	43
4.2.3	Evaluatievraag EF2-3a: Spin-off kennis	44
5	Referenties	47
	Bijlage(n)	
A	Overzicht modelscenario's	A-1

1 Introductie

1.1 Achtergrond

Tussen mei en juli 2011 is de grootschalige 'Zandmotor' suppletie geplaatst langs de Delflandse kust. Deze suppletie is gericht op het versterken van de kust door het aanbrengen van zand in het lokale kuststelsel om de verwachte toekomstige onderhoudsbehoefte te dekken. Met de Zandmotor kan tevens meer recreatie en natuurgebied worden gecreëerd. In de Projectnota / MER Zandmotor Delflandse Kust (PZH, 2010) zijn de volgende doelstellingen geformuleerd:

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

Aanvullend is ook een vierde doel geformuleerd gericht op het beheer van recreatieveiligheid, natuur, grondwater, duinen en vaargeulen.

Deze studie focust zich op de invloed van de Zandmotor en de meer gangbare vooroeversuppleties op de sedimentsamenstelling van de kust, die belangrijk is voor de habitat voor bodemdieren en platvissen. Dit valt onder MER doel II waarin kennisontwikkeling over de meerwaarde van de Zandmotor voor de natuur én innovatie voor toekomstige maatregelen aandacht krijgen.

1.2 Ontwerp Zandmotor

De Zandmotor is aangelegd als een haakvormige suppletie van 18,7 miljoen m³ welke aangevuld is met vooroeversuppleties aan beide zijden van de haak met een volume van respectievelijk 500,000 m³ (noordzijde) en 2 miljoen m³ (zuidzijde). Figuur 1.1 toont een foto na aanleg. In totaal gaat het dan om ruim 21 miljoen m³ gesuppleerd zand. Het extra verkregen oppervlak boven *Mean Sea Level (MSL)*, bestemd voor recreatie en natuur, was na aanleg van de Zandmotor circa 128 hectare.



Figuur 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 ervoor zorgt dat er andere types ecologische habitat ontstaan 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. Ook vindt er duinvorming plaats aan de landwaartse kant van de Zandmotor.

1.3 Evaluatievragen

Voor 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). Recent zijn deze enigszins bijgesteld om de vragen beter toetsbaar te maken (Taal et al., 2017; Huisman, 2018). Hypothesen zijn omschreven tot evaluatievragen die betrekking hebben 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 2-2 welke betrekking heeft op ecologische systeemkennis (“meerwaarde van de Zandmotor voor de natuur ten opzichte van reguliere suppleties”). Vastgesteld is namelijk dat er sortering optreedt van zand zeewaarts van de kop van de Zandmotor (Huisman et al., 2016) én op het strand (Hoonhout, 2017). Verondersteld wordt dat met name de ontwikkeling onder water van invloed is op de ecologie van de kust, aangezien het vermogen van platvissen om te schuilen wordt verminderd (MacLachlan, 1996).

Huisman et al. (2018) heeft voor de Zandmotor onderzocht welke processen bijdragen aan het uitsorteren van het zand. Een doorvertaling naar de invloed van andere typen suppleties op de bodemsamenstelling is echter nog niet gemaakt. Doel van de huidige studie is om op basis van numerieke modelberekeningen een onderbouwde inschatting te kunnen maken van de effecten van suppleties op bodemsamenstelling én het relatieve belang van de

eigenschappen van de suppleties (bijv. lengte, volume) en omgevingsvariabelen (bijv. hydrodynamica en bodemsamenstelling). Het gaat om de volgende evaluatievragen:

EF3-1b1: Hoe heeft de diversiteit in sedimentsamenstelling zich ontwikkeld in de lagune en de vooroever?

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

Daarnaast beantwoorden we de volgende vraag over de toepasbaarheid van kennis van de Zandmotor voor toekomstige suppleties:

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

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de analysemethodiek, de beoordeelde suppleties en het toegepaste numerieke model. Hoofdstuk 3 presenteert de modelresultaten en analyseert de relevante mechanismen en factoren voor veranderingen in korrelgroottesamenstelling. De belangrijkste bevindingen worden samengevat in Hoofdstuk 4, waarin ook de vertaling wordt gemaakt naar de praktijk van het kustbeheer met de beantwoording van de evaluatievragen.

2 Methodiek

2.1 Introductie

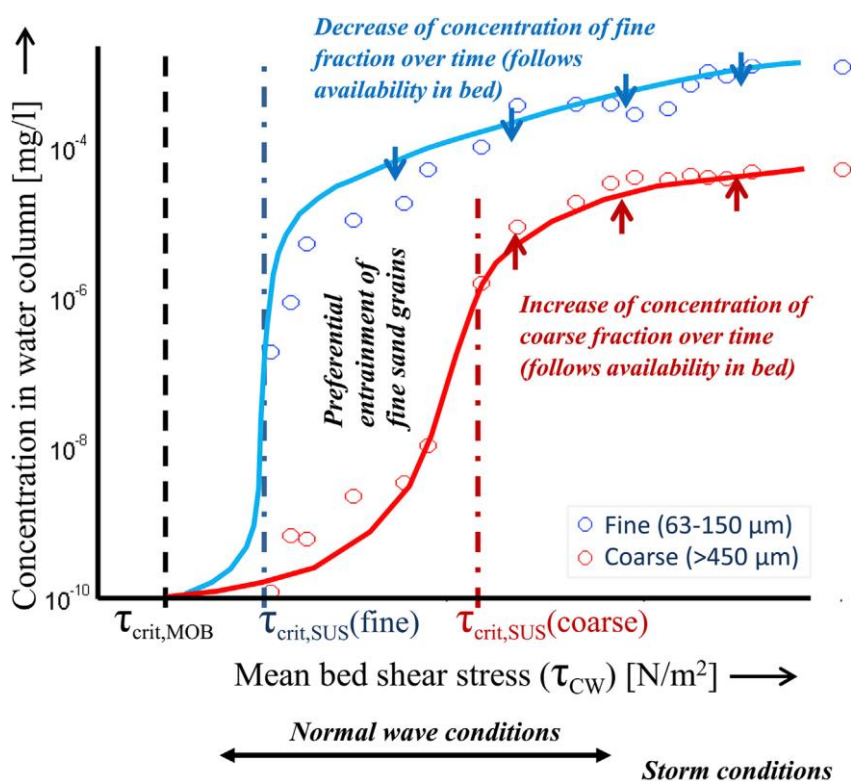
Dit hoofdstuk beschrijft de methodiek voor het onderzoeken van korrelgroottevariëaties op en rondom verscheidene typen suppleties. Zoals genoemd in de Introductie is dit project een opvolging van de studies naar korrelgrootteverdeling rondom de megasuppletie de Zandmotor (Huisman et al., 2016; 2018). Dezelfde methodiek wordt nu toegepast op verschillende geïdealiseerde typen vooroever- en megasuppleties. Hierbij wordt gebruik gemaakt van numerieke berekeningen met Delft3D. Allereerst wordt hieronder een kort overzicht gegeven van de effecten van bodemsamenstelling en de relevante onderliggende fysische processen die de sedimentsamenstelling beïnvloeden (Paragraaf 2.2). Hierna wordt een korte beschrijving gegeven van het studiegebied en databronnen (Paragraaf 2.3), het Delft3D model en de modelopzet (Paragraaf 2.4). De analysemethode wordt kort behandeld in Paragraaf 2.5, waarna in Paragraaf 2.6 gespecificeerd wordt hoe de evaluatievragen zullen worden beantwoord.

2.2 Literatuuroverzicht

Op veel stranden in de wereld is de bodemsamenstelling ruimtelijk variërend (Holland en Elmore, 2008). Meestal wordt dit niet meegenomen in effectrapportages bij ingrepen aan de kust zoals zandsuppleties. De morfologie van de kust wordt echter wel sterk bepaald door de bodemsamenstelling en ook is een veranderende bodemsamenstelling van groot belang voor de aanwezige ecologische habitats. Kleine veranderingen in bodemsamenstelling kunnen grote effecten hebben op bijvoorbeeld de benthische gemeenschappen (McLachlan, 1996) en nestelcapaciteiten voor jonge vissen (Gibson en Robb, 1992; Knaapen et al. 2003).

In het algemeen is er sprake van een natuurlijke verfijning van het bodemmateriaal in zeewaartse richting, met het grofste materiaal aanwezig in de swash zone (o.a. Inman, 1953). In de aanwezigheid van zandbanken kan de bodemsamenstelling afhangen van verscheidene factoren. Zo zijn er studies die aantonen dat er op de zandbanken zelf fijn materiaal aanwezig is, met grover materiaal in de troggen (Moutzouris et al. 1991 en Katoh en Yanagishima, 1995), terwijl het tegenovergestelde is geobserveerd voor Nederlandse kustgebieden (Van Straaten, 1965).

De ruimtelijke variatie van bodemsamenstelling in de kustdwarse en kustlangse richting is vaak het resultaat van het verschil in gedrag van bodemmateriaal op dezelfde hydrodynamische forcering. Een verschil in sortering kan worden veroorzaakt door verschillen in opwoeling (suspensie) en transport van sediment. Fijn materiaal wordt in suspensie gebracht bij een lagere kritische bodemschuifspanning dan grover (en dus zwaarder) sediment, en wordt daardoor sneller geërodeerd en relatief verder verspreid over het aangrenzende gebied (Figuur 2.1).



Figuur 2.1: Schematische representatie van het zand-opwoelingsgedrag van fijne en grove zandfracties onder gemiddelde en storm condities. De gemodelleerde tijdsgemiddelde zandconcentraties op een locatie zeewaarts van de Zandmotor megasuppletie (E71856m, N453237m RD op 11 m waterdiepte) van een 3D model (H2) simulatie, zijn gerepresenteerd door de cirkels voor de zandfracties. Merk op dat de typische schaal van bodemschuifspanning onder gemiddelde en stormcondities aangegeven wordt onder de grafiek (naar Figuur 16 van Huisman et al., 2018).

De invloed van stormen vertaalt zich in het grover worden van het bodemmateriaal door uitspoeling van het fijne sediment, met observaties die verschillen aantonen tot wel 100 μm bij een storm met een significante golfhoogte (H_{m0}) van 4 m (Stauble en Cialone, 1996). Seizoensvariaties reflecteren dit gedrag, met over het algemeen een grovere bodemsamenstelling in de winter, wanneer stormen meer frequent zijn, en een fijnere bodemsamenstelling in het kalmere zomerseizoen. Dit verschilt per zone. In de swash zone kunnen de seizoensverschillen tot 200 μm bedragen (voor de mediane korreldiameter). Op 8 m waterdiepte zijn seizoensvariaties waargenomen tot $\sim 20 \mu\text{m}$ (Medina, 1994). Bij Katwijk en Noordwijk werd door Terwindt (1962) vastgesteld dat er een algehele vergroving van circa 30 μm kan optreden na een storm. Echter bij de grootschalige Zandmotor suppletie bleek er buiten de actieve zone (i.e. dieper dan 4 m) een verfijning op te treden van de mediane korreldiameter van 30 tot 40 μm na een storm. In het gebied van de waterlijn tot aan de brekerbank was sprake van een kleine vergroving (10 tot 30 μm).

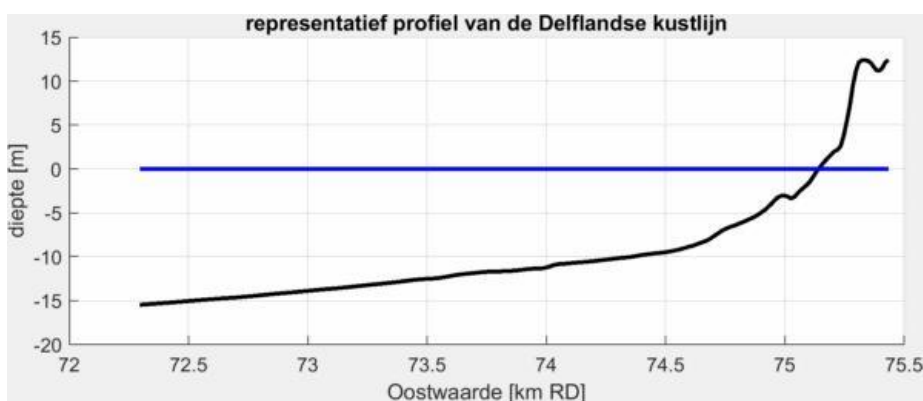
Buiten de natuurlijke ruimtelijke variatie in bodemsamenstelling in de kustzone, is ook het effect van zandsuppleties op de bodemsamenstelling nog niet goed in kaart gebracht. Voor de Zandmotor zijn studies verricht van de veranderingen in de mediane korreldiameter (Huisman et al., 2016 en 2018), maar voor andere typen suppleties is dit nog niet gebeurd. Relevant is dat de strand-, vooroever- en megasuppleties elk op een verschillende wijze beïnvloed worden door de fysische processen, en daarom naar verwachting ieder ook een andere invloed hebben op de omliggende bodemsamenstelling. Zo kent het zandtransport op strand- en megasuppleties bijvoorbeeld een relatief sterke kustlangse component in

vergelijking met vooroeversuppleties waar de kustdwarse component domineert (65-80% volgens Huisman et al., 2019).

In deze rapportage kwantificeren we het effect van verscheidene typen kustsuppleties (verschillend in volume/vorm en positie) op het omliggende kustgebied, onder verschillende golf en getij condities.

2.3 Studiegebied en data bronnen

De Delflandse kust wordt hier als voorbeeld kustzone gebruikt, door de relatief uniforme kustlijn in kustlangse richting. De Delflandse kust wordt gekenmerkt door een strandhelling van 1:35 met een mildere helling van 1:150-1:200 in de brekerszone (MSL tot MSL -8 m), (Ruessink et al., 2003; Rijkswaterstaat, 2017b). Met behulp van Jarkusdata en Vaklodingendata van de kustlijn net ten noorden van de Zandmotor wordt een representatieve kustlangs-uniforme bathymetrie gecreëerd (zie Figuur 2.2) over een kustlangse afstand van 9 km.



Figuur 2.2: Representatief dwarsprofiel van de Delflandse kust.

Aan de kustlangs-uniforme bathymetrie worden verschillende typen suppleties toegevoegd. Als voorbeeld voor vooroeversuppleties is de suppleties van Ter Heijde '97 genomen (zie Tabel 2.1). Als voorbeeld voor megasuppleties zijn de omvang en volume van ~21,5 miljoen m³ van de Zandmotor gebruikt, gegoten in verschillende versimpelde gaussische vormen. Dit zal in meer detail worden beschreven in paragraaf 2.4.2.

Locatie	Datum	Volume [10 ⁶ m ³]	Lengte x Breedte [km]	Diepte [m MSL]	Type
Ter Heijde '97	Aug '97	0,9	1,7 x 0,3	-8 tot -5	vooroever
Zandmotor '11	Apr-Aug '11	21,5	2,5 x 1	-11 tot 3	megasuppletie

Tabel 2.1: Overzicht van suppleties aan de Delfland kust.

Het natuurlijke sediment aan de Delflandse kust wordt gekenmerkt door een mediane korrelgrootte¹ D₅₀ aan de waterlijn van 300-400 µm, die in zeewaartse richting verfijnt tot een D₅₀ van 150-200 µm bij MSL -8 m en dieper (Terwindt, 1962; Van Straaten, 1965).

¹ diameter waarbij 50% van de massa bestaat uit sedimentkorrels met een diameter minder dan deze waarde

Suppletiezand wordt in het algemeen gewonnen op 10-50 km afstand van de kustzone waar het wordt opgebracht omdat verwacht wordt dat de zandkarakteristieken hier in het algemeen goed aansluiten bij het natuurlijk aanwezige materiaal in de suppletiezone (De Vincenzo et al., 2018). Het sediment voor de megasuppletie de Zandmotor was relatief uniform en goed gemengd met een gemiddelde korrelgrootte diameter D_{50} van 278 μm , met een standaarddeviatie van 30 μm (Huisman et al., 2016). Dit zal als initiële bodemsamenstelling worden gebruikt in de berekeningen met Delft3D.

2.4 Numeriek model en scenario's

2.4.1 Modelbeschrijving en modelopzet

De ontwikkeling van de korrelgrootteverdeling van en rondom de suppleties wordt geanalyseerd met het numerieke model Delft3D (Lesser et al., 2004). De opzet van het model wordt gelijk gehouden aan de studie van Huisman et al. (2018), waarin de ontwikkeling van de korrelgrootteverdeling op en rondom de Zandmotor uitgebreid is gevalideerd tegen de D_{50} waarden van genomen sedimentmonsters (Huisman et al., 2016).

Het Delft3D model gebruikt de ondiep-water vergelijkingen in 2DH en 3D berekeningen van stromingen, en een golfmodel (SWAN) voor de representatie van golftransformatie richting de kust (Booij et al., 1999). Het hier gebruikte kromlijng rekenrooster omvat de Delflandse kust, en is 9 km in de kustlangse richting en 4 km in kustdwarse richting met een resolutie variërend tussen zo'n 85 m op diep water tot ongeveer 35 m x 15 m dicht bij de Zandmotor/suppleties. Het rekenrooster voor SWAN is verder uitgebreid naar 4,3 km in kustdwarse richting en 18 km in kustlangse richting om de effecten van schuin-invallende golven goed mee te kunnen nemen, met een resolutie van 190 m x 90 m aan de randen tot 25 m x 15 m bij de suppletie.

Randvoorwaarden voor de stroming zijn afgeleid uit het 3D-hydrodynamische model voor de Noordzee (DCSM6; Zijl et al. 2013). Om seizoenvariaties bij vooroever-suppleties te bestuderen worden enkele simulaties gedaan met het golfklimaat van 1997-1998 ter hoogte van de Ter Heijde suppletie. Hiervoor is de gemeten offshore golfhoogte bij het Europlatform naar de kust toe getransformeerd met een Delft3D-wave golfmodel (Huisman et al., 2019). De waterstanden worden opgelegd als randvoorwaarden aan de zeewaartse rand van het model, terwijl getijstroming wordt meegenomen als waterstands-gradiënten (Neumann type) aan de laterale randen. Bij een aanvullende gevoeligheidsanalyse naar fysische processen en de vorm en ligging van de suppletie wordt het opgelegde golfklimaat in eerste instantie constant gehouden. Verscheidene constante golfklimaten worden aanvullend opgelegd om het effect van golfwerking te onderzoeken. Het roller model (Roelvink, 1993) wordt opgelegd om de door brekende golven gecreëerde turbulentie te verdelen in de brekerszone.

De initiële korrelgrootte wordt uniform verdeelt over het domein met mediane korrelgrootte (D_{50}) van 278 μm , een D_{10} van 150 μm en een D_{90} van 480 μm . Zandtransport wordt berekend met vooraf gedefinieerde korrelgrootte fracties (Van Rijn, 2007b) met de Transpor2004 vergelijking (Van Rijn et al. 2004; Van Rijn 2007a). De morfologische tijdschaal in het model is acht maal de hydrodynamische tijdschaal voor constante laag-energetische condities (Ranasinghe et al., 2011) om voor een beperkte rekentijd een periode van 2 maanden te kunnen doorrekenen. Onder energetische condities is deze schaling (morfac genoemd) naar 4 bijgesteld, en is afwezig (geen morfac) bij de jaarlange simulaties. Transportsnelheden zijn gekalibreerd tot 50% van de standaard gekalibreerde waarde, wat

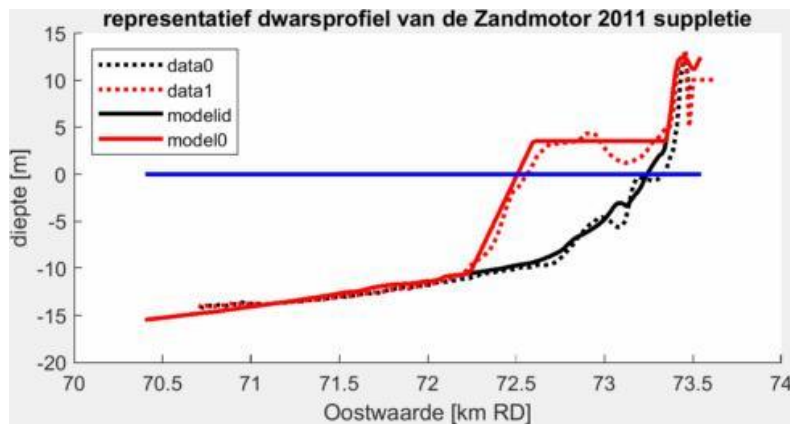
een goede *hindcast* geeft voor de morfologische ontwikkelingen van de Zandmotor suppletie voor een model met een enkele korrelgrootte fractie (zelfde instellingen als Luijendijk et al, 2017). Een multi-lagen benadering met een actieve laag wordt gebruikt om veranderingen in bodemsamenstelling bij te houden (Ashida en Michiue, 1973; Ribberink, 1987; Sloff en Mosselman, 2012). Hierdoor kan de bijdrage van iedere korrelgroottefractie bijgehouden worden per laag en per rekenrooster-cel. Een 'transportlaag' van 0,1 m is aanwezig aan de bovenkant van de bodem waar de bodemsamenstelling aangepast wordt door de tijd heen als gevolg van erosie en/of sedimentatie. Deze transportlaag beweegt omhoog en omlaag in de bodem als er erosie of sedimentatie plaatsvindt (met een vaste dikte). Voor meer informatie zie Huisman et al. (2018).

2.4.2 Scenario's

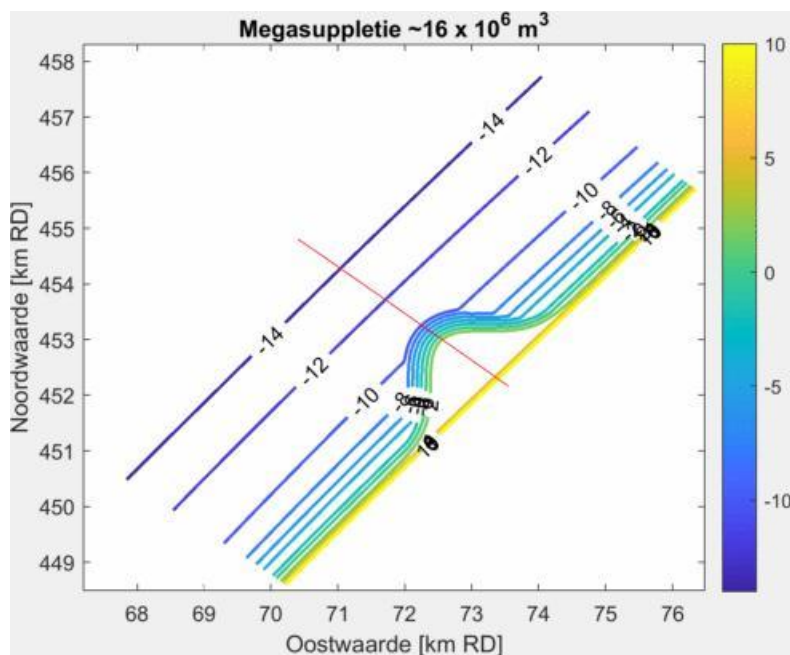
Als referentie-randvoorwaarde wordt een gesimplificeerde buitengaatse conditie met een representatief getij voor de Delflandse kust, en een constante golfconditie van $H_{m0} = 1$ m, $T_p = 5$ s, $dir = 310^\circ$ opgelegd. We volgen hier Huisman et al. (2018) die aantonen dat dit een goede benadering is voor het bestuderen van de jaargemiddelde korrelgroottevariaties. Hierbij worden verschillende suppletievormen getest, variërend van een typische vooroeversuppletie tot megasuppletie. Daarna worden voor één typische vooroeversuppletie buitengaatse condities en initiële sedimentkarakteristieken gevarieerd (een twintigtal variaties) en de effecten daarvan op de korrelgroottevariaties op en rondom de suppletie onderzocht, voor een simulatieperiode van ~2 maanden (64 dagen) voor kalme golfcondities, en 1 maand voor meer energetische condities ($H_{m0} > 2$ m). Om de effecten van een morfologische opstarttijd op het kustprofiel eruit te filteren en zo te kunnen focussen op de effecten van fysische processen rondom de suppletie, worden er ook simulaties uitgevoerd voor een representatief kustprofiel zonder suppletie onder de verscheidene forceringen. De resultaten voor de simulaties mét suppletie worden vervolgens hiermee gecorrigeerd. Voor een compleet overzicht van de modelscenario's zie Appendix A.

Megasuppleties

Megasuppleties zoals de Zandmotor of de Hondsbossche-Pettemerzeewering zijn relatief recente ontwikkelingen, in een zoektocht naar een kosten-effectieve manier van suppleren om de Nederlandse kust op lange termijn stabiel te houden. Zo is de Zandmotor aangelegd voor de kust van Zuid-Holland om daar een grote buffer te creëren tegen kusterosie voor de komende decennia. De evolutie van bodemsamenstelling op en rondom deze megasuppletie is uitgebreid bestudeerd door Huisman et al. (2016) en Huisman et al. (2018). De belangrijkste resultaten van deze en aanvullende analyses zullen worden besproken in paragraaf 3.2.1. Om de invloed van andersoortige vormen/volumes megasuppleties op de omliggende bodemsamenstelling te testen worden er nog drie megasuppleties gedefinieerd op basis van een gaussische vorm, geschaald naar de hele breedte/lengte/volume (breedte = 1 km, volume = $16,0 \times 10^6$ m³) van de originele breedte van de Zandmotor suppletie, en een kwart (breedte = 0,25 km, volume = $2,3 \times 10^6$ m³) en de helft (breedte = 0,5 km, volume = $6,0 \times 10^6$ m³) van de originele breedte van de Zandmotor suppletie. In Figuur 2.3 wordt het schematische dwarsprofiel bij de kop van de Zandmotor geïllustreerd, en een bovenaanzicht van de bathymetrie is zichtbaar in Figuur 2.4.



Figuur 2.3: Typische dwarsdoorsnede vooraf aan de Zandmotor suppletie (8-6-2010 - zwart gestippelde lijn) en net na de suppletie (3-8-2011 - rood gestippeld). Met de basis bathymetrie zoals toegepast in alle model simulaties (zwarte lijn), en de basis bathymetrie mét de suppletie gebaseerd op de Zandmotor megasuppletie (rode lijn).

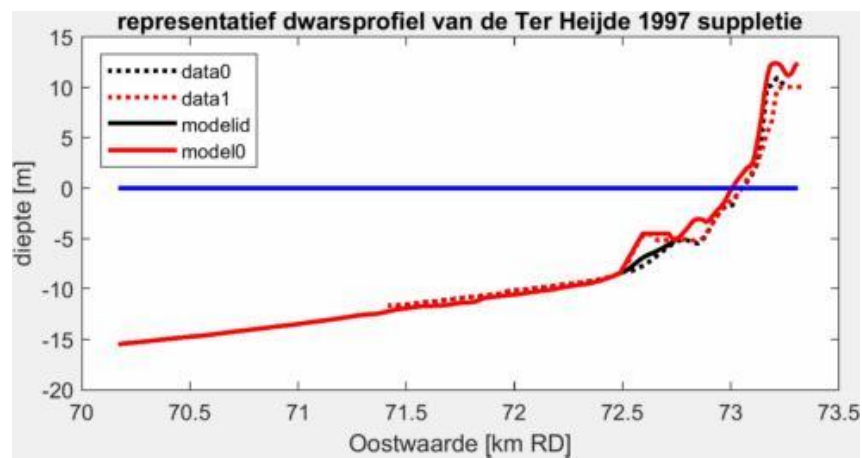


Figuur 2.4 : Bathymetrie van $\sim 16 \times 10^6 \text{ m}^3$ gebaseerd op de megasuppletie de Zandmotor in 2011. De rode lijn geeft de locatie van het dwarsprofiel uit Figuur 2.3 weer.

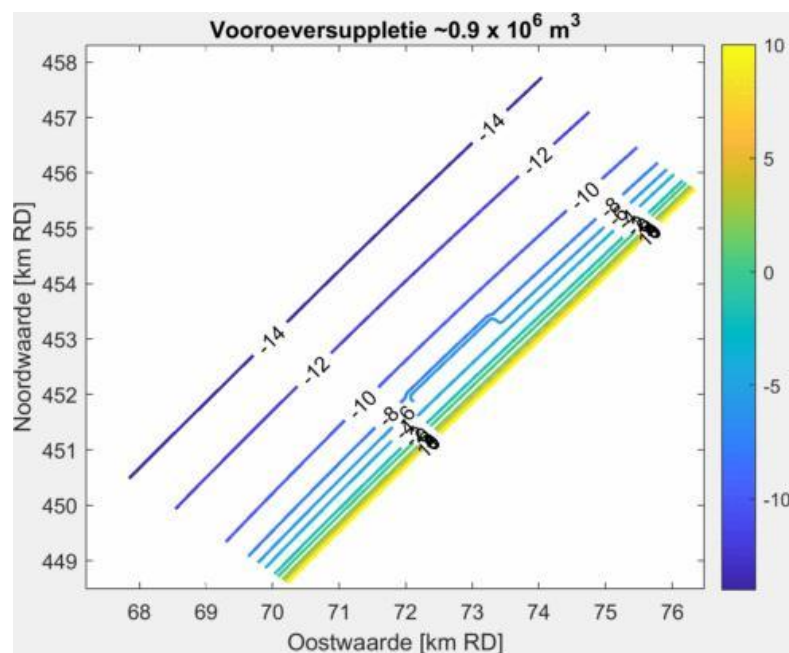
Vooroeversuppleties

Tegenwoordig worden regelmatig grote vooroeversuppleties uitgevoerd (Van der Spek et al., 2013). Deze vooroeversuppleties zijn relatief lange zandlichamen in waterdieptes van -4 tot -10 m. Dit is een relatief simpele en kostenbesparende manier van suppleren omdat de baggerschepen tot dicht bij de suppletielocatie kunnen komen.

Als referentie wordt een vooroeversuppletie gedefinieerd gebaseerd op de Ter Heijde '97 suppletie (zie Tabel 2.1). Het representatieve dwarsprofiel van de Delflandse kust (Figuur 2.2), wordt aangevuld met deze geschematiseerde suppletie (zie Figuur 2.5 en Figuur 2.6).



Figuur 2.5: Typische dwarsdoorsnede vooraf aan de Ter Heijde '97 suppletie (10-07-1997 zwart gestippelde lijn) en net na de suppletie (01-01-1998 rood gestippeld). Met de basis bathymetrie zoals toegepast in alle model simulaties (zwarte lijn), en de basis bathymetrie mét de suppletie gebaseerd op Ter Heijde '97 (rode lijn).



Figuur 2.6: Bathymetrie vooroeversuppletie van $\sim 0.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ gebaseerd op de suppletie bij Ter Heijde in '97.

2.5 Analysetechnieken

De resultaten van de modelsimulaties worden geanalyseerd middels overzichtskaarten en dwarsprofielen van onder andere morfologische verandering, stromingen en bodemsamenstelling voor verschillende momentopnamen. Aansluitend worden tendensen bepaald om de verscheidenheid aan simulaties terug te brengen tot enkele onderbouwde conclusies.

2.6 Beantwoording evaluatievragen

Op basis van de nieuw verkregen inzichten worden de evaluatievragen beantwoord. De invloed van de suppletie op de omliggende vooroever wordt bestudeerd met het oog op evaluatievraag EF3-1b1, inzicht in de relevante mechanismen wordt gebruikt om evaluatievraag EF2-2a te beantwoorden. Vervolgens wordt de opgedane kennis vertaald naar toekomstige zandige strategieën om te kunnen antwoorden op evaluatievraag EF2-3a.

3 Resultaten korrelgrootteveranderingen

3.1 Introductie

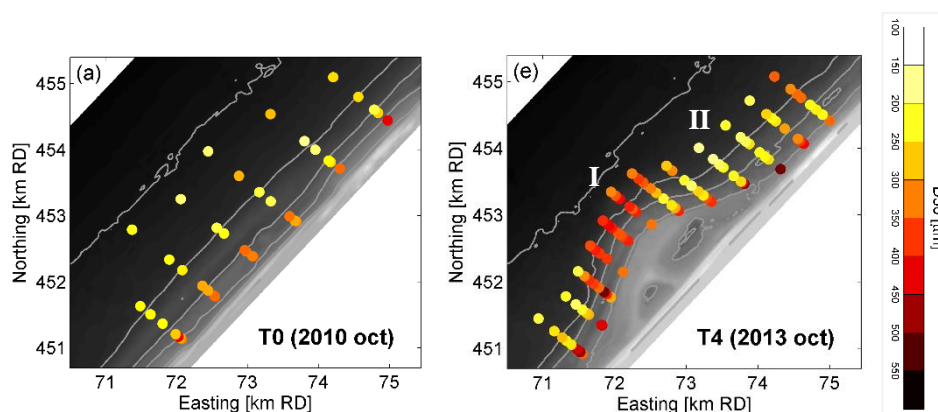
Dit hoofdstuk bespreekt de resultaten van de individuele Delft3D simulaties. Om de invloed van de fysische processen (golven en getij) en initiële suppletie karakteristieken (vorm, ligging, korrelgrootte etc.) op de veranderende bodemsamenstelling op en rondom de suppletie in detail te kunnen bestuderen zijn er velerlei variaties uitgevoerd ten opzichte van de referentiesimulatie, zoals beschreven in het methode Hoofdstuk 0 - en Appendix A. Hieronder worden eerst het gedrag van megasuppleties (paragraaf 3.2) en de referentievooroeversuppletie bij Ter Heijde van 1997 (paragraaf 3.3) besproken, waarna een gevoeligheidsstudie naar de invloed van de fysische processen en initiële karakteristieken van de suppletie wordt uitgevoerd. Als laatste worden de belangrijkste aannames bediscussieerd (paragraaf 3.4).

3.2 Megasuppleties

Deze paragraaf presenteert de verwachte veranderingen in bodemsamenstelling op en rondom megasuppleties. Eerst zullen de ontwikkelingen in korrelgrootteverdeling voor de Zandmotor worden samengevat, waarna ook twee andere configuraties zullen worden bestudeerd.

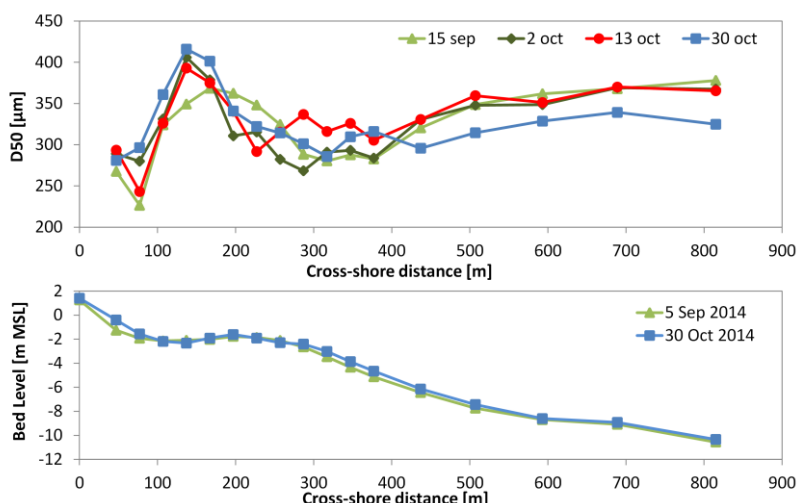
3.2.1 Zandmotor

Monitoring van de sedimentsamenstelling bij de Zandmotor (Huisman et al., 2016) heeft laten zien dat de mediane korrelgrootte (D_{50}) na aanleg van de Zandmotor in 2011 aanzienlijk grover is dan de situatie hieraan voorafgaand in 2010 (Figuur 3.1). De korreldiameter (D_{50}) is lokaal tot meer dan 200 μm grover bij de kop van de Zandmotor (zone I in Figuur 3.1), terwijl er aan de noord- en zuidzijde van de Zandmotor juist depositie van relatief fijner sediment optreedt (zone II in Figuur 3.1). Hierdoor is de mediane korreldiameter circa 50 μm fijner voor het diepere deel van het kustdwarse profiel aan de noordzijde van de Zandmotor.



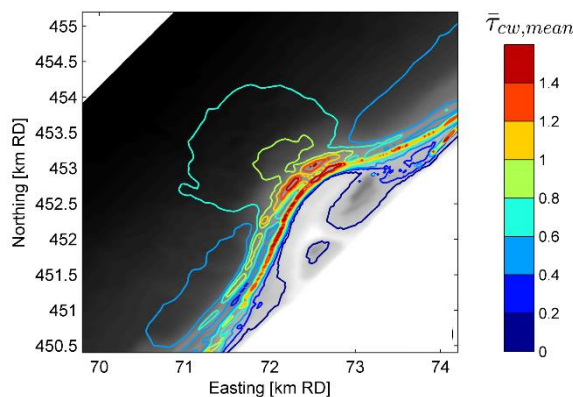
Figuur 3.1 Mediane korreldiameter voor de situatie voor en na aanleg van de Zandmotor (Huisman et al., 2016).

Ook is de korrelgrootteverandering gemeten voor en na een storm (Figuur 3.2). Hierbij viel het op dat er op de kop van de Zandmotor (tussen ongeveer 4 en 10 m waterdiepte) een verfijning optrad van de korreldiameter van 30 tot 40 μm na deze storm. In het gebied van de waterlijn tot aan de brekerbank was sprake van een lichte vergroving (10 tot 30 μm), maar de variabiliteit in de korrelgrootte was hier voorafgaand aan de storm al groter dan in diep water. De observaties wijken af van wat gevonden is bij Katwijk en Noordwijk. Daar is door Terwindt (1962) vastgesteld dat er juist een vrij uniforme vergroving van circa 30 μm optrad na een storm ook op dieper water. Als reden voor dit verschil wordt benoemd door Huisman et al., 2016 dat er tijdens een storm voldoende energie is om ook de relatief grove toplaag aan het oppervlak te eroderen én te mixen met het onderliggende substraat. Deze uitgesorteerde toplaag ontstaat vooral tijdens relatief milde condities met getij, waarin er een veel grotere suspensiecapaciteit is van de fijnere korrelfractie dan van de grovere korrels (Huisman et al., 2018).



Figuur 3.2 Verandering mediane korreldiameter (D_{50}) na een storm op 22 Oktober 2014 (Huisman et al., 2016).

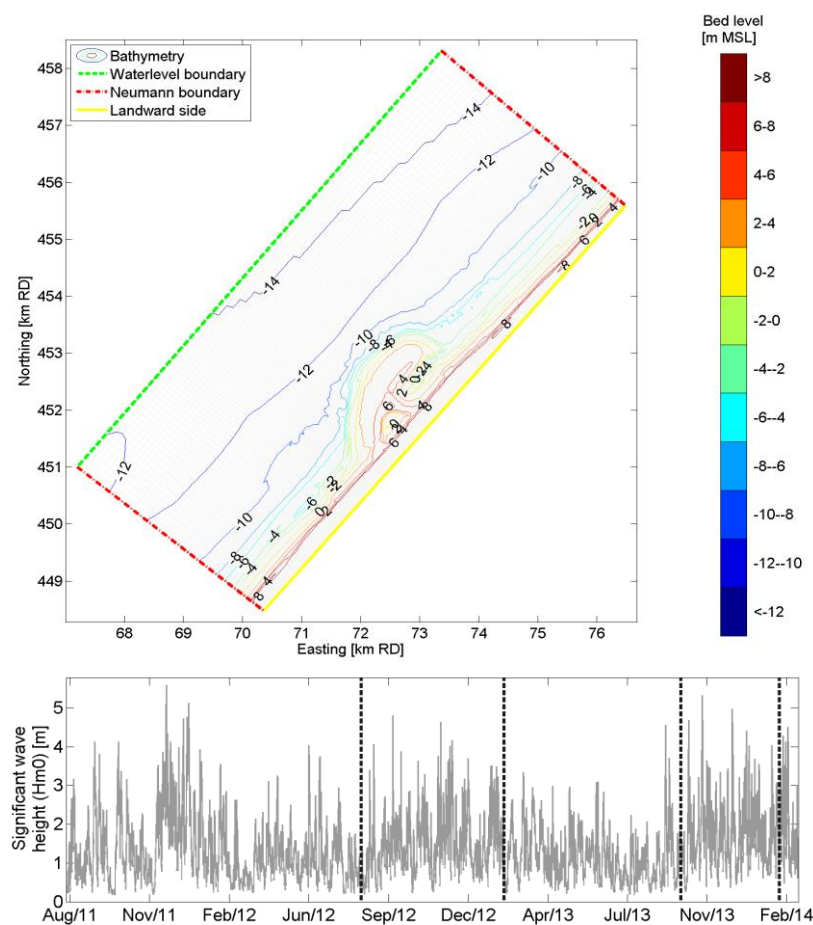
Het ruimtelijke patroon van de vergroving van de korreldiameter toont overeenkomsten met de gemiddelde bodemschuifspanningen die ontstaan door getijcontractie bij de Zandmotor. Een groot deel van de veranderingen in bodemsamenstelling op de vooroever van de Zandmotor dienen dan ook toegeschreven te worden aan de veranderingen in de waterbewegingen en niet alleen aan de verandering die ontstaan zijn als gevolg van de plaatsing van suppletiezand.



Figuur 3.3 Tijdsgemiddelde bodemschuifspanning (zonder orbitaalbeweging van de golven), februari 2014 (Huisman et al., 2016).

Binnen riviermorphologie is het al enige tijd gebruikelijk om sorteringsprocessen mee te nemen om zodoende beperkingen op te leggen aan erosie. De sorteringsprocessen zorgen ervoor dat een lokaal uitgesorteerde (ge-armourde) bodem kan ontstaan, waar grovere korrels aan de oppervlakte de erosie beperken van het fijnere, onderliggende sediment. Een dergelijke ontwikkeling met vergroving in een gebied met verhoogde bodemschuifspanningen speelt ook bij de Zandmotor een rol, alhoewel de veranderingen in bodemsamenstelling kleiner zijn dan bij rivieren het geval is.

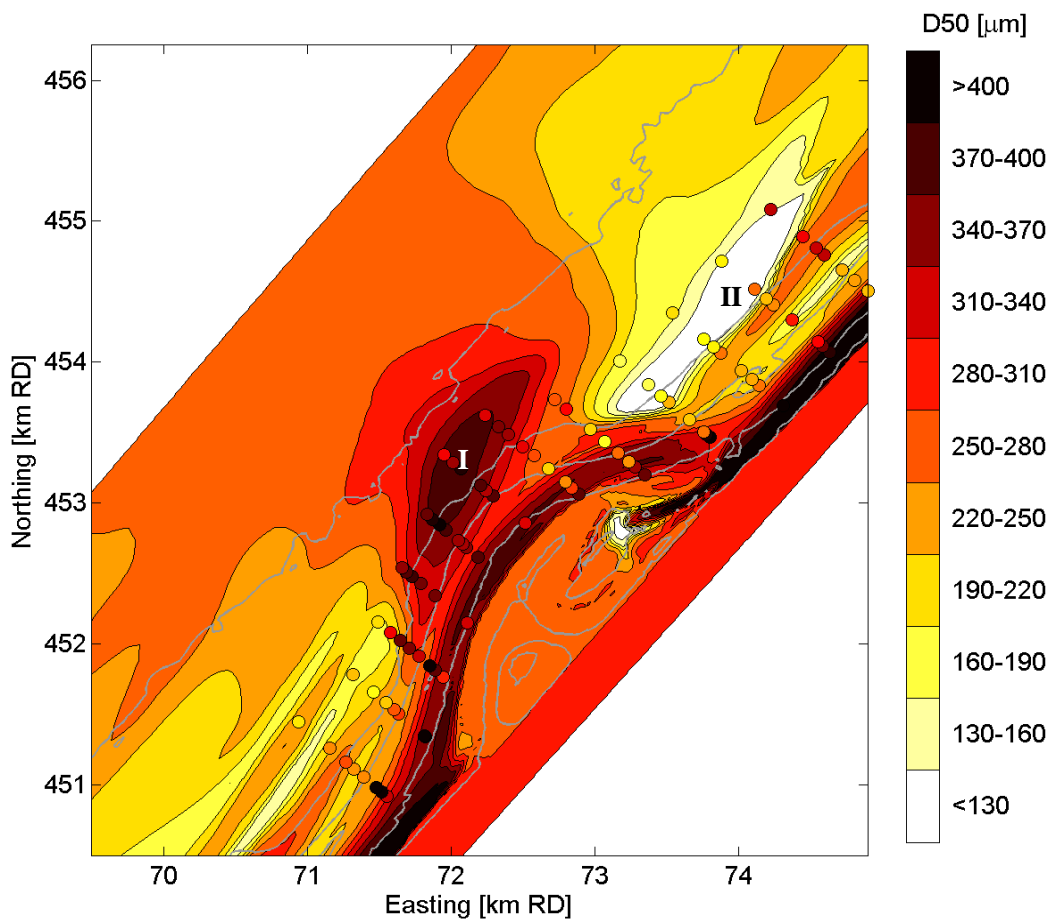
Berekeningen van de verandering van de bodemsamenstelling bij de Zandmotor zijn uitgevoerd met een Delft3D model met 5 sedimentfracties. Figuur 3.4 toont het modeldomein en de toegepaste golftijdserie. Het getij is gerepresenteerd middels een gemiddeld getij voor de beschouwde periode. Ter plaatse van de Zandmotor trekt het getij zich samen om langs de Zandmotor te stromen. Dit wordt ook wel getijcontractie genoemd en zorgt voor een lokale versnelling van de getijstrooming. Een tijdserie van gemeten golfcondities is op de zeewaartse rand van het model toegepast om de omstandigheden zo realistisch mogelijk te representeren.



Figuur 3.4 Modeldomein Zandmotor simulatie en toegepaste golftijdserie (Huisman et al., 2018).

Op basis van deze simulaties kan de morfologische verandering van de Zandmotor goed worden gerepresenteerd (o.a. Luijendijk et al., 2017; Huisman et al., 2018). De berekende erosievolumes op de haak zijn zeer vergelijkbaar met de metingen. De golf-gedreven

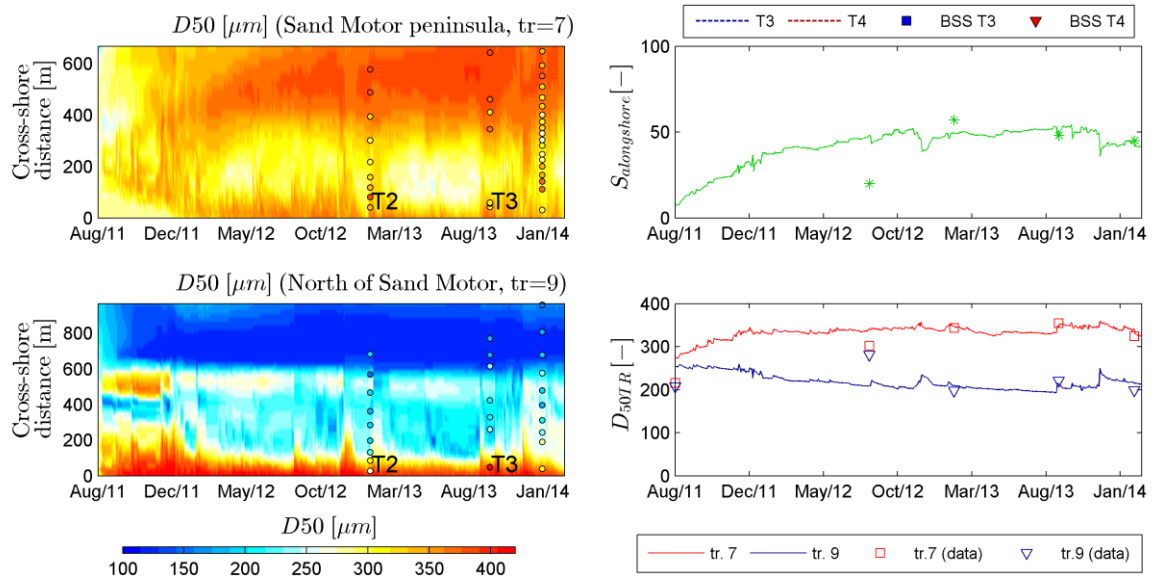
stroming in relatief ondiep water veroorzaakt het meeste transport van zand, maar de veranderingen in bodemsamenstelling vinden grotendeels in dieper water buiten deze zone plaats (Huisman, 2019). De bodemsamenstelling kan ook goed gerepresenteerd worden met het model (Figuur 3.6). Door de tijd heen ontwikkeld zich de vergroving van de bodemsamenstelling zeewaarts van de haak van de Zandmotor (zone I), en is tevens een depositiezone van fijner materiaal zichtbaar aan beide zijden (voornamelijk ten noorden) van de Zandmotor (zone II). Gepresenteerd wordt hier een 3D-model met 12 verticale lagen. De simulatie in 2DH mode gaf een vergelijkbaar goed resultaat voor de ontwikkeling van de bodemsamenstelling op de vooroever. Een vergelijkbare impact ontstaat als een uniforme initiële bodemsamenstelling wordt aangenomen in plaats van de gemeten kustdwarse D_{50} variatie.



Figuur 3.5 Hindcast van de bodemsamenstelling op de Zandmotor (achtergrond kleur) in relatie tot de metingen van bodemsamenstelling (markers) voor Oktober 2013.

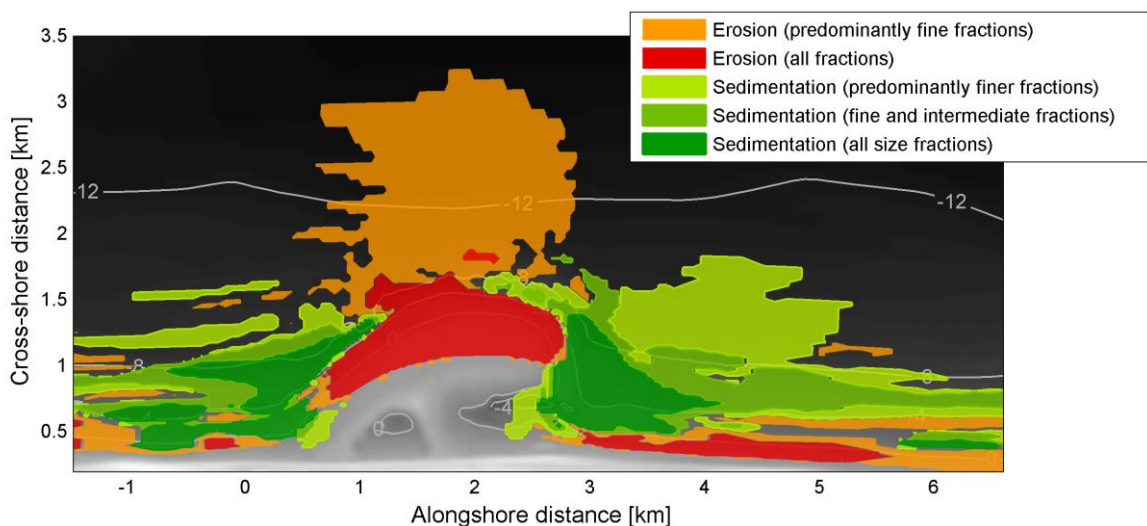
Figuur 3.6 toont de berekende ontwikkeling van de D_{50} in de tijd voor twee kustdwarse profielen samen met de meetgegevens. Dit betreft een profiel midden op de haak van de Zandmotor (TR7) en een profiel aan de noordzijde van de flank (TR9). De kleuren van de gemeten D_{50} (bolletjes in linker plots) matchen goed met de berekende waarde (achtergrondkleur). Ook de gemiddelde korreldiameter over het dwarsprofiel (D_{50}) en mate van verschil in D_{50} tussen de grootste en fijnste dwarsprofiel ($S_{alongshore}$) zijn zeer vergelijkbaar. De bodemsamenstelling ontwikkeld zich door de tijd heen naar een evenwicht toe. De reden hiervoor is de constante forcering door de getijcontractie bij de Zandmotor. Pas indien er

aanzienlijke erosie zal plaatsvinden zal de getijcontractie afnemen en daarmee een afname van de ruimtelijke variaties. Na enkele jaren kan echter een kleine teruggang gezien worden van de vergroving van het sediment.



Figuur 3.6 Hindcast van de verandering in bodemsamenstelling (D_{50}) op het centrum van de haak (Tr7) en aan de noordzijde (Tr9) van de Zandmotor. Meetgegevens worden aangegeven met gekleurde markers.

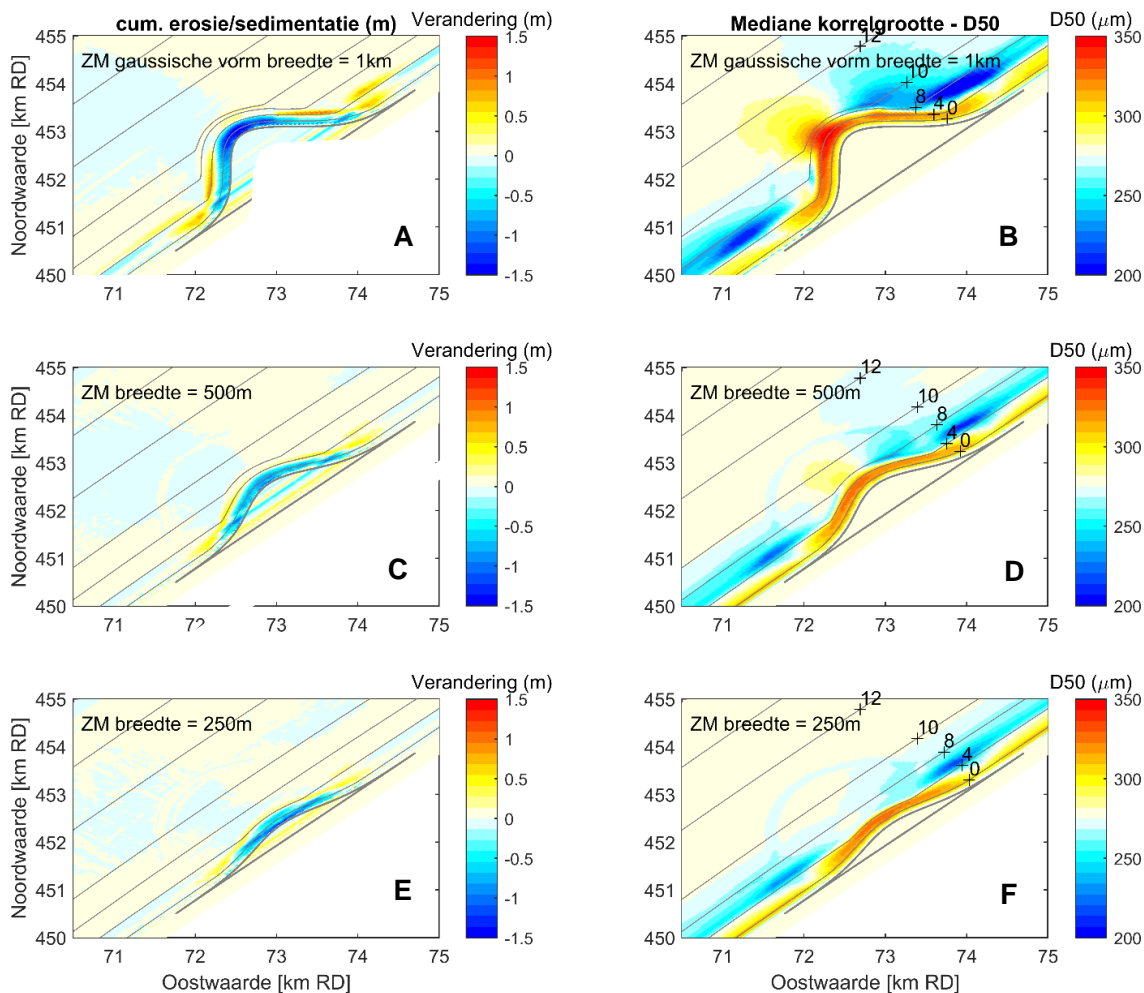
Op basis van de gemodelleerde erosie en sedimentatie voor de verschillende fracties kan een karakterisering gemaakt worden van de dominante veranderingen in deelgebieden rond de Zandmotor (Figuur 3.7). Hiervoor is de verandering van de fijne en grove fractie in de toplaag van het sediment bijgehouden, alsmede de optredende erosie. Het gebied op de vooroever van de Zandmotor met overwegend erosie van de fijne fracties en daardoor grote verandering in bodemsamenstelling is oranje, terwijl gebieden met sterke erosie van alle fracties rood zijn aangegeven. Opgemerkt moet worden dat het rode gebied ook een enigszins grovere bodemsamenstelling krijgt, maar in mindere mate dan het oranje gebied. De depositiegebieden worden gekenmerkt door overwegend fijn zand in dieper water en steeds grotere korreldiameters dichtbij de kust.



Figuur 3.7 Effectieve verandering van de bodemsamenstelling in relatie tot de erosie-sedimentatie per fractie (kleuren laten zien welke fractie de verandering in samenstelling in desbetreffend gebied heeft bepaald).

3.2.2 Andere configuratie megasuppleties

Gebaseerd op de resultaten voor de Zandmotor-megasuppletie in paragraaf 3.2.1 worden drie versimpelde gaussische vormen opgelegd in het model Delft3D. De eerste met een zelfde breedte, lengte en volume als de Zandmotor zelf (ter verificatie van de versimpelde gaussische vorm), en twee met een kleiner volume en smallere breedte (500 m en 250 m), om te bestuderen of dezelfde patronen kunnen worden geïdentificeerd voor kleinere megasuppleties. De initiële korrelgrootte wordt uniform verdeelt over het domein met mediane korrelgrootte (D_{50}) van 278 μm , een D_{10} van 150 μm en een D_{90} van 480 μm .



Figuur 3.8: (A-C-E) Cumulatieve erosie en sedimentatie na 2 maanden en (B-D-F) veranderingen in mediane korrelgrootte (D_{50}). Van boven naar onder: referentie-simulatie M0 (A-B); een breedte van 500m M1 (C-D); een suppletiebreedte van 250m M2 (E-F).

Evenals de resultaten voor de Zandmotor (paragraaf 3.2.1), laat de versimpelde configuratie zien dat aan de kop van de suppletie sterke erosie optreedt (tot 1,5 m erosie - Figuur 3.8A) door de versnelling van golfgedreven stromingen rondom de kop van de suppletie (niet getoond). Tevens valt te zien dat het geërodeerde sediment wordt afgezet aan de landwaartse randen van de suppletie en de aangrenzende kust. Dit beïnvloedt de ruimtelijke

verdeling van de bodemsamenstelling, die door relatief meer erosie van fijner materiaal aan de kop een toename van de mediane korrelgrootte (D_{50}) veroorzaakt van zo'n 60 μm (Figuur 3.8B). Op de aangrenzende stranden en iets zeewaarts ervan wordt het ge-erodeerde materiaal afgezet en dit zorgt voor verfijning van de lokale mediane korrelgrootte (afname van zo'n 80 μm). Door het versnelling van de stroming net ten zuiden van de kop treedt de sterkste erosie op en de mediane korrelgrootte grover wordt. Deze locatie hangt waarschijnlijk samen met dominante golfrichting en lokale getijkarakteristieken.

Dezelfde patronen zijn in mindere mate herkenbaar voor de smallere megasuppleties. Rond de koppen van de suppleties is een erosie van 0,5 m tot 1 m zichtbaar (Figuur 3.8C-E), met een toename van zo'n 40 μm (Figuur 3.8F) in mediane korrelgrootte rond de koppen, en een verfijning tot zo'n 40 μm zeewaarts van aangrenzende stranden (Figuur 3.8D-F) ten opzichte van de natuurlijke ruimtelijke variaties in D_{50} , zoals zichtbaar op de stranden verder van de suppletie af. We kunnen concluderen dat ook een relatief kleine megasuppletie het stromingsveld dusdanig beïnvloedt dat er aanzienlijke (~ 80 μm) ruimtelijke variatie ontstaat in bodemsamenstelling bovenop de natuurlijke variabiliteit.

3.3 Vooroever-suppleties

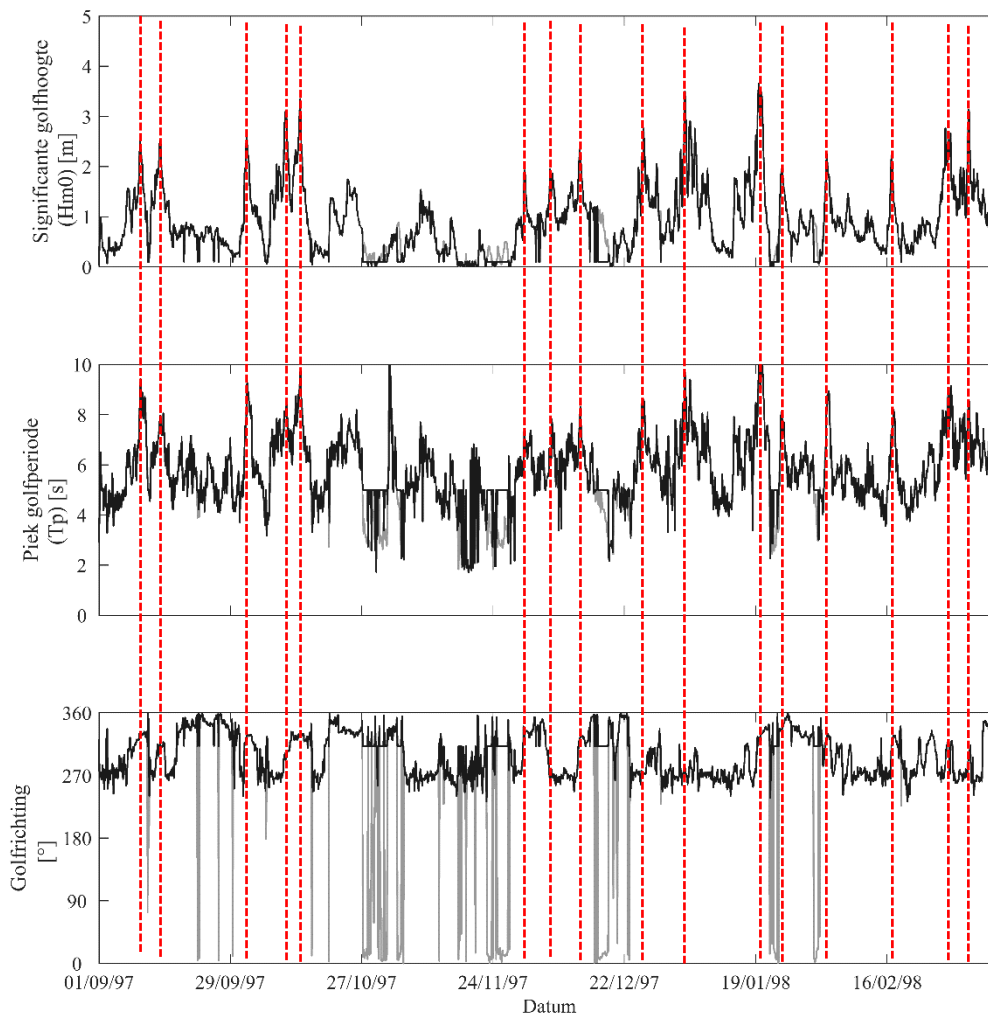
In deze paragraaf bespreken we de ruimtelijke variatie in bodemsamenstelling voor vooroever-suppleties. De verwachting is dat de kustdwarse component hier sterker zal zijn dan bij megasuppleties (Huisman et al., 2019). Vooroever-suppleties worden aangebracht op enkele meters onder de laagwaterlijn en veranderingen gaan daardoor over het algemeen langzaam (Hoekstra et al., 1996; Grunnet en Ruessink, 2005; Van Duin et al. 2004 en Ojeda et al., 2008).

3.3.1 Halfjaar simulatie Ter Heijde 1997

De vooroever-suppletie bij Ter Heijde 1997 wordt gebruikt als referentie (zoals beschreven in paragraaf 2.4.2), en als randvoorwaarde (tijdserie) wordt het lokale golfklimaat in de winter van 1997-1998 opgelegd in het SWAN model.

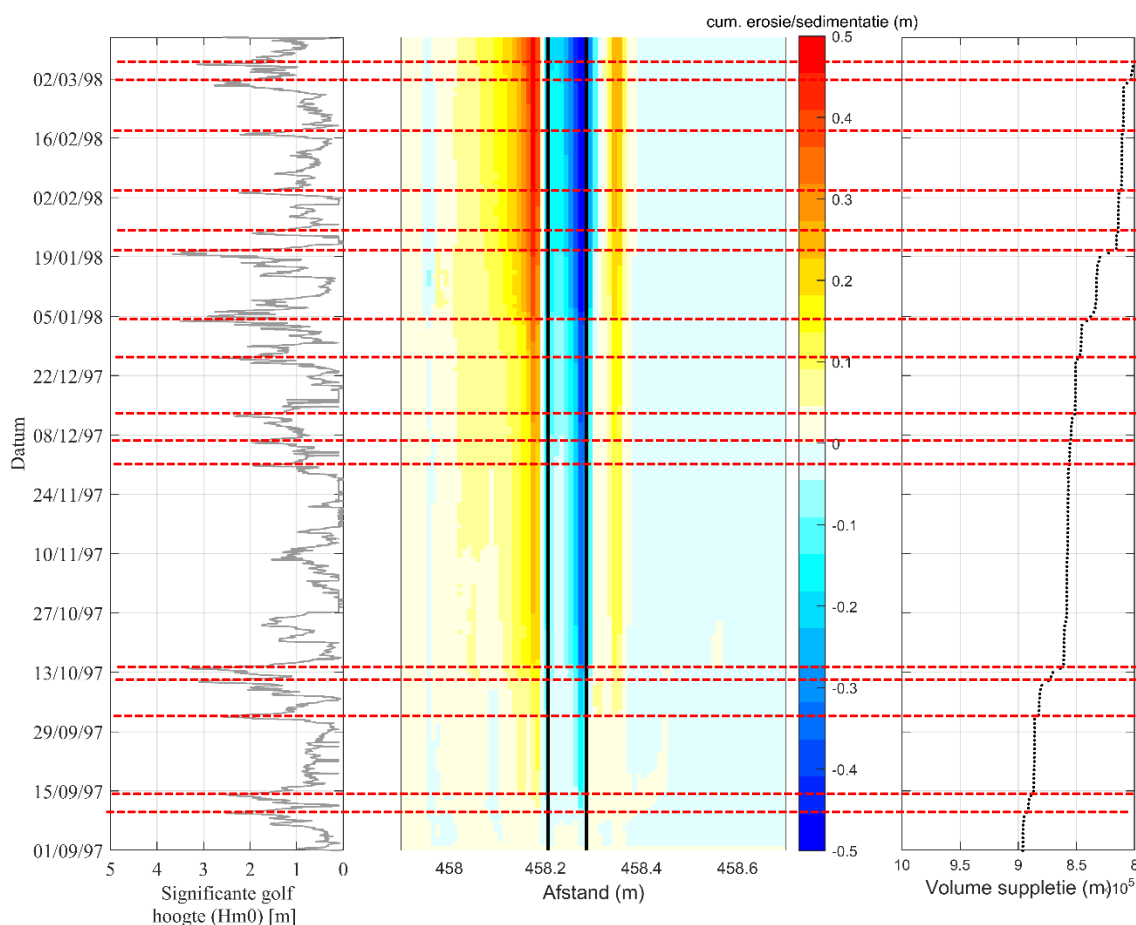
De werking van golven en getij is gering op diep water, maar als de golven in ondieper water komen en over de suppletie bewegen worden de stromingen sterk genoeg om zand te transporteren (de kritische bodemschuifspanning wordt overschreden). Onder de golf en getij-forcering past de suppletie zich aan. Door het verschil in gedrag van bodemmateriaal op dezelfde hydrodynamische forcering verandert ook de bodemsamenstelling op en rondom de suppletie (paragraaf 2.2).

Figuur 3.9 toont het golfklimaat uit de winter van 1997-1998, met meerdere stormen met een golfhoogte boven de 2,5 m. Tijdens de stormen neemt de piek golfperiode toe tot zo'n 8 à 10 seconden, terwijl tijdens kalmer weer de golfperiode beperkt blijft tussen 2 en 5 seconden. De golfrichting heeft tijdens kalm weer een westelijke richting (270°), en draait naar het noordwesten tijdens storm (~ 310 - 340°). De kustoriëntatie is 310° . Tijdens kalm weer resulteert dit in relatief zwak kustlangs golf-gedreven transport naar het noorden en tijdens storm sterk kustdwars gedomineerd transport, met eventueel een zuidwaarts golf-gedreven langstransport als de golven meer uit noordwestelijke richting komen.



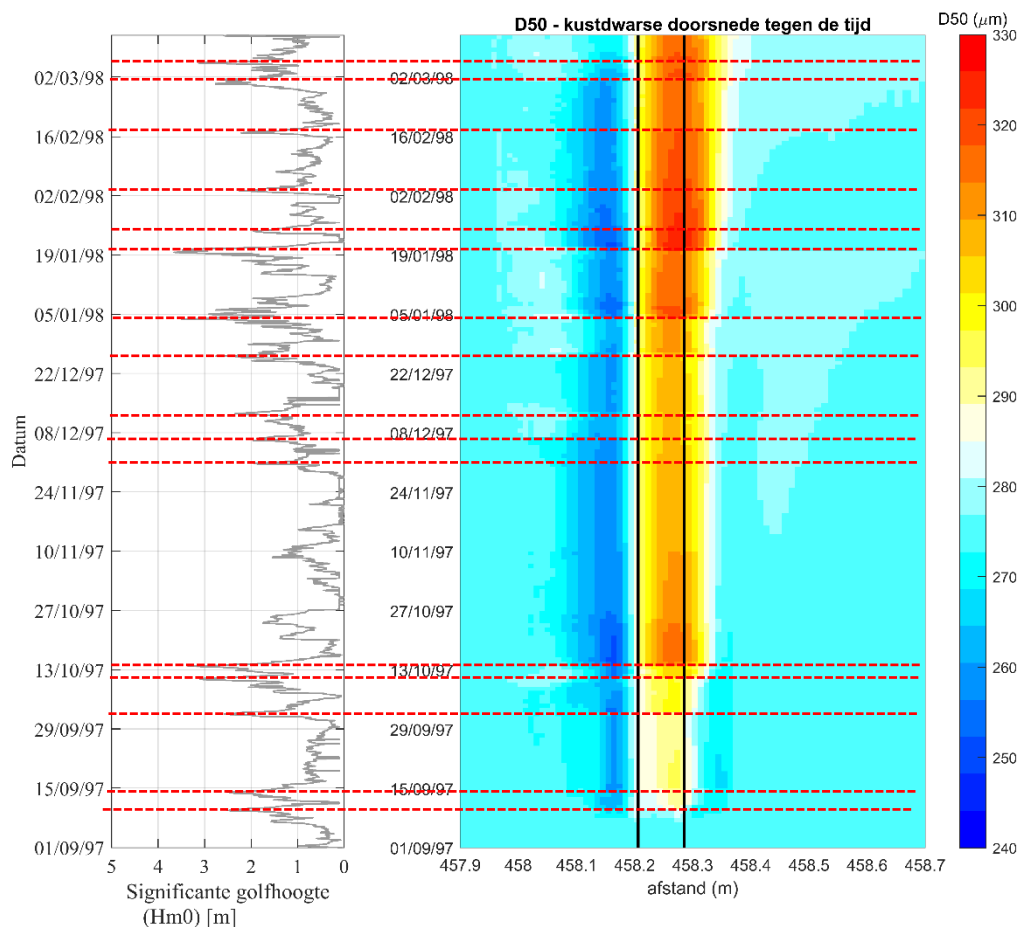
Figuur 3.9 : Golfklimaat in de winter van 1997-1998 bij de Ter Heijde suppletie. (boven) Significant golfhoogte H_{m0} , (midden) piek golfperiode T_p , en (onder) golfrichting. Perioden met relatief hoge golfhoogte (> 2 m) zijn in rood gemarkeerd om vergelijkingen tussen figuren te vergemakkelijken.

Figuur 3.10 toont de tijdserie van golven, cumulatieve erosie en sedimentatie en de volumeveranderingen van de geschematiseerde vooroeversuppletie bij Ter Heijde tijdens de winter van 1997-1998. Links de significante golfhoogte, in het midden de cumulatieve erosie en sedimentatie (voor één representatief dwarsprofiel), en rechts het volume van de suppletie. De rood gestippelde lijn geeft aan waar perioden met een relatief hoge golfhoogte ($H_{m0} > 2$ m) voorkomen, om makkelijker te kunnen vergelijken tussen de verscheidene (sub)figuren. Het effect van de stormen is zichtbaar in het stapsgewijs afnemen van het suppletievolume, gelinkt aan de erosie van met name de randen van de suppletie (tot een halve meter) en depositie van dit sediment voornamelijk landwaarts van de suppletie. Met name stormen met significante golfhoogte groter dan 3 m, zorgen voor aanzienlijke erosie van de suppletie. Het duidelijkst is dit bij de stormen rond half oktober, en die van begin januari en half januari. De modelresultaten tonen aan dat tijdens het winterseizoen van 1997-1998 het volume van de Ter Heijde '97 suppletie met zo'n 10% is afgenomen.



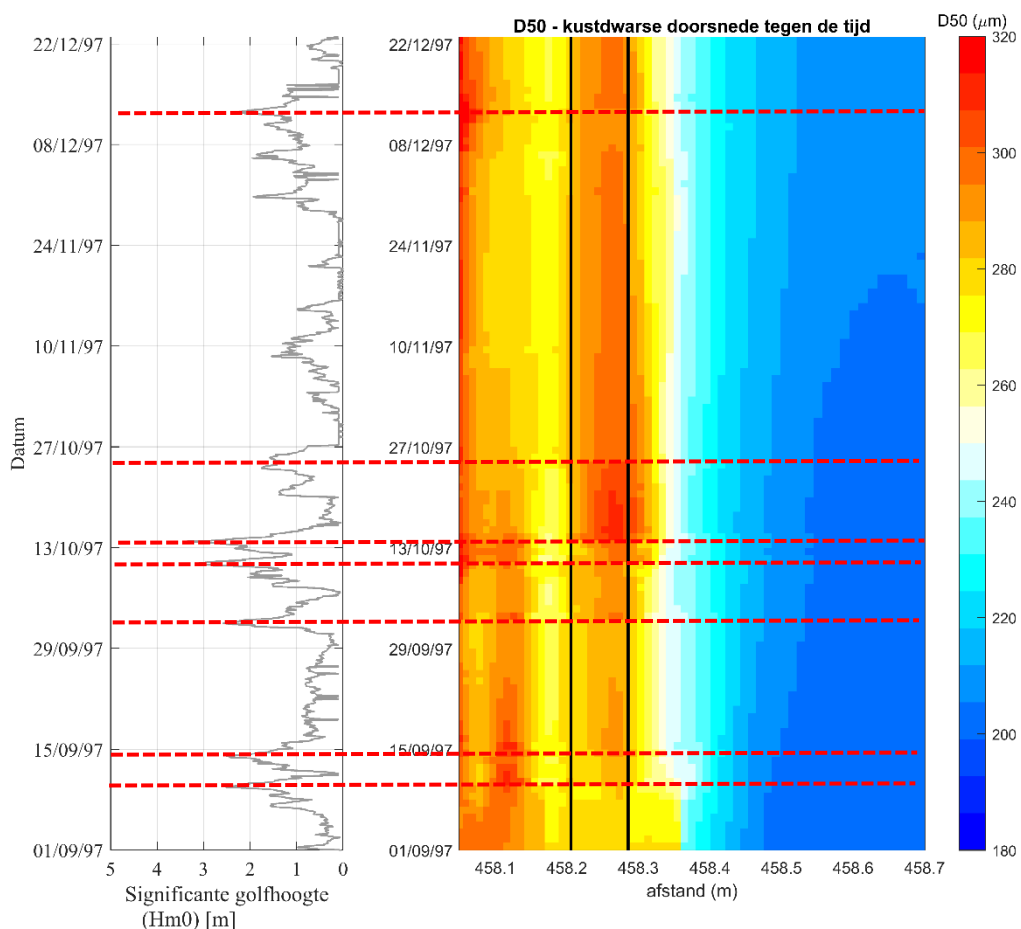
Figuur 3.10 : Gedrag van de geschematiseerde vooroeversuppletie bij Ter Heijde tijdens de winter van 1997-1998. (links) Significante golfhoogte, (midden) cumulatieve erosie/sedimentatie op en rondom de suppletie, weergegeven voor een representatief kustdwarsprofiel met de locatie van de suppletie gemarkeerd met twee zwarte lijnen, en (rechts) sedimentvolume van de vooroeversuppletie (simulatie V20). Perioden met relatief hoge golfhoogte (> 2 m) zijn in rood gemarkeerd om vergelijkingen tussen figuren te vergemakkelijken.

Ook hier worden de erosie/sedimentatie patronen weerspiegeld in de mediane korrelgrootte (Figuur 3.11). Tijdens bijna elke storm wordt de D_{50} steeds een fractie grover op de suppletie terwijl in de landwaartse trog verfijning optreedt. Met name golfhoogten boven de 3 m zorgen voor de versterking van dit patroon. Tijdens de kalmere perioden tussen de stormen in treedt juist het omgekeerde op, verfijning op de suppletie en vergroving van het sediment in de trog. Tijdens deze kalme perioden zijn het golven uit het westen die kustlangse stroming aandrijven en zorgen voor sedimentatie op en rondom de suppletie. Interessant is dat zelfs de relatief zwakke storm op 10 november zorgt voor verfijning van het sediment op de suppletie, waarschijnlijk veroorzaakt door de westelijke golfrichting en het daardoor aangedreven langtransport. In het geheel wordt het sediment op de suppletie grover met gemiddeld zo'n 30 μm , tot 50 μm tijdens en direct na een energetische storm door erosie van het fijnere sediment. Daarentegen is om de suppletie heen, met name landwaarts waar sedimentatie optreedt, verfijning van de lokale sedimentsamenstelling zichtbaar met gemiddeld zo'n 20 μm , tot 30 μm tijdens en direct na een energetische storm. Bij de koppen van de vooroeversuppletie, waar sterkere erosie optreedt, zijn aanzienlijke toenames in mediane korrelgrootte zichtbaar tot zo'n 50 μm , met daaromheen sterke verfijning tot zo'n 70 μm .



Figuur 3.11: Gedrag van de korreldeiameter van de geschematiseerde vooroeveroppletie bij Ter Heijde tijdens de winter van 1997-1998. (links) Significante golfhoogte, (midden) mediane korrelgrootte D_{50} op en rondom de suppletie, weergegeven voor een representatief kustdwarsprofiel met de locatie van de suppletie gemarkeerd met twee zwarte lijnen, en (rechts) sedimentvolume van de vooroeveroppletie (simulatie V20). Perioden met relatief hoge golfhoogte (> 2 m) zijn in rood gemarkeerd om vergelijkingen tussen figuren te vergemakkelijken.

Voorgaande simulaties zijn uitgevoerd met een ruimtelijk uniform verdeelde initiële sedimentsamenstelling. Op natuurlijke stranden is er sprake van verfijning van de korrelgrootte in zeewaartse richting, zoals beschreven in paragraaf 2.2. Om deze natuurlijke ruimtelijke variatie in D_{50} mee te nemen is een extra simulatie uitgevoerd met dezelfde golfcondities met een representatief dwarsprofiel van variabele sedimentsamenstelling gebaseerd op de situatie van de kust naast de Zandmotor, met daarop een suppletie met een mediane korrelgrootte van $278 \mu\text{m}$ (Figuur 3.12). Dezelfde patronen zijn zichtbaar, met verfijning in de trog (van zo'n $20 \mu\text{m}$) en een toename van de mediane korrelgrootte op de suppletie (tot zo'n $30 \mu\text{m}$ half oktober) tijdens stormen.



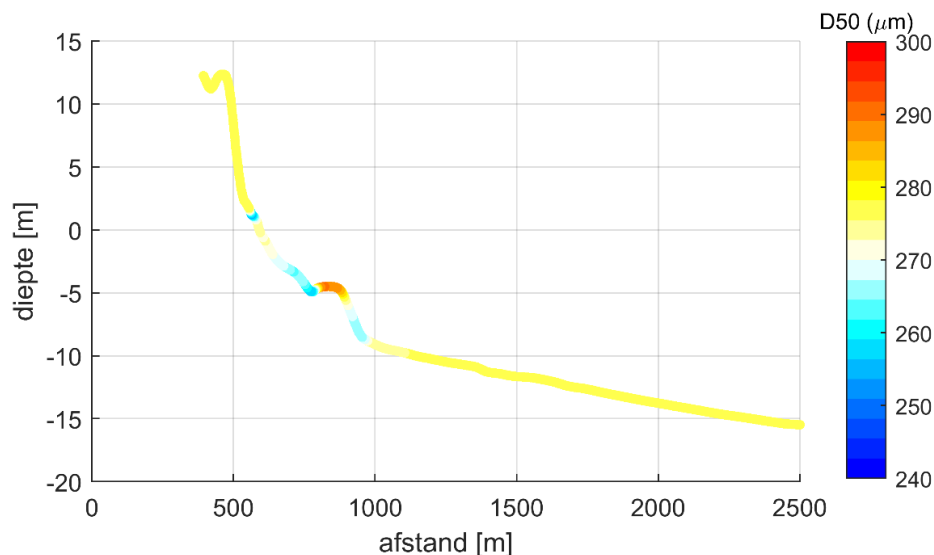
Figuur 3.12 : Gedrag van de korrel diameter van de geschematiseerde vooroeversuppletie bij Ter Heijde tijdens de winter van 1997-1998. Initieel is er een kustdwars variërende korrel diameter opgelegd. (links) Significante golfhoogte, (midden) mediane korrelgrootte D_{50} op en rondom de suppletie, weergegeven voor een representatief kustdwarsprofiel met de locatie van de suppletie gemarkeerd met twee zwarte lijnen, en (rechts) sedimentvolume van de vooroeversuppletie (simulatie V21). Perioden met relatief hoge golfhoogte (> 2 m) zijn in rood gemarkeerd om vergelijkingen tussen figuren te vergemakkelijken.

3.3.2 Gevoeligheidsanalyse

Om de effecten van de fysische processen en de karakteristieken van een vooroeversuppletie op de ruimtelijke verdeling van korrelgrootte in detail te onderzoeken is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

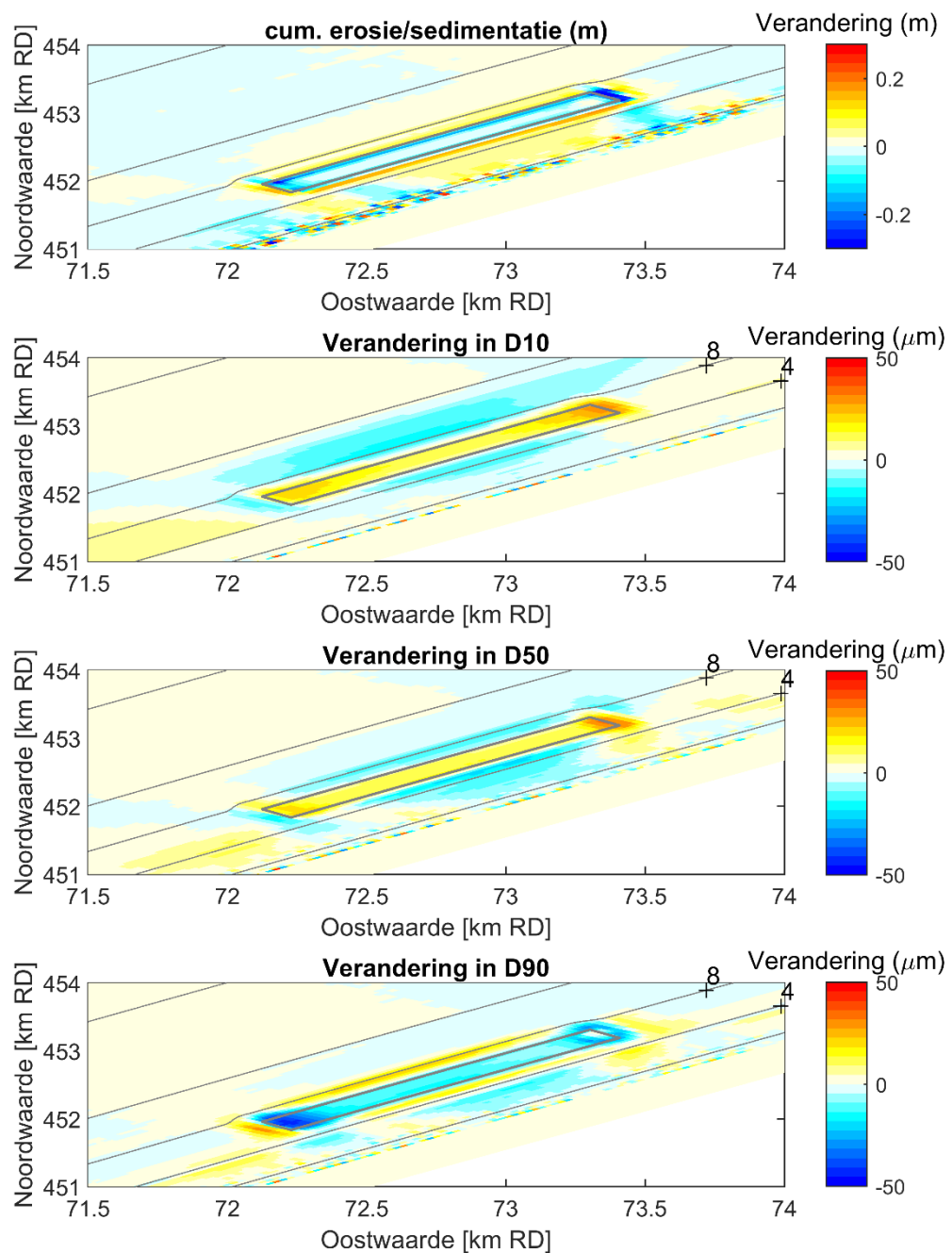
De referentie-simulatie (V0 – zie Appendix A) heeft een golfklimaat met een significante golfhoogte van $H_{m0} = 1$ m en een piek golfperiode $T_p = 5$ s, met een golfrichting dwars op de kust $dir = 310^\circ$. Huisman et al. (2018) tonen aan dat dit een goede benadering is voor het bestuderen van de jaargemiddelde korrelgroottevariaties. De simulatieperiode is zo'n 2 maanden. Onder deze kalme condities breken de golven niet wanneer ze zich over de suppletie bewegen, dus morfologische veranderingen gaan relatief langzaam, wat kenmerkend is voor een vooroeversuppletie (Hoekstra et al., 1996; Grunnet en Ruessink, 2005; Van Duin et al 2004 en Ojeda et al, 2008).

Aan het einde van deze 2 maanden is de mediane korrelgrootte (D_{50}) heterogeen verdeeld over het domein en benaderd een evenwicht met de forcering. Figuur 3.13 toont de resultaten voor een representatief dwarsprofiel over de suppletie. Op de top van de suppletie is de mediane korrelgrootte grover geworden tot zo'n 290 μm , en zeewaarts en landwaarts van de suppletie is de mediane korrelgrootte afgenomen zo'n 260 μm . Dit is geen grote verandering, maar zou in het veld wel meetbaar moeten zijn.



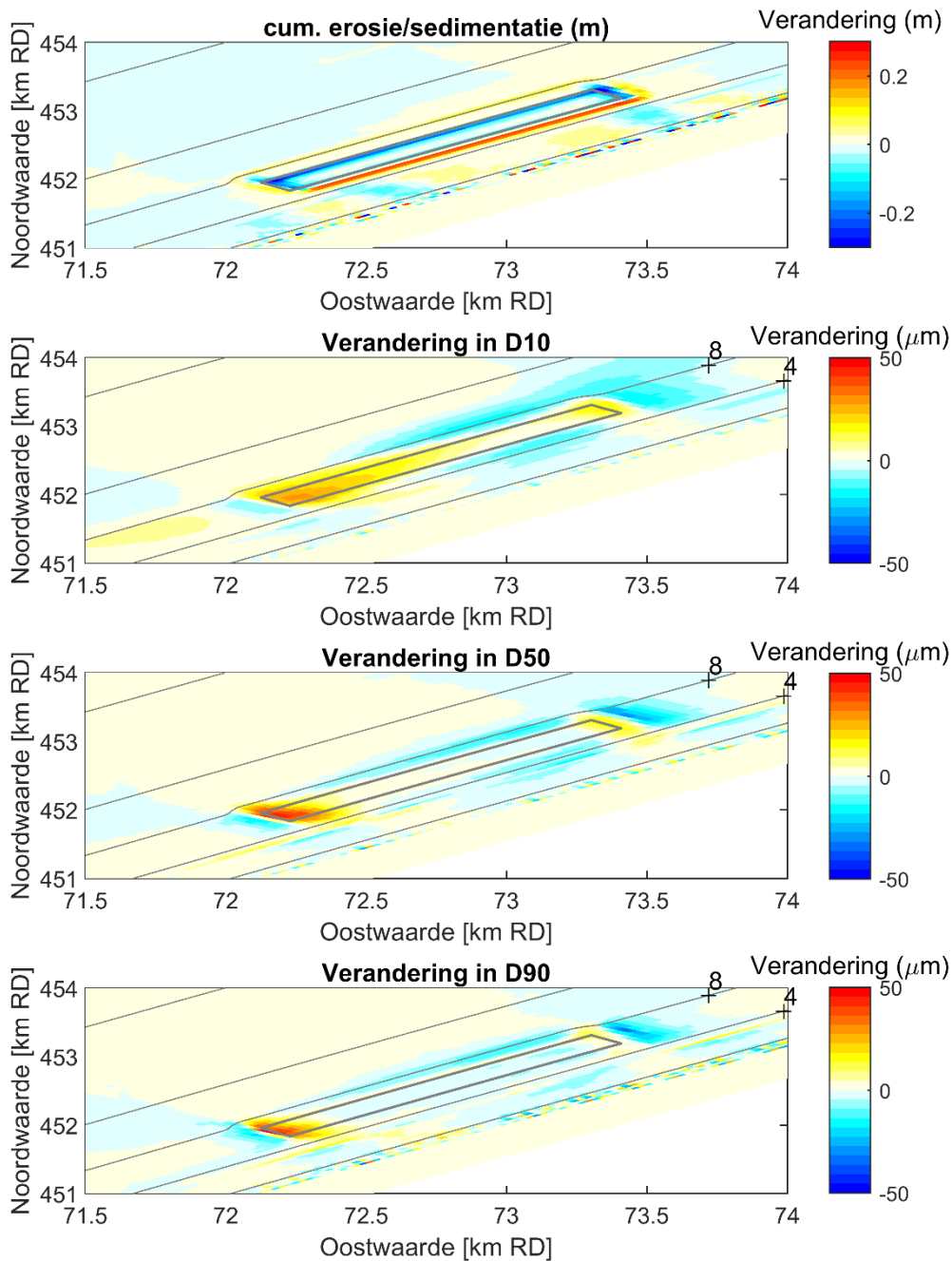
Figuur 3.13: Mediane korrelgrootteverdeling na ~2 maanden in een dwarsprofiel in het centrum van de suppletie.

De ruimtelijke veranderingen reflecteren het kustdwarse gedrag. Figuur 3.14 toont cumulatieve erosie en sedimentatie na 2 maanden voor de referentie-simulatie in 2DH met de veranderingen in D_{10} , D_{50} en D_{90} . Toenames in D_{10} en D_{50} op de suppletie tot zo'n 40 μm zijn zichtbaar, terwijl de D_{90} een afname van zo'n 50 μm laat zien, met name op het meest zuidelijke punt. In feite wordt de spreiding van de korrelgrootteverdeling smaller op de suppletie. De omgeving van de suppletie ondergaat voornamelijk een verfijning rondom de suppletie wat betreft D_{10} en D_{50} , en een toename van D_{90} waardoor de spreiding in korrelgrootteverdeling toeneemt rondom de suppletie. Op de koppen van de suppletie treedt sterkere erosie op van zo'n 30 cm, waardoor de korrelgrootteverdeling daar sterk beïnvloed wordt. De onderliggende fysische processen zullen in de komende paragrafen worden behandeld.



Figuur 3.14: (boven) Cumulatieve erosie en sedimentatie na 2 maanden voor de referentie simulatie V0 in 2D, met (overige sub-figuren) de veranderingen in bodemsamenstelling gespecificeerd voor D_{10} , D_{50} en D_{90} .

Omdat in de 2DH modelsimulatie de onderstroom niet wordt gerepresenteerd zijn ook de golfgedreven transporten naar beneden toe gecorrigeerd. Om deze aanname te verifiëren is er een modelsimulatie uitgevoerd in 3D met 12 lagen (Figuur 3.15). Deze resultaten laten hetzelfde gedrag zien, met erosie op zowel de randen en koppen van de suppletie, en sedimentatie eromheen, wat zich vertaalt in een vergelijkbare vergroving in D_{10} en D_{50} op de suppletie zelf, een verfijning van D_{90} en het omgekeerde gedrag met een algehele verfijning van het sediment om de suppletie heen. Op basis hiervan worden de volgende simulaties in 2DH uitgevoerd, om de rekentijd te verkorten.



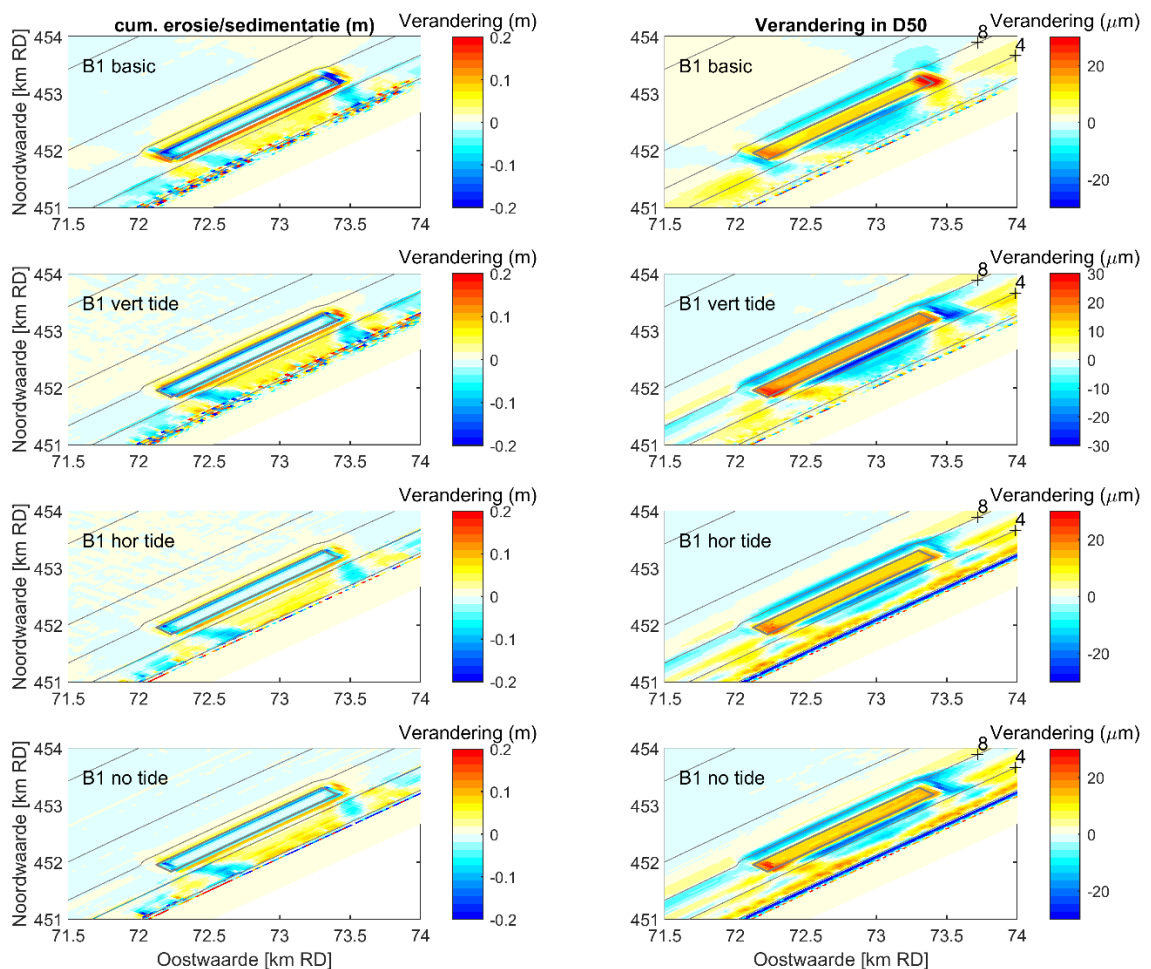
Figuur 3.15: (boven) Cumulatieve erosie en sedimentatie na 2 maanden voor de referentie simulatie V1 in 3D, met (overige sub-figuren) de veranderingen in bodemsamenstelling gespecificeerd voor D_{10} , D_{50} en D_{90} .

Ruimtelijke variatie van D_{50} kan worden veroorzaakt door hydrodynamische forcering wanneer kustingrepen groot genoeg zijn om de kustlangse stroming door golven of getij te beïnvloeden. De effecten van het getij (verticale component en horizontale component) zal hier worden bestudeerd samen met de golfkarakteristieken als golfhoogte en golfrichting.

Getij

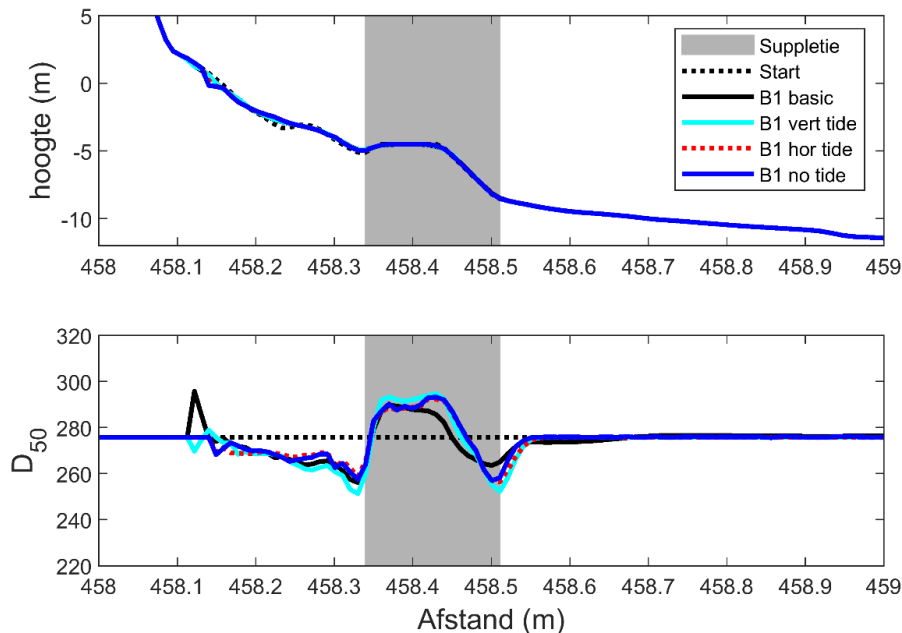
Het effect van het getij op de korrelgrootteverdeling op en rondom de vooroeversuppletie is onderzocht middels een gevoeligheidsanalyse. Het getij is gevarieerd ten opzichte van de referentie simulatie met een typisch getij voor de Zuid-Hollandse kust, met (1) alleen een verticaal getij, (2) alleen een horizontaal getij, en (3) afwezigheid van getij.

De simulatie zonder getij laat een zelfde gedrag zien als de referentie-simulatie, met grover materiaal op de suppletie en fijner materiaal eromheen (Figuur 3.16), al is zonder getij het sediment relatief fijner rondom de suppletie. Wellicht wordt dit sediment minder ver gevoerd door afwezigheid van getijstroming. Het verticale getij zorgt voor erosie rondom de suppletie door modulatie van de golven, door de variatie in waterniveau is er variatie in golf-orbitaalbeweging bij de bodem en in golfbreking, en in het algemeen wat meer erosie bij laag water onder de huidige condities.



Figuur 3.16: (links) Cumulatieve erosie en sedimentatie na 2 maanden en (rechts) veranderingen in mediane korrelgrootte (D_{50}). Van boven naar onder: referentie simulatie V0; alleen een verticaal getij V9, (2) alleen een horizontaal getij V10, en (3) afwezigheid van getij V13.

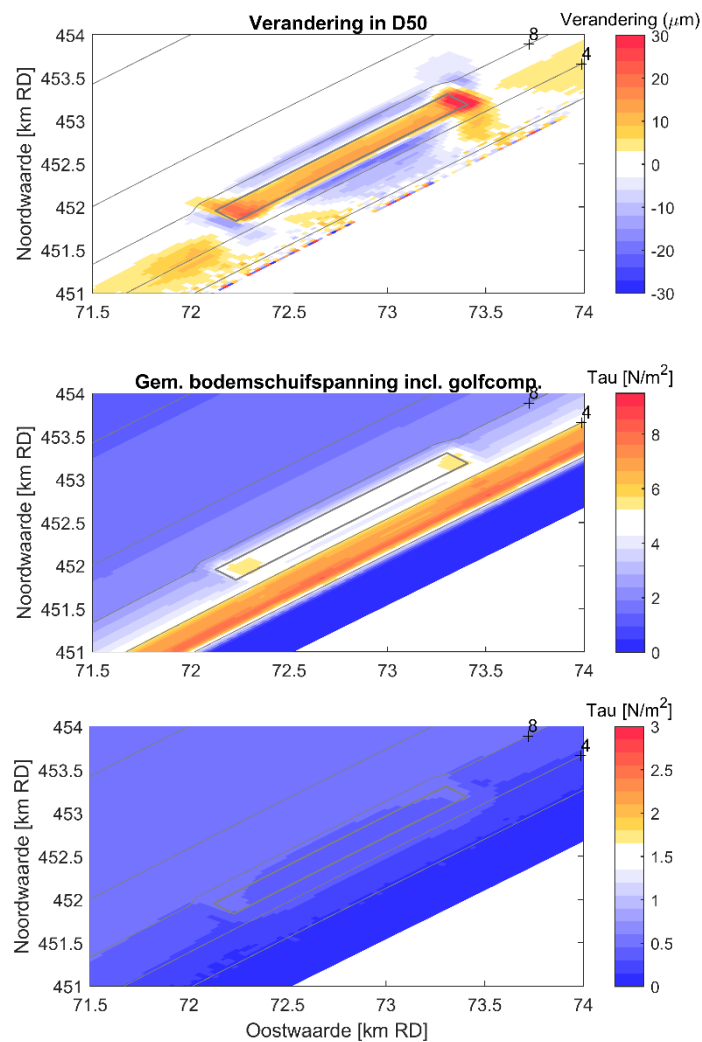
Figuur 3.17 toont de dwarsprofielen van D_{50} na een simulatietijd van 2 maanden voor de verscheidene simulaties. Op basis van Figuur 3.16 en Figuur 3.17 kan worden geconcludeerd dat, de gemiddelde golfcondities, het effect van het getij op de sedimentverdeling op en rondom de vooroeversuppletie relatief beperkt.



Figuur 3.17: (boven) Dwarsprofiel over de suppletie, (beneden) dwarsprofiel van mediane korrelgrootte na 2 maanden. Voor referentie simulatie V0 (zwart); alleen een verticaal getij V9 (cyaan), (2) alleen een horizontaal getij V10 (rood gestippeld), en (3) afwezigheid van getij V11 (blauw). De locatie van de suppletie is gemarkeerd in het grijs.

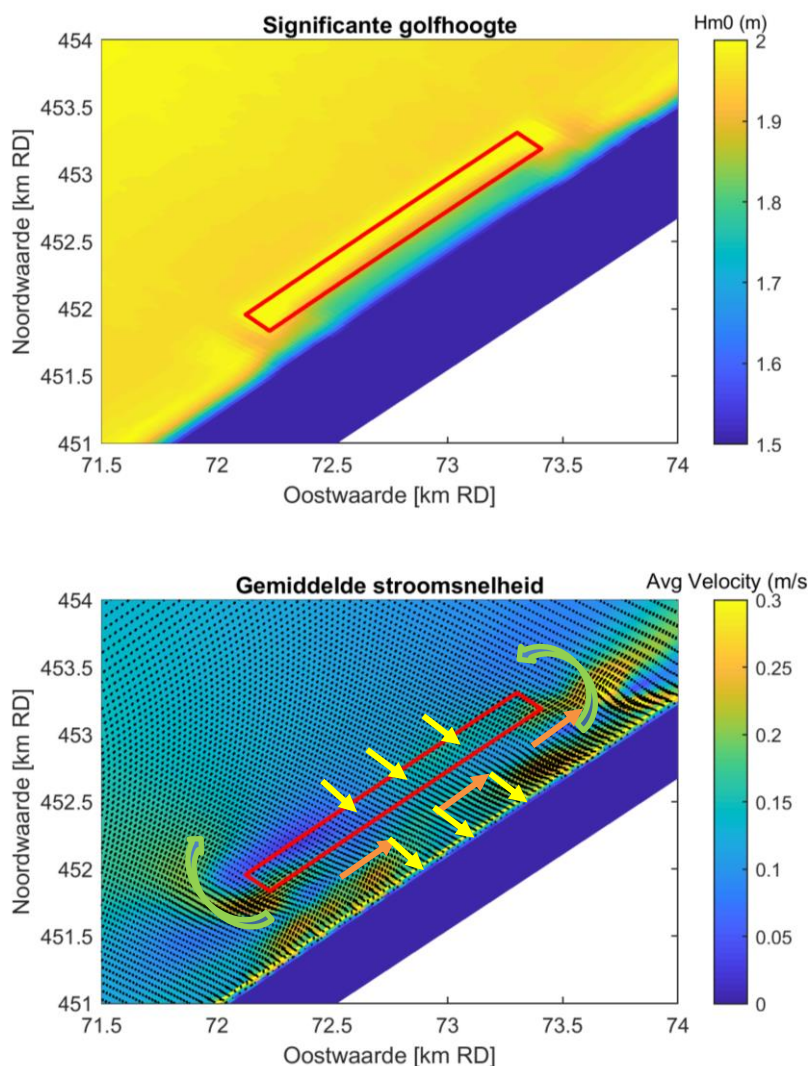
Golven

Figuur 3.18 toont een sterke correlatie tussen de bodemschuifspanning en de verandering in sedimentsamenstelling wanneer de golfcomponent wordt meegenomen. De grootste bodemschuifspanning is aanwezig in de swash zone, door de invloed van golfbreking. De bodemschuifspanning is verder relatief sterk op de koppen van de suppletie, resulterend in erosie van het fijne materiaal, waardoor het achterblijvende sediment grover wordt. Daarentegen is om de suppletie heen, met in het bijzonder de trog landwaarts, een minder sterke forcering, wat resulteert in sedimentatie van fijn sediment en het verfijnen van de lokale bodemsamenstelling. De bijdrage van het getij aan de bodemschuifspanning is minimaal (vergelijk onder paneel in Figuur 3.18 met middelste paneel).



Figuur 3.18: (boven) Verandering in mediane korrelgrootte D_{50} na 2 maanden voor de referentiesimulatie V0, (midden) de gemiddelde bodemschuifspanning veroorzaakt door golven, (onder) de gemiddelde bodemschuifspanning veroorzaakt door de stroming. Let op dat de kleurschalen verschillen tussen de figuren.

Om de ruimtelijke verdeling van erosie en sedimentatie beter te begrijpen, tonen we in Figuur 3.19 de residuele stromingspatronen. In deze figuur is te zien dat de stromingen rondom de suppletie sterk zijn rond de koppen, wat tot sterke transportgradiënten leidt en erosie tot gevolg heeft. Een schematische weergave van zandtransportmechanismen is toegevoegd in de figuur. Kustlangse stroming wordt geforceerd onder schuin-invallende golfcondities, maar deze is relatief beperkt zeewaarts van de suppletie door afwezigheid van golfbreking. Landwaarts van de suppletie is er wel een zwakke langs-stroom aanwezig in de brekerszone, maar het zandtransport wordt gedomineerd door relatief sterk landwaarts gericht zandtransport. Dit wordt ook veroorzaakt door de loodrecht-invallende golven, de kustlangse stroming neemt toe voor schuin-invallende golven. Dit kustdwarse zandtransport is aanwezig over het midden van de suppletie en wordt geforceerd door de golven (o.a. door de asymmetrische vorm van de golven) (gele pijlen), terwijl aan de randen van de suppletie sterke zeewaarts-gerichte stromingen aanwezig zijn (onderstroom en/of mui-stroom – groene pijlen). Een vooroeversuppletie vergroot de transportprocessen richting de kust (o.a. gevolg van verhoogde asymmetrie van de orbitaalsnelheden van de golven).

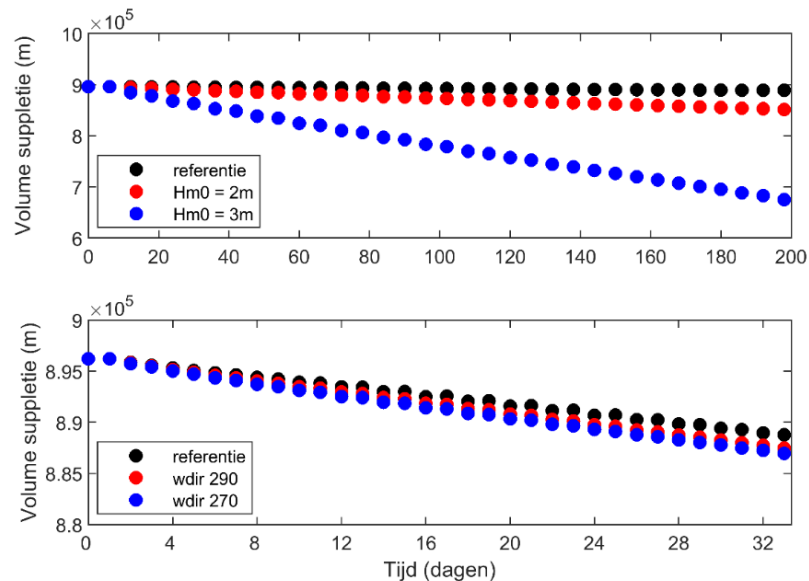


Figuur 3.19: (boven) Significante golfhoogte en (onder) residuele stroming voor de simulatie zonder getij met $H_{m0} = 2m$ - V12 met een schematische weergave van zandtransport mechanismen voor zandherverdeling bij vooroeversuppleties. Kustdwars transport aangegeven met gele pijlen, en kustlangs transport aangegeven met oranje pijlen. De residuele stroming is aangegeven met groene pijlen.

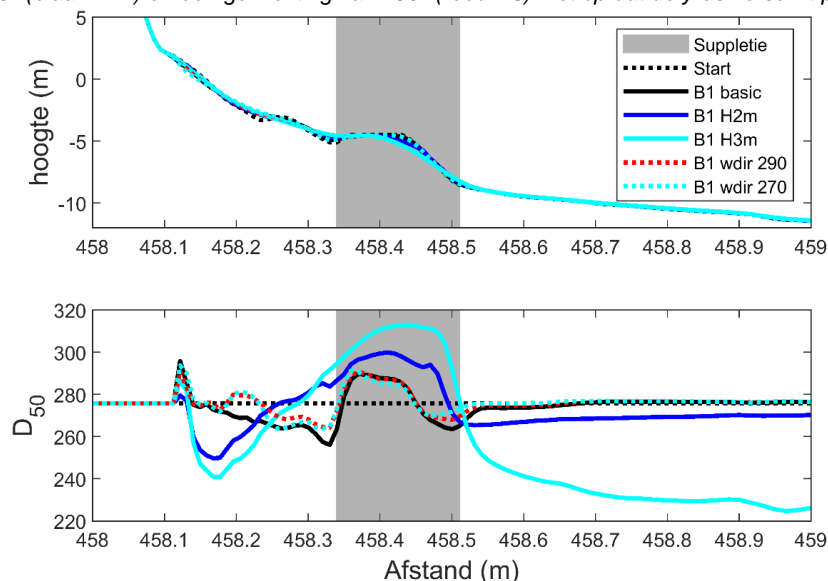
De meeste erosie vindt plaats tijdens energetische condities omdat de grotere golven breken als ze zich over de suppletie bewegen, dit in tegenstelling tot de kleinere golven die tijdens kalm weer pas vlakbij de waterlijn hun energie verliezen (Figuur 3.20 en Figuur 3.22). Het zandvolume van de vooroeversuppletie neemt sterk af (25%) in 1 maand onder golven met een significante golfhoogte van 3 m. Dit heeft grote invloed op de bodemsamenstelling (Figuur 3.21 en Figuur 3.22). De mediane korrelgrootte neemt toe met tot zo'n 30-50 μm toe tot 300 μm ten opzichte van de basis-simulatie in het midden van de suppletie, zelfs op grotere diepte bij de voet van de suppletie en in de trog landwaarts van de suppletie. Op en rond de koppen is een toename tot 75 μm zichtbaar op en rondom de koppen.

In dieper water neemt daarentegen de mediane korrelgrootte af, door het afzetten van het geërodeerde fijne sediment onder de afnemende stroomsnelheden. Opgemerkt moet wel worden dat deze ontwikkeling deels veroorzaakt wordt door de aanname van uniformiteit van de initiële bodemsamenstelling (D_{50} van 278 μm) en daarmee samenhangende neiging van de vooroever om toe te werken naar een daar passende korreldiameter, wat in de simulaties met hoge golven aanzienlijk wordt versneld.

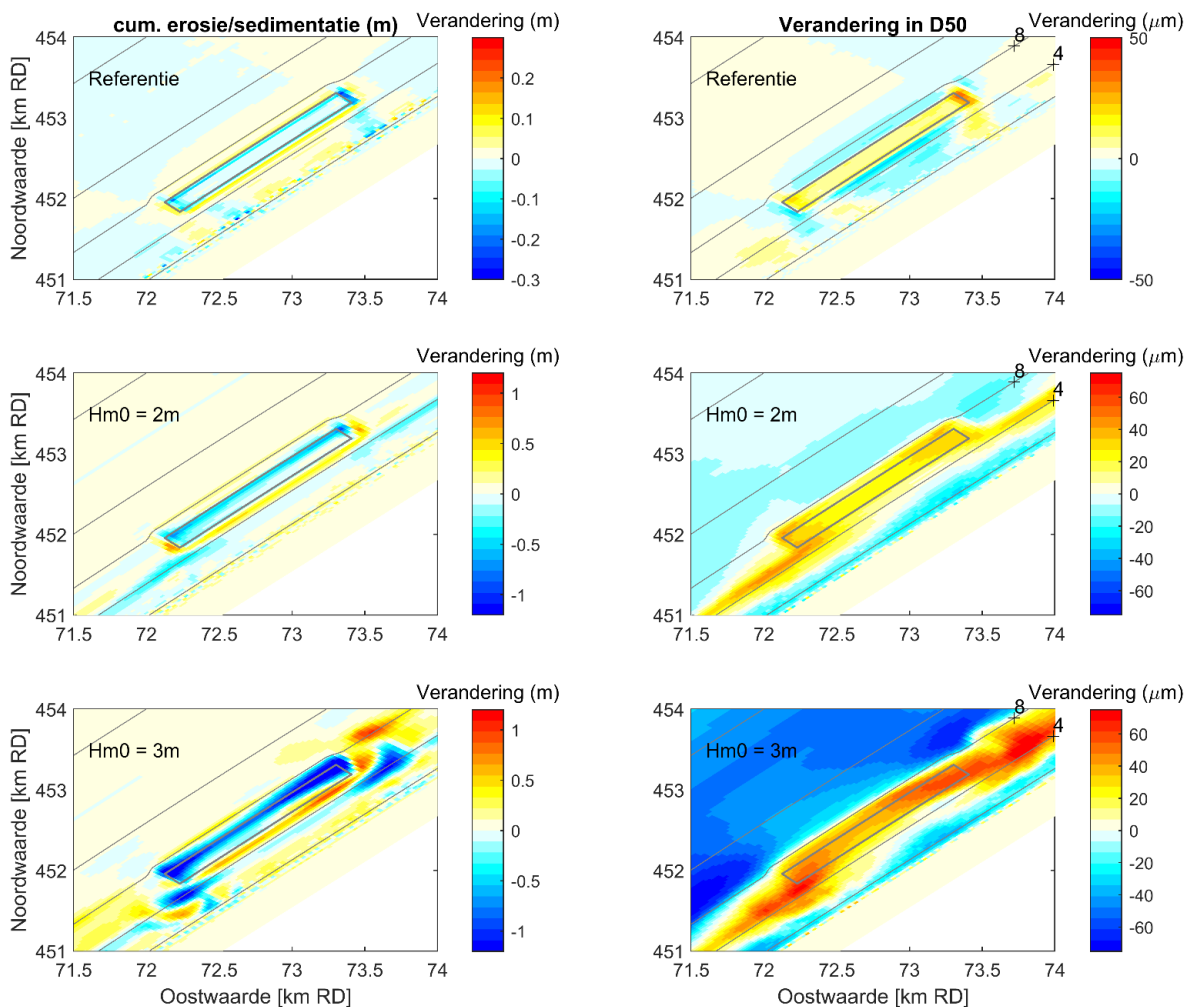
In Figuur 3.20 en Figuur 3.21 zijn ook het effect van de golfrichting zichtbaar. De golfrichting wordt gevarieerd van dwars op de kust (90°) naar een hoek van 70° en 50° met de kust, om het effect van golf-gedreven langtransport te bestuderen. De effecten op het suppletievolume zijn gering, met een erosie toename van zo'n 1% bij een invalshoek van 50° ten opzichte van de kustdwarse situatie. Er is met name wat meer erosie in de trog (in de orde van 10 cm) landwaarts van de suppletie, wat leidt tot een relatief grovere D_{50} onder een kleinere golfhoek (Figuur 3.21).



Figuur 3.20 : Sedimentvolume van de suppletie door de tijd heen, voor (boven) verschillende golfhoogten; referentie simulatie met $H_{m0} = 1\text{m}$ (zwart-V0); met een H_{m0} van 2 m (rood- V5) en een H_{m0} van 3 m (blauw-V6), en (onder) verscheidene golfrichtingen; referentie simulatie V0 met $H_{m0} = 1\text{m}$ (zwart-V0); met een golfrichting van 270° (blauw- V7) en een golfrichting van 290° (rood-V8). Let op dat de y-as verschilt per sub figuur.



Figuur 3.21 : (boven) Dwarsprofiel over het centrum van de suppletie, (beneden) dwarsprofiel van mediane korrelgrootte na 2 maanden. Voor referentie simulatie V0 (zwart); met een significante golfhoogte (H_{m0}) van 2 m - simulatie V5 (blauw); met een significante golfhoogte (H_{m0}) van 3 m - simulatie V6 (cyaan); golfrichting (dir) van 270° - simulatie V7 (cyaan gestippeld); golfrichting (dir) van 290° - simulatie V8 (rood gestippeld). De locatie van de suppletie is gemarkeerd in het grijs.

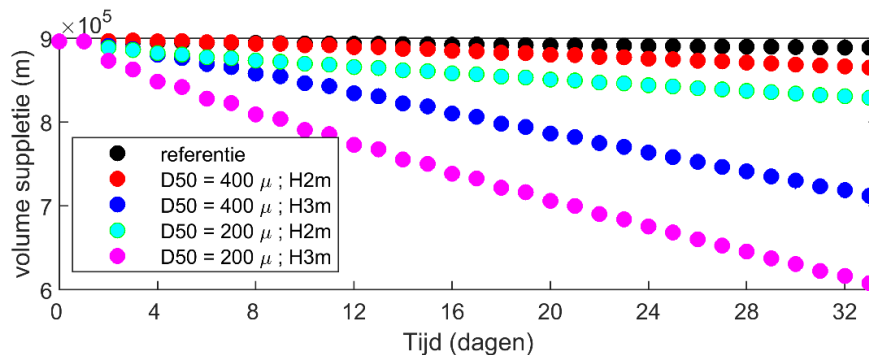


Figuur 3.22: (links) Cumulatieve erosie en sedimentatie na 2 maanden en (rechts) veranderingen in mediane korrelgrootte (D_{50}). (boven) Referentie simulatie V0 (midden) met een significante golfhoogte (H_{m0}) van 2 m - simulatie V5 en (onder) met een significante golfhoogte (H_{m0}) van 3 m - simulatie V6.

Niet alleen de fysische processen hebben invloed op de dynamiek van de suppletie en daarmee op de korrelgrootteverdeling, maar ook de karakteristieken van de suppletie zelf zijn van belang. De initiële korrelgrootteverdeling van het opgebrachte zand, de diepteligging en het volume kunnen de dynamiek versterken of afremmen.

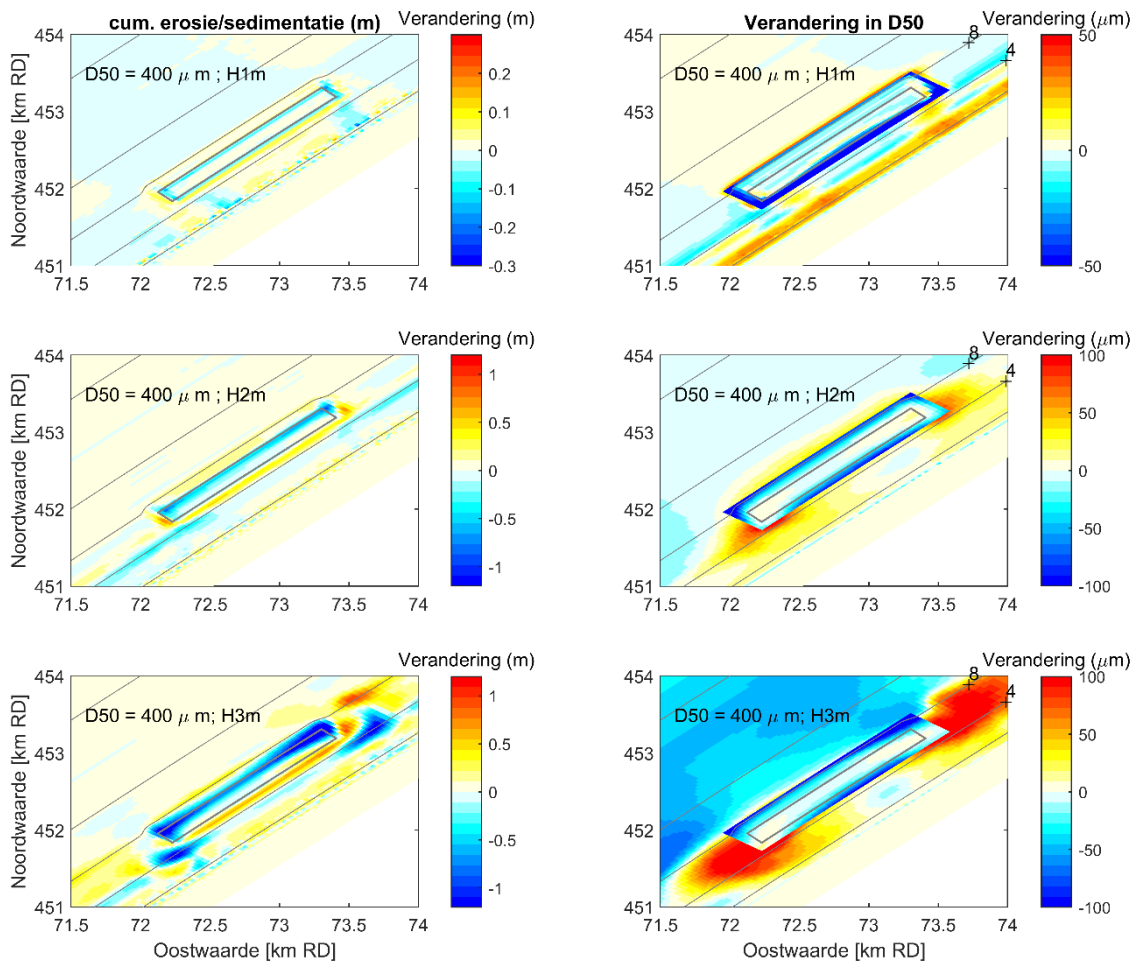
Effect initiële bodemsamenstelling

De korrelgrootteverdeling van het suppletie materiaal kan variëren op basis van het brongebied. Om te bestuderen hoe dit de dynamiek van de suppletie beïnvloedt zijn er verscheidene aanvullende simulaties uitgevoerd met suppletie materiaal dat aanzienlijk fijner ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$) en grover ($D_{50} = 400 \mu\text{m}$) is, onder verschillende golfcondities. De volumeveranderingen verschillen sterk bij een verschillende korrelgrootteverdeling van het suppletie materiaal (Figuur 3.23), met name onder energetische condities zijn de verschillen duidelijk zichtbaar. Fijner materiaal is mobieler, wat leidt tot een hoge dynamiek van het suppletie materiaal en sterke afname van het suppletievolume, in vergelijking tot suppletie materiaal van grover sediment.

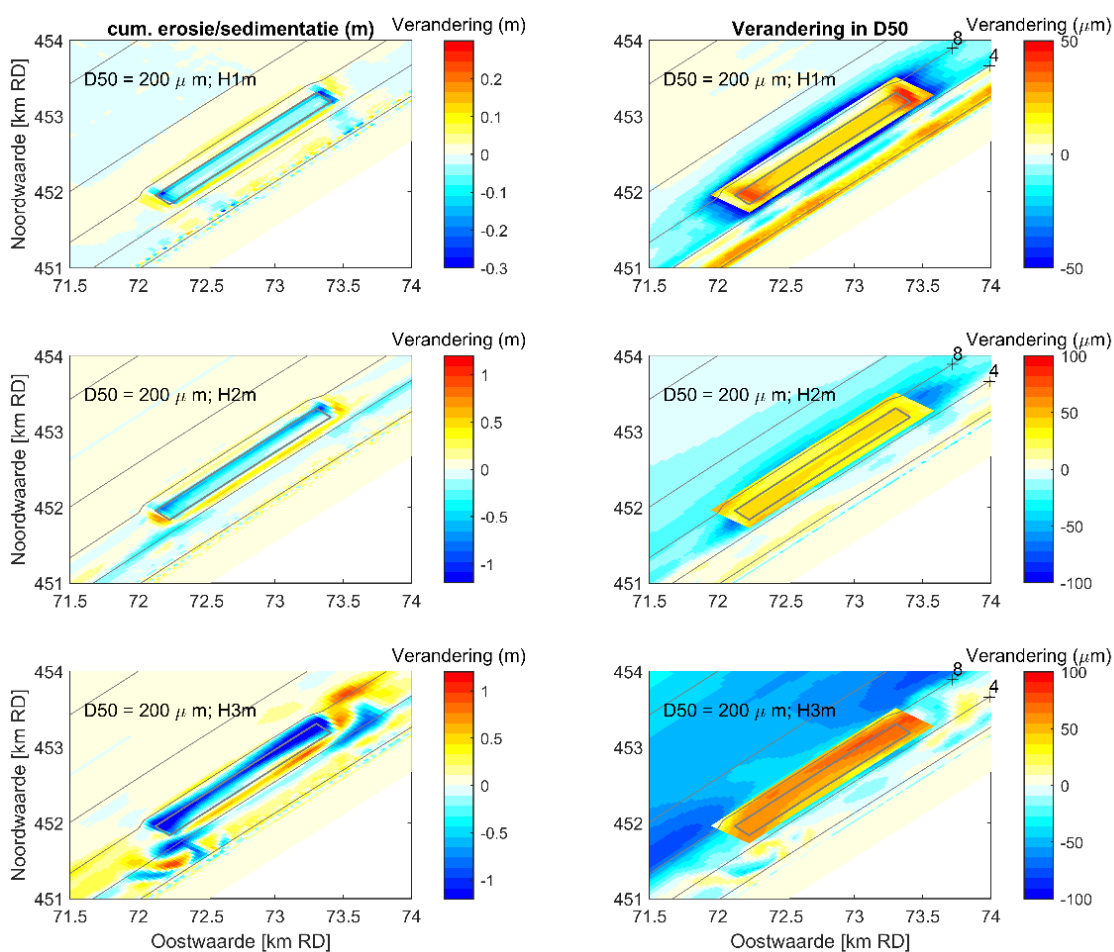


Figuur 3.23: Sedimentvolume van de suppletie door de tijd heen, voor verschillende mediane korrelgrootte van het opgebrachte zand, voor verschillende golfhoogte. Referentie simulatie met $D_{50} = 278 \mu\text{m}$, $H_{m0} = 1\text{m}$ (zwart-V0); $D_{50} = 400 \mu\text{m}$ met H_{m0} van 2 m (rood-V15); $D_{50} = 400 \mu\text{m}$ met H_{m0} van 3 m (blauw-V16); $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ met H_{m0} van 2 m (cyaan V18); $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ met H_{m0} van 3 m (blauw-V19).

Figuur 3.24 en Figuur 3.25 tonen de verschillen aan van de ruimtelijke verspreiding van het materiaal (eindsituatie minus beginsituatie). Zo is te zien dat grof suppletiemateriaal voor een vergroving van het bodemmateriaal in de omgeving zorgt maar dan met name tijdens energetische condities $H_{m0} > 2\text{m}$ (Figuur 3.24). Met zo'n 50 μm tot 500 m afstand voor $H_{m0} = 2\text{m}$, en $> 100 \mu\text{m}$ tot $>500 \text{m}$ afstand voor $H_{m0} = 3\text{m}$. Daarentegen zorgt fijn suppletiemateriaal voor verfijning van het bodemmateriaal in de omgeving, op grotere afstand en ook onder kalme golfcondities (Figuur 3.25). Onder kalme condities blijft het fijne materiaal van de suppletie relatief dichtbij ($< 100\text{m}$) en zorgt daar voor een lokale afname van D_{50} met zo'n 50 μm , terwijl tijdens energetische condities het fijne sediment verder weg wordt gevoerd en de maximale afnamen in D_{50} beperkter zijn.



Figuur 3.24: (links) Cumulatieve erosie en sedimentatie na 2 maanden en (rechts) veranderingen in mediane korrelgrootte (D_{50}). Van boven naar onder: simulatie met $D_{50} = 400 \mu\text{m}$, $H_{m0} = 1\text{m}$ (V14); $D_{50} = 400 \mu\text{m}$ met H_{m0} van 2 m (V15); $D_{50} = 400 \mu\text{m}$ met H_{m0} van 3 m (V16).

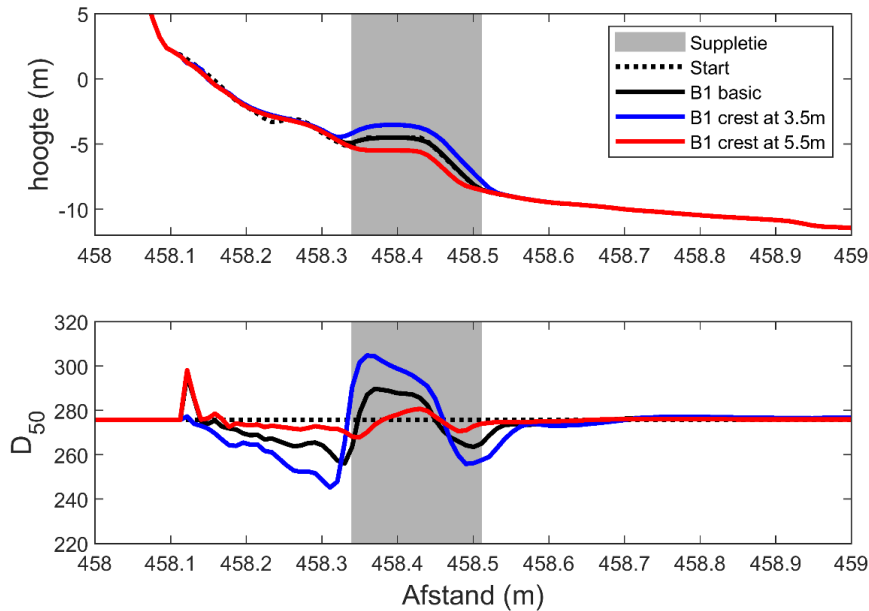


Figuur 3.25: (links) Cumulatieve erosie en sedimentatie na 2 maanden en (rechts) veranderingen in mediane korrelgrootte (D_{50}). Van boven naar onder: simulatie met $D_{50} = 200 \mu\text{m}$, $H_{m0} = 1\text{m}$ (V17); $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ met H_{m0} van 2 m (V18); $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ met H_{m0} van 3 m (V19).

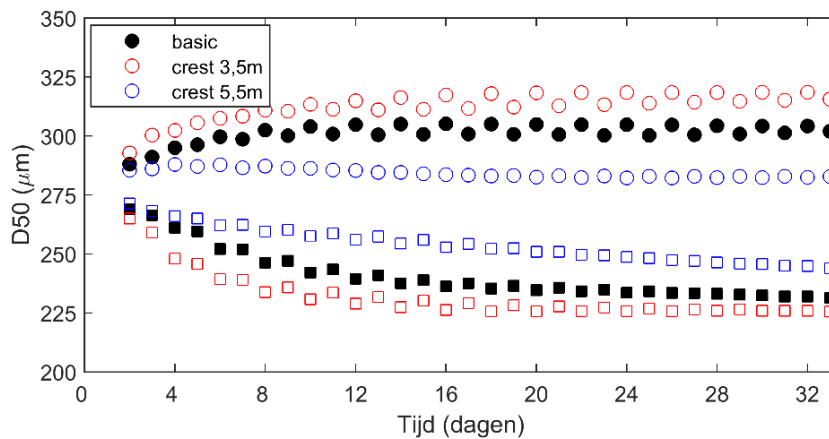
Effect diepteligging en lengte suppletie

Twee laatste aspecten die zijn getest zijn de kustlangse lengte van de suppletie en de diepteligging. Het eerste aspect is getest door de lengte van de suppletie te verdubbelen naar 3600 m (simulatie V2) maar deze effecten op de bodemsamenstelling zijn in het algemeen hetzelfde als die voor de referentiesuppletie, en daarom niet getoond.

De diepteligging daarentegen heeft een groot effect op de dynamiek van de suppletie. De originele waterdiepte van de top van de suppletie in de referentie simulatie is 4,5 m waterdiepte. Twee aanvullende configuraties zijn getest voor respectievelijk 3,5 m en 5,5 m waterdiepte. De relatief ondiep liggende suppletie wordt aanzienlijk sterker beïnvloed door de golfwerking dan de diep liggende suppletie, waardoor de eerste een stuk dynamischer is dan de laatste en daardoor een sterk ruimtelijk variabele korrelgrootteverdeling ontwikkeld (Figuur 3.26 en Figuur 3.27), met een ruimtelijke variatie van D_{50} tot zo'n $40 \mu\text{m}$ voor de dieper liggende suppletie tot $90 \mu\text{m}$ voor de ondiep-liggende suppletie.



Figuur 3.26 : (boven) Dwarsprofiel over het centrum van de suppletie, (beneden) dwarsprofiel van mediane korrelgrootte na 2 maanden. Voor referentie simulatie V0 (zwart); top van de suppletie op 3.5 m waterdiepte (blauw - V3) en top van de suppletie op 5.5 m waterdiepte (rood - V4). De locatie van de suppletie is gemarkeerd in het grijs.



Figuur 3.27 : De maximale (cirkels) en minimale (vierkanten) D_{50} in het domein voor drie verschillende waterdiepten van de top van de suppletie. Referentie simulatie met de top op 4.5 m waterdiepte (zwart-V0); met de top op 3.5 m waterdiepte (rood-V3) en met de top op 5.5 m waterdiepte (blauw-V4).

3.4 Discussie

- Om simulatietijden te verkorten voor met name de maandenlange simulaties in het winterseizoen bij de Ter Heijde '97 suppletie, is er aan het begin van deze studie geverifieerd of de simulaties met Delft3D in 2DH vergelijkbare resultaten geven als in 3D voor de ontwikkeling van de bodemsamenstelling op de vooroever. Resultaten lieten dezelfde tendensen zien (zowel voor de Zandmotor als voor een typische vooroeversuppletie), waarna de verdere studie is uitgevoerd in 2DH. Dit blijft natuurlijk een versimpeling van met name de kustdwarse processen, waar bij de interpretatie van de resultaten - en in vervolgstudies - rekening mee gehouden moet worden.
- De hier uitgevoerde gevoeligheidsanalyse geeft een indicatie over de kwalitatieve effecten en eerste kwantitatieve effecten van de verschillende factoren en processen die een rol spelen bij de verandering in korrelgrootteverdeling op en rondom een suppletie. Om de stap te maken naar inzichtelijke kwantitatieve effecten is verder onderzoek nodig.
- In deze rapportage is gefocust op het identificeren van relevante processen en factoren wat betreft bodemsamenstelling op en rondom suppleties. Daarbij is vooral de eerste periode van 'levensduur' van de suppletie onderzocht. Langetermijn effecten na het volledig verspreiden van het suppletiemateriaal zijn niet bestudeerd. Er wordt van uitgegaan dat de verspreiding van suppletiemateriaal zich zal voegen naar de natuurlijke korrelgrootteverdeling met grovere korrels dichter bij de waterlijn en verfijning in zeewaartse richting, maar dit benodigd verder onderzoek.
- De huidige studie gebruikt dezelfde numerieke modelopzet die voor de Zandmotor een goed inzicht gaf in de ontwikkeling van de bodemsamenstelling om voorspellingen te doen voor andere situaties (bijv. smallere megasuppleties of vooroeversuppleties). Een verificatie met velddata kan echter niet worden gemaakt voor de kleinere (vooroever-) suppleties. Om met meer zekerheid een uitspraak te kunnen doen over de precieze ontwikkeling van sedimentsoortering bij vooroeversuppleties zou het daarom wenselijk zijn als precieze metingen van de bodemsamenstelling (bijv. met een Van Veen bodemhapper) worden gedaan voor een werkelijk toegepaste vooroeversuppletie, waarbij ook aanverwante parameters zoals de bodemhoogte en mogelijk ook stromingen en golven worden bemeaten. Hiervoor zal echter rekening gehouden moeten worden met de snelle ontwikkeling van de sortering rond zo'n maatregel waardoor met name metingen in de eerste dagen en weken (tot circa 2 maanden na aanleg) moeten worden uitgevoerd.

4 Conclusie en toetsing evaluatievragen

Deze rapportage heeft het effect van verscheidene typen kustsuppleties op de sedimentsamenstelling in het omliggende kustgebied bestudeerd onder verschillende golf- en getijcondities, met behulp van numerieke modelsimulaties met Delft3D. Hieronder worden eerst de belangrijkste bevindingen samengevat en wordt een vertaling gemaakt naar de praktijk (paragraaf 4.1), waarna de evaluatievragen worden beantwoord (paragraaf 4.2).

4.1 Belangrijkste bevindingen

Onder golf- en getijforcering wordt zand van de suppletie geërodeerd en naar de omliggende kust toe verplaatst. Door selectieve erosie en sedimentatie verandert daarmee ook de bodemsamenstelling op en rondom de suppletie, veroorzaakt door het verschil in gedrag van bodemmateriaal (zandkorrels) van een zelfde mengsel op een specifieke hydrodynamische forcering. Voor de Zandmotor (megasuppletie) heeft dit echter andere effecten dan voor een vooroeversuppletie én zijn andere processen bepalend.

Megasuppleties

Megasuppleties, zoals de grootschalige suppletie 'de Zandmotor' beïnvloeden zowel de golven als de getijstroming relatief sterk. De meeste erosie ontstaat in ondiep water als gevolg van golfgedreven stromingen en resulterende gradiënten in langtransport. Ook wordt de langs-stroom van het getij sterk beïnvloed (i.e. getijcontractie) wat leidt tot erosie op de vooroever zeewaarts van de kop. Met name door de getijcontractie ontstaat lokaal een vergroving van de bodemsamenstelling op de vooroever. Monitoring van de sedimentsamenstelling op de vooroever bij de Zandmotor heeft laten zien dat de mediane korrelgrootte (D_{50}) na aanleg van de Zandmotor in 2011 aanzienlijk grover is dan de situatie hieraan voorafgaand in 2010. De korreldiameter (D_{50}) is lokaal tot meer dan 200 μm grover bij de kop van de Zandmotor, terwijl er aan de noord- en zuidzijde van de Zandmotor juist depositie van relatief fijner sediment optreedt. Hierdoor is de mediane korreldiameter op de omliggende kust circa 50 μm fijner voor het diepere deel van het kustdwarse profiel aan de noordzijde van de Zandmotor.

Aanvullende modelresultaten laten zien dat zelfs een relatief kleine megasuppletie (volume van $2 \times 10^6 \text{ m}^3$) het stromingsveld dusdanig kan beïnvloeden dat er aanzienlijke ($\sim 80 \mu\text{m}$) ruimtelijke variatie ontstaat in de bodemsamenstelling bovenop de natuurlijke variabiliteit. Hoe groter de megasuppletie, hoe sterker de effecten op omliggende bodemsamenstelling worden: de ruimtelijke spreiding in korrelgrootte neemt toe ($> 150 \mu\text{m}$), en de afstand vanaf de suppletie waarbij veranderingen zichtbaar zijn neemt toe van enkele honderden meters voor de relatief kleine megasuppletie (volume van $2 \times 10^6 \text{ m}^3$) tot $> 1 \text{ km}$ voor de Zandmotor. We verwachten wel dat de grootte van de verstoring in de bodemsamenstelling weer af zal nemen door de tijd heen naarmate de suppletie kleiner wordt door erosie.

Vooroeversuppleties

Vooroeversuppleties liggen op enkele meters onder de laagwaterlijn en de veranderingen gaan onder dagelijkse omstandigheden over het algemeen relatief langzaam, omdat de 'gewone' golven over de suppletie heen kunnen bewegen zonder te breken. Kustdwars transport door residuele stromingen en asymmetrie in de orbitaalbeweging van golven is voor vooroeversuppleties veel belangrijker dan voor een megasuppleties.

De vooroeversuppletie bij Ter Heijde 1997 (volume van $0,9 \times 10^6 \text{ m}^3$) is hier gebruikt als referentie, met als opgelegde randvoorwaarden het lokale golfklimaat in de winter van 1997-1998. Resultaten laten zien dat stormen, en met name die met een significante golfhoogte van meer dan 3 meter, een aanzienlijke invloed hebben op de dynamiek van de suppletie, en daarmee op de bodemsamenstelling. In het algemeen wordt het sediment op de suppletie grover ($\sim 30\text{-}50 \mu\text{m}$) door erosie van het fijnere sediment, terwijl om de suppletie heen, met name landwaarts, waar sedimentatie optreedt, verfijning van de lokale sedimentsamenstelling zichtbaar is ($\sim 20\text{-}30 \mu\text{m}$). Met name tijdens en de dagen na energetische stormen zijn de grootste effecten zichtbaar. Bij de koppen van de vooroeversuppletie, waar sterkere erosie optreedt, zijn aanzienlijke toenames in mediane korrelgrootte zichtbaar tot zo'n $50 \mu\text{m}$, met daaromheen juist verfijning van het sediment (tot $70 \mu\text{m}$). Verwacht wordt dat deze patronen met name de eerste 2 tot 4 jaar na aanleg aanwezig zijn (i.e. eerste fase van de levensduur van een vooroeversuppletie volgens Huisman et al., 2019), waarna als gevolg van de erosie van de vooroeversuppletie ook de verstoring in de bodemsamenstelling minder zal worden.

Een gevoeligheidsanalyse toont aan dat sedimentsamenstelling op en rondom een typische vooroeversuppletie sterk beïnvloed wordt door 1) golfkarakteristieken, 2) initiële korrelgrootteverdeling van het suppletiemateriaal en 3) de diepteligging van de suppletie.

1) Golfkarakteristieken

De veranderingen in bodemsamenstelling bij een typische vooroeversuppletie worden gedomineerd door golfwerking. Er is een sterke correlatie tussen de bodemschuifspanning door golven en de verandering in sedimentsamenstelling. De bodemschuifspanning is met name groot op de koppen van de suppletie, resulterend in erosie van het fijne materiaal, waardoor het achterblijvende sediment grover wordt. Daarentegen is om de suppletie heen, met in het bijzonder de trog landwaarts, een minder sterke forcering, wat resulteert in sedimentatie van fijn sediment en daardoor verfijning van de lokale bodemsamenstelling. Tijdens kalm weer bewegen golven over de suppletie heen zonder te breken, waardoor veranderingen langzaam gaan. Tijdens stormen breken golven bij de suppletie zelf waardoor in korte periode grote veranderingen optreden.

2) Initiële korrelgrootteverdeling suppletiemateriaal

De korrelgrootteverdeling van het suppletiemateriaal kan variëren op basis van het brongebied. De dynamiek van de suppletie verschilt sterk met korrelgrootteverdeling van het suppletiemateriaal, met name onder energetische condities zijn de verschillen duidelijk zichtbaar. Fijner materiaal is mobieler, wat leidt tot een hoge dynamiek van het suppletiemateriaal en relatief snelle afname van het suppletievolume, in vergelijking tot suppletiemateriaal van grover sediment. Zo zorgt grof (hier $D_{50} = 400 \mu\text{m}$) suppletiemateriaal voor een vergroving van het bodemmateriaal in de directe omgeving van de suppletie maar alleen tijdens energetische condities ($> 100 \mu\text{m}$ toename in D_{50} tot 500 m afstand). Daarentegen zorgt fijn (hier $D_{50} = 200 \mu\text{m}$) suppletiemateriaal voor verfijning van het bodemmateriaal tot op grotere afstand en ook onder kalme golfcondities ($20 \mu\text{m}$ afname in D_{50} tot 500m onder kalm weer, met $> 50 \mu\text{m}$ afname in D_{50} tot $> 1 \text{ km}$).

3) Diepteligging vooroeversuppletie

Ook de diepteligging heeft een groot effect op de dynamiek van de suppletie. Een relatief ondiep-liggende vooroeversuppletie (top op 3,5 m) wordt aanzienlijk sterker beïnvloed door de golfwerking dan een dieper liggende vooroeversuppletie (top op 5,5 m), waardoor de eerste een stuk dynamischer is en daardoor een sterk ruimtelijk variabele korrelgrootteverdeling ontwikkeld. De ruimtelijke variatie van D_{50} aan het eind van de

simulatieperiode varieert van zo'n 40 μm voor de dieper liggende suppletie tot 90 μm voor de ondiep-liggende suppletie onder relatief kalme golven.

Implicaties voor kustbeheer

Om deze resultaten door te vertalen naar de praktijk van het kustbeheer, zijn met name de initiële korrelgrootteverdeling van het suppletiemateriaal en de diepteligging van de vooroeversuppletie van belang, en voor megasuppleties de breedte van de suppletie. Hieronder wordt achtereenvolgens gesproken over megasuppleties, vooroeversuppleties en de algemene verspreiding van zandfracties na het volledig verdwijnen van de suppleties.

Op basis van deze studie kunnen we stellen dat een smallere megasuppletie minder invloed heeft op bodemsamenstelling in de omgeving. Dit geldt in ieder geval voor gebieden waar sprake is van een natuurlijke verfijning van het bodemmateriaal in zeewaartse richting, met het grofste materiaal dicht bij de waterlijn en fijner materiaal op dieper water. Het effect van een megasuppletie is ook kleiner in gebieden waar het bodemsediment op de vooroever (zeg tussen MSL -8 m en MSL-12 m) relatief grof is (i.e. vergelijkbaar met het sediment dichtbij de kust). De effecten van een megasuppletie op de bodemsamenstelling zullen afnemen over de levensduur (i.e. naarmate de suppletie kleiner wordt).

We verwachten dat er ook een invloed is van de korrelgrootteverdeling van het sediment waarmee de megasuppletie wordt aangelegd. Deze invloed zal met name dichtbij de kust merkbaar zijn (i.e. doordat sediment fijner of grover wordt), maar we verwachten dat dit effect minder zal bijdragen aan de sortering op de vooroever zeewaarts van de megasuppletie. Op de zeewaartse vooroever vindt uitsortering van de fijnere zandfracties plaats die wordt veroorzaakt door de lokale getijcontractie. De hydrodynamische sortering is voor een (wat grotere megasuppletie) de belangrijkste parameter. In andere woorden, de vorm is belangrijker dan het materiaal waarmee het is aangelegd.

Vooroeversuppleties zijn over het algemeen dynamischer als ze toegepast worden in ondiep water of met fijn suppletiemateriaal. De levensduur in ondiep water is korter (het suppletiemateriaal wordt sneller verspreid) en daardoor heeft de suppletie sneller effect op de omgeving. Hierdoor zijn ook de effecten op de omliggende bodemsamenstelling groter voor een ondiepe vooroeversuppletie. Afhankelijk van de lokale situatie, kan bij het aanleggen van de suppletie echter een afweging gemaakt worden tussen het plaatsen van een suppletie op dieper water met beperkte effecten op bodemsamenstelling over een langere periode, of het plaatsen van de suppletie in ondiep water waarbij de invloed korter aanwezig is. Opgemerkt moet worden dat de initiële sedimentsamenstelling (korrelgrootte en breedte van de verdeling) van een vooroeversuppletie relevanter kan zijn voor het effect op de bodemsamenstelling van de kust dan de sortering van zand door de hydrodynamische processen (o.a. getij en golven). Een relatief grove suppletie op diep water zorgt dan voor een veel groter effect dan de beperkte hydrodynamische sortering van ~ 30 à $50 \mu\text{m}$ verandering in de mediane korreldiameter (D_{50}). Als het wenselijk is om grof zand te gebruiken dan kan dus (vanuit een overweging van minimale impact of de lokale bodemsamenstelling) beter gekozen worden voor een plaatsing op ondiep water, aangezien dat dan beter aansluit bij de natuurlijke korrelgrootte op die waterdiepte.

De hier beschreven effecten van de suppleties op de bodemsamenstelling van de kust zijn alleen relevant tijdens de levensduur van de suppletie. Op langere tijdschaal verwachten we dat het suppletiemateriaal zich, na erosie van de suppletie, zal voegen naar de forcering (Richmond & Sallenger, 1984) en zich zodanig zal verspreiden dat opnieuw een natuurlijke

verfijning in zeewaartse richting zal ontstaan. Dit mechanisme waarbij het zand zich over de diepte contouren verdeeld afhankelijk van de samenstelling is ook echt waargenomen bij Terschelling (Guillen & Hoekstra, 1996). Dit betekent dat een suppletie met relatief grof materiaal (~300 tot 400 μm) op zeer lange termijn met name ten goede komt aan de ondiepe kustzone rond de waterlijn en in de brandingszone, terwijl fijner zand (~200 μm) zich zal verspreiden over de brandingszone en het begin van de vooroever (tot MSL -12m voor de Hollandse kust).

De huidige studie gebruikt dezelfde numerieke modelopzet als die voor de Zandmotor is toegepast en voor die situatie is gevalideerd. Een verificatie met velddata kan echter niet worden gemaakt voor de kleinere (vooroever-) suppleties. Om met meer zekerheid een uitspraak te kunnen doen over de precieze ontwikkeling van sedimentsortering bij vooroever-suppleties zou het daarom wenselijk zijn als precieze metingen van de sedimentsamenstelling (met een Van Veen bodemhopper) worden gedaan voor een werkelijk toegepaste vooroever-suppletie, waarbij ook aanverwante parameters zoals de bodemhoogte en mogelijk ook stromingen en golven worden bemeaten. Hiervoor zal echter rekening gehouden moeten worden met de snelle ontwikkeling van de sortering rond zo'n maatregel waardoor met name metingen in de eerste dagen en weken (tot circa 2 maanden na aanleg) moeten worden uitgevoerd.

Om een doorvertaling te maken van veranderingen in bodemsamenstelling naar het effect op bodemdieren en de schuilmogelijkheden voor de vissen is kennis vereist over de aanwezige soorten en een goed begrip van de invloed van verstoringen in bodemsamenstelling op hun leefomgeving. Deze kennis is nog niet beschikbaar. Daarom is in dit onderzoek gefocust op de ruimtelijke en temporele variaties in bodemsamenstelling. Het is wenselijk om na te denken over de doorvertaling van de effecten naar de ecologie. Belangrijke vragen zijn: Zijn er soorten die sterk reageren op de veranderingen in bodemsamenstelling? Waar zijn deze soorten aanwezig? En wat is de invloed? En hoe kan de invloed op de bodemdieren en platvissen eenvoudig ingeschat worden?

4.2 Toetsing evaluatievragen

De analyses in deze rapportage dragen bij aan de ecologische systeemkennis van de Zandmotor (EF2-2) :

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

De in deze studie geanalyseerde effecten van suppleties op sortering van bodemsediment vormen de basis voor een verdere analyse van de ontwikkeling van de ecologie bij de Zandmotor, waarvan verondersteld wordt dat deze samenhangt met de abiotische omgeving (i.e. hydrodynamische condities en bodemsediment). De focus in de huidige studie ligt op de veranderingen in sedimentsamenstelling van de ondiepe kustzone en lagune (EF3-1b1), de mechanismen welke verantwoordelijk zijn voor verandering in sedimentsamenstelling bij de Zandmotor (EF2-2a), en opgedane kennis voor toekomstige ontwikkelingen (EF2-3a).

4.2.1 Evaluatievraag EF3-1b1: Sedimentsamenstelling van vooroever en lagune

EF3-1b1: Hoe heeft de diversiteit in sedimentsamenstelling zich ontwikkeld in de lagune en de vooroever?

In het algemeen is er sprake van een natuurlijke verfijning van het sediment in zeewaartse richting. De effecten van een megasuppletie zoals de Zandmotor, en een meer reguliere vooroeversuppletie vertalen zich in een toename in ruimtelijke variatie van de korrelgrootte om de suppletie heen.

Monitoring van de sedimentsamenstelling op de vooroever bij de Zandmotor (Huisman et al., 2016) heeft laten zien dat de mediane korrelgrootte (D_{50}) na aanleg van de Zandmotor in 2011 aanzienlijk grover is dan de situatie hieraan voorafgaand in 2010 (Figuur 3.1). De korreldiameter (D_{50}) is lokaal tot meer dan 200 μm grover bij de kop van de Zandmotor, terwijl er aan de noord- en zuidzijde van de Zandmotor juist depositie van relatief fijner sediment optreedt. Hierdoor is de mediane korreldiameter circa 50 μm fijner voor het diepere deel van het kustdwarse profiel aan de noordzijde van de Zandmotor. In de lagune bij de Zandmotor zijn geen metingen uitgevoerd, maar modelsimulaties komen overeen met observaties dat in de lagune zeer fijn sediment aanwezig is door het afgeschermd, kalme milieu, terwijl er in de geul die de lagune verbindt met de zee juist relatief grof sediment aanwezig is door de toename in stroomsnelheden onder de getij-fluctuaties (zie Figuur 3.5).

Models simulaties voor typische vooroeversuppleties laten ook een toename in ruimtelijke variaties van de sedimentverdeling zien op de vooroever, zij het in mindere mate. Een simulatieperiode voor het winterseizoen 1997/1998 voor de suppletie bij Ter Heijde laat veranderingen in mediane korrelgrootte zien, met 20 tot 30 μm verfijning in de trog landwaarts van de suppletie, en een toename van 30 tot 50 μm op het midden van de suppletie zelf.

Verwacht wordt dat de hier beschreven effecten van de suppleties op de bodemsamenstelling van de kust alleen relevant zullen zijn tijdens de levensduur van de suppletie. Op langere tijdschaal wordt verwacht dat het suppletiemateriaal zich (na erosie van de suppletie) zal voegen naar de forcering (Richmond & Sallenger, 1984), en zich zodanig zal verspreiden dat opnieuw een natuurlijke verfijning in zeewaartse richting zal ontstaan. Dit mechanisme, waarbij het zand zich over de dieptecontouren verdeeld afhankelijk van de samenstelling, is ook waargenomen bij Terschelling (Guillen & Hoekstra, 1996). Dit betekent dat een suppletie met relatief grof materiaal (~300 tot 400 μm) op zeer lange termijn met name ten goede komt aan de ondiepe kustzone rond de waterlijn en in de brandingszone, terwijl fijner zand (~200 μm) zich zal verspreiden over de brandingszone en het begin van de vooroever (tot MSL - 12m voor de Hollandse kust).

4.2.2 Evaluatievraag EF2-2a: Mechanismen verandering sedimentsamenstelling

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

Megasuppleties beïnvloeden zowel de golven als de getijstrooming sterk. De golf forcering en resulterende stromingen zorgen voor erosie in ondiep water, terwijl in dieper water met name de getijstrooming wordt versneld waardoor sortering van sediment plaatsvindt. Modelresultaten tonen aan dat hoe groter de megasuppletie, hoe sterker de effecten op omliggende bodemsamenstelling worden: de ruimtelijke spreiding in korrelgrootte neemt toe (>150 μm), en de afstand vanaf de suppletie waarbij veranderingen zichtbaar zijn neemt toe van enkele honderden meters voor de relatief kleine megasuppletie (volume van $2 \times 10^6 \text{ m}^3$) tot > 1 km voor de Zandmotor. Deze ruimtelijke variatie van bodemsamenstelling op de vooroever van de Zandmotor is het resultaat van het verschil in suspensiegedrag (opwoeling) van fijne en grove zandkorrels van hetzelfde zandmengsel op dezelfde hydrodynamische forcering. Fijne

zandkorrels worden bij een lage bodemschuifspanning aanzienlijk meer gesuspendeerd dan middelgrote en grove zandkorrels. De fijne korrels worden daarom sneller geërodeerd en verspreiden zich relatief verder over het omliggende gebied. Een toename in ruimtelijke variatie van D_{50} kan worden veroorzaakt door hydrodynamische forcering wanneer kust-ingrepen, zoals suppleties, groot genoeg zijn om de stroming door golven of getij te beïnvloeden.

De mechanismen die sortering bij een vooroeversuppletie beïnvloeden zijn niet dezelfde als voor een megasuppletie zoals de Zandmotor. Een gevoeligheidsanalyse wijst uit dat sedimentsamenstelling op en rondom een vooroeversuppletie sterk beïnvloed wordt door 1) golfkarakteristieken, 2) de diepteligging van de vooroeversuppletie en de 3) initiële korrelgrootteverdeling van het suppletiemateriaal. Het effect van het getij op de sedimentverdeling op en rondom de vooroeversuppletie is klein. Met name het kustdwars transport door asymmetrie van de golforbitaalbeweging draagt aanzienlijk bij aan de morfologische veranderingen bij vooroeversuppleties (65-80% volgens Huisman et al., 2019). En zodoende ook aan de verandering in korreldiameter, die ontstaat door een relatief grote bijdrage van de erosie van fijne zandfracties van de kruin aan het transport naar de omgeving (i.e. met name landwaarts van de vooroeversuppletie). In de resultaten is er een sterke correlatie zichtbaar tussen de bodemschuifspanning door golven en de verandering in sedimentsamenstelling. De bodemschuifspanning is met name groot op de koppen van de suppletie, resulterend in erosie van het fijne materiaal, waardoor het achterblijvende sediment grover wordt. Daarentegen is om de suppletie heen, in het bijzonder in de trog aan de landwaartse zijde, een minder sterke forcering aanwezig, wat resulteert in sedimentatie van fijn sediment en het verfijnen van de lokale bodemsamenstelling. Door grof sediment toe te passen voor de suppletie kan in sommige gevallen echter ook juist een vergroving van het sediment optreden in de directe omgeving. De diepteligging heeft een beduidend effect op de dynamiek van de suppletie. Een relatief ondiep-liggende suppletie (top op 3,5 m) wordt veel sterker beïnvloed door de golfwerking dan een dieper liggende suppletie (top op 5,5 m), waardoor de eerste veel dynamischer is en daardoor een sterk ruimtelijk variabele korrelgrootteverdeling ontwikkeld. De ruimtelijke variatie van D_{50} aan het eind van de simulatieperiode varieert van zo'n 40 μm voor de dieper liggende suppletie tot 90 μm voor de ondiep-liggende suppletie onder relatief kalme golven. Opgemerkt moet worden dat de initiële sedimentsamenstelling van de vooroeversuppletie in veel gevallen een zeker zo groot belang heeft als de door de hydrodynamica geforceerde veranderingen in mediane korreldiameter zoals hier beschreven. Het is daarom van belang om de eigenschappen van het gesuppleerde zand af te stemmen op het natuurlijke bodemmateriaal op de diepte waarop het geplaatst wordt.

4.2.3 Evaluatievraag EF2-3a: Spin-off kennis

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

Op basis van metingen van sedimentsamenstelling bij de Zandmotor zijn modellen opgezet en afgeregeld die de geobserveerde veranderingen in bodemsamenstelling in veel detail kunnen reproduceren. Deze modellen kunnen worden ingezet als evaluatiemethode voor toekomstige suppletie-maatregelen. In dit rapport zijn deze modellen bijvoorbeeld gebruikt om 1) inzicht te krijgen in de drijvende hydrodynamische en sorteringsprocessen en 2) om de potentiële veranderingen in de bodemsamenstelling door te rekenen voor andere typen suppleties (o.a. andere vorm megasuppleties en vooroeversuppleties).

De sortering bij de Zandmotor wordt met name veroorzaakt door de verhoogde getijstroming (i.e. door getijcontractie) op de vooroever van de Zandmotor. Deze selectieve suspensie (en transport) van de fijnere zandfracties is ook voor andere typen megasuppleties van belang, in het algemeen geldt hoe groter (breder) de megasuppletie, hoe sterker de effecten op omliggende bodemsamenstelling worden.

Op basis van de voor de Zandmotor opgezette modellen kon ook informatie verkregen worden over de sorteringsprocessen bij vooroeversuppleties (Paragraaf 4.2.1 en 4.2.2). Met name de golfforcering is van invloed op de bodemsamenstelling bij deze vooroeversuppleties. Tevens speelt de initiële samenstelling van het zand ook een belangrijke rol.

Opgemerkt wordt dat de bevindingen over sortering van zand op de vooroever van de Zandmotor ook relevant zijn voor andere ingrepen zoals havendammen, die ook een aanzienlijke getijcontractie kunnen veroorzaken. Verwacht wordt dat vergelijkbare veranderingen in bodemsamenstelling (D_{50}) kunnen optreden bij deze constructies. In deze studie is echter geen aandacht besteedt aan de effecten van deze waterbouwkundige constructies.

De bevindingen met betrekking tot sortering van zand op de vooroever van de Zandmotor zijn ook een trigger geweest voor meer onderzoek naar de invloed van bodemsediment op de geschiktheid van een habitat voor bodemdieren en platvissen (Post et al., 2017). Ook voor vooroeversuppleties kunnen de nieuw-verkregen inzichten een basis zijn voor verder onderzoek.

5 Referenties

- Ashida, K., Michiue, M., (1973). Studies on bed load transport rate in alluvial streams. Jpn. Soc. Civ. Eng. 4.
- Baba, J., Komar, P.D., (1981). Measurements and analysis of settling velocities of natural quartz sand grains. J. Sediment. Petrology 51, 631–640.
- Booij, N., Ris, R. C., and Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. Journal Of Geophysical Research, C4, 104(C4):7649–7666.
- De Vincenzo, A., Covelli, C., Molino, A., Pannone, M., Ciccaglione, M., and Molino, B. (2018). Long-term management policies of reservoirs: Possible re-use of dredged sediments for coastal nourishment. Water, 11(1):15.
- 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.
- Gibson, R.N., Robb, L., (1992). The relationship between body size, sediment grain size and the burying ability of juvenile plaice, *pleuronectes platessa* L. J. Fish Biol. 40, 771–778.
- Guillén, J., Hoekstra, P. (1996). The “equilibrium” distribution of grain size fractions and its implications for cross-shore sediment transport : a conceptual model. Marine Geology 35, 15–33.
- Holland, K.T., Elmore, P.A., (2008). A review of heterogeneous sediments in coastal environments. Earth-Science Rev. 89, 116–134.
- 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. (2018). Herziening evaluatievragen Zandmotor monitoring 2017-2021. Deltares Memo 11201431-001-ZKS-0004, In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL.
- Huisman, B.J.A., Ruessink, B.G., Schipper, M.A.D., Luijendijk, A.P., and Stive, M.J.F. (2018). 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., (2019). Observations and Modelling of Shoreface Nourishment Behaviour. Journal of Marine Science and Engineering. 2019; 7(3):59.
- Inman, D.L., (1953). Areal and seasonal variations in beach and nearshore sediments at La Jolla, California. Tech. rep., U.S. Army Corps Eng. Beach Erosion Board. Tech. Memo. 39.
- Katoh, K., Yanagishima, S., (1995). Changes of sand grain distribution in the surf zone. In: Zeidler, R.B., Dally, W.R. (Eds.), Coastal Dynamics 1995: Proceedings of the

- International Conference on Coastal Research. Am. Soc. Of Civ. Eng, pp. 639–650. Gdansk, Poland.
- Knaapen, M.A.F., Holzhauser, H., Hulscher, S.J.M.H., Baptist, M.J., De Vries, M.B., Van Ledden, M., (2003). On the modelling of biological effects on morphology. River, Coastal and Estuarine Morphodynamics Barcelona, pp. 773–783.
- Lesser, G. R., Roelvink, J. A., Van Kester, J. A. T. M., and Stelling, G. S., (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. Coastal Engineering, 51(8-9):883–915.
- 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.
- McLachlan, A., (1996). Physical factors in benthic ecology: effects of changing sand particle size on beach fauna. Mar. Ecol. Prog. Ser. 131, 205–217.
- Medina, R., Losada, M.A., Losada, I.J., Vidal, C., (1994). Temporal and spatial relationship between sediment grain size and beach profile. Mar. Geol. 118 (3), 195–206.
- Moutzouris, C.I., Kraus, N.C., Gingerich, K.J., Kriebel, D.L., (1991). Beach profiles versus Cross-shore Distributions of Sediment Grain Sizes. Advances in Coastal Modeling, 860–874 American Society of Civil Engineers. New York, NY.
- Post, M. H., Blom, E., Chen, C., Bolle, L. J., and Baptist, M. J. (2017). Habitat selection of juvenile sole (*Solea solea* L.): Consequences for shoreface nourishment. Journal of Sea Research, 122:19–24.
- PZH (2010). Projectnota/ MER. Aanleg en zandwinning Zandmotor Delflandse kust. Auteur: Provincie Zuid-Holland. Februari 2010, definitief.
- Ranasinghe, R., Swinkels, C.M., Luijendijk, A.P., Roelvink, J.A., Bosboom, J., Stive, M.J.F., Walstra, D.J.R., (2011). Morphodynamic upscaling with the MORFAC approach: dependencies and sensitivities. Coast. Eng. 58 (8), 806–811.
- Richmond, B.M., Sallenger, A.H.J., (1984). Cross-shore transport of bimodal sands. Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering. 1997–2008.
- Ribberink, J.S., (1987). Mathematical Modelling of Onedimensional Morphological Changes in Rivers with Nonuniform Sediment. Ph.D. thesis. Delft University of Technology.
- Roelvink, J.A., (1993). Dissipation in random wave groups incident on a beach. Coast. Eng. 19, 127–150.
- 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.
- Ruessink, B. G., Wijnberg, K. M., Holman, R. A., Kuriyama, Y., and van Enckevort, I. M.J. (2003). Intersite comparison of interannual nearshore bar behavior. Journal of Geophysical Research, 108(C8):3249.
- Rijkswaterstaat (2017b). De JAaRijks KUSTmetingen of JARKUS.
- Sloff, C.J., Mosselman, E., (2012). Bifurcation modelling in a meandering gravel–sand bed river. Earth Surf. Process. Landforms 37 (14), 1556–1566.
- Stauble, D.K., Cialone, M.A., (1996). Sediment dynamics and profile interactions : Duck94. Coast. Eng. 4, 3921–3934.
- 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.
- Terwindt, J. H. J. (1962). Onderzoek korrelgrootte-variaties voor de kust van Katwijk (1962).

- Report K-324, Rijkswaterstaat, Den Haag, Nederland.
- Tonnon, P.K., Van der Valk, L., Holzhauser, 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.
- Van der Spek, A.J.F.; Elias, E.P.L. (2013). The effects of nourishments on autonomous coastal behaviour. In Proceedings of the 7th International Conference on Coastal Dynamics, Arcachon, France, 24–28 June 2013.
- Van Rijn, L.C., October (1997). Cross-shore Modelling of Graded Sediments. Tech. Rep. Z2181, WL | Delft Hydraulics.
- Van Rijn, L.C., (2007a). Unified view of sediment transport by currents and waves II: suspended transport. *J. Hydraulic Eng.* 133 (6), 668–689.
- Van Rijn, L.C., (2007b). Unified view of sediment transport by currents and waves III: graded beds. *J. Hydraulic Eng.* 133 (7), 761–775.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1965). Coastal barrier deposits in South- and North Holland in particular in the area around Scheveningen and IJmuiden. *Mededelingen van de Geologische Stichting*, 17:41–75.
- Zijl, F., Verlaan, Gerritsen, M., Gerritsen, H. (2013). Improved waterlevel forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction. In: *Ocean Dynamics* 63 (2013), Nr. 7, S. 823–847.

A Overzicht modelscenario's

Naam	Type suppletie	Randvoorwaarden	Initiële condities	overig
V0	Vooroeversuppletie 0.9 x10 ⁶ m ³	Repr. getij + H _{m0} = 1 m, T _p = 5s, dir = 310°	D ₅₀ van 278 μm	2D, morfac = 8, Lengte suppletie = 1800 m, top suppletie -4.5 m
V1	V0	V0	V0	V0 + 3D
V2	Vooroeversuppletie 3x10 ⁶ m ³	V0	V0	V0 + Lengte suppletie = 3600 m
V3	Vooroeversuppletie 1.6 x10 ⁶ m ³	V0	V0	V0 + top suppletie op -3.5 m waterdiepte
V4	Vooroeversuppletie 0.35 x10 ⁶ m ³	V0	V0	V0 + top suppletie op -5.5 m waterdiepte
V5	V0	V0 + H _{m0} = 2 m, T _p = 7s	V0	V0 + morfac = 4
V6	V0	V0 + H _{m0} = 3 m, T _p = 9s	V0	V0 + morfac = 4
V7	V0	V0 + dir = 270°	V0	
V8	V0	V0 + dir = 290°	V0	
V9	V0	V0 + alleen verticaal getij	V0	
V10	V0	V0 + alleen horizontaal getij	V0	
V11	V0	V0 + geen getij	V0	
V12	V0	V0 + geen getij + H _{m0} = 2 m	V0	V0 + morfac = 4
V13	V0	V0	V0 + Representatieve ruimtelijke korrelgrootte variatie	
V14	V0	V0	D ₅₀ van 400 μm	
V15	V0	V0 + H _{m0} = 2 m, T _p = 7s	D ₅₀ van 400 μm	V0 + morfac = 4
V16	V0	V0 + H _{m0} = 3 m, T _p = 9s	D ₅₀ van 400 μm	V0 + morfac = 4
V17	V0	V0	D ₅₀ van 200 μm	
V18	V0	V0 + H _{m0} = 2 m, T _p = 7s	D ₅₀ van 200 μm	V0 + morfac = 4
V19	V0	V0 + H _{m0} = 3 m, T _p = 9s	D ₅₀ van 200 μm	V0 + morfac = 4
V20	V0	Realistische golfcondities	V0	V0 + morfac = 1
V21	V0	Realistische golfcondities	V0 + Repr. ruimtelijke	V0 + morfac = 1

			korrelgrootte variatie	
G0	Geen suppletie	V0	V0	V0
M0	Megasuppletie 16.0 x10 ⁶ m ³	V0	V0	Breedte 1km
M1	Megasuppletie 6.0 x10 ⁶ m ³	V0	V0	Breedte 500m
M2	Megasuppletie 2.3 x10 ⁶ m ³	V0	V0	Breedte 250m