

Natuurlijk Veilig

Cumulatief effect van zandsuppleties op sediment en bodemdieren



Natuurlijk Veilig

Cumulatief effect van zandsuppleties op sediment en bodemdieren

Auteur(s)

Peter Herman

Bas Huisman

Theo Prins

Natuurlijk Veilig

Cumulatief effect van zandsuppleties op sediment en bodemdieren

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	mevrouw P. Damsma
Referenties	-
Trefwoorden	langetermijneffecten, kustsuppleties, ecologie, vooroever

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	11-02-2022
Projectnummer	11205236-004
Document ID	11205236-004-ZKS-0001
Pagina's	76
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	P.M.J. Herman	
	B.J.A. Huisman	
	T.C. Prins	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
2.0	P.M.J. Herman	M.Taal 	T. Segeren 	
	B.J.A. Huisman			
	T.C. Prins 			

Samenvatting

Dit rapport presenteert onderzoeksresultaten over veranderingen in de bodemsamenstelling, de bodemdiersamenstelling en de gevoeligheid van bodemdieren voor veranderingen in fysische stress en bodemsamenstelling. Het onderzoek was gericht op de Hollandse kust en in het bijzonder de Delflandse kust. Het is uitgevoerd onder het programma 'Natuurlijk Veilig'. Onderzocht is of suppleties kunnen leiden tot langetermijnveranderingen in de samenstelling van het sediment en of die veranderingen in het sediment invloed zouden kunnen hebben op de bodemdiersamenstelling in de vooroever.

Het doel van 'Natuurlijk Veilig' is kennisontwikkeling over de effecten van zandsuppleties op de ecologie van het kuststelsel. Met die kennis wil Rijkswaterstaat negatieve effecten van suppleties op de ecologie verminderen en positieve effecten versterken.

Het onderzoek naar veranderingen in de bodemsamenstelling richtte zich op de invloed van kustsuppleties in vergelijking met de invloed van andere processen. Er is evident een direct en lokaal effect van een suppletie, maar dat is na enige tijd en op grotere schaal niet meer waarneembaar. Uit de nu beschikbare gegevens blijkt niet dat er een grootschalige trendmatige verandering is opgetreden in de sedimentsamenstelling in de vooroever sinds 1990.

Naast suppleties zijn ook andere processen van invloed op de bodemsamenstelling, zoals erosie, transport en sortering onder invloed van golven en getijstromen, aanvoer van sediment uit de rivieren en veranderingen in hydrodynamische omstandigheden. Een verkennende schatting, middels een aantal aannames, komt erop uit dat suppleties mogelijk voor een vergroving van de korrelgrootte van het sediment in de vooroever kunnen zorgen, maar als dat optreedt zal het pas detecteerbaar zijn op de termijn van meerdere decennia. Dit effect zal optreden als er stelselmatig en langdurig wordt gesuppleerd met zand dat grover is dan het zand op de suppletielocatie. Het werkelijke effect zal sterk afhankelijk zijn van de wijze waarop suppleties worden uitgevoerd.

Het onderzoek naar de bodemdiersamenstelling en de gevoeligheid voor fysische stress en bodemsamenstelling leert dat de fysische stress (door golven, stroming) de meest bepalende factor is voor de samenstelling van de bodemdiergemeenschap. De gevoeligheid van de bodemdiersamenstelling voor de korrelgrootte is kleiner, maar wel mede bepalend voor de structuur van de gemeenschap.

Bodemdiersoorten die gevoelig zijn voor korrelgrootte zijn over het algemeen soorten die voorkomen in soortenrijke gemeenschappen met relatief hoge dichtheden en biomassa. Die soorten leven in de diepere zones (beneden ca. NAP-6 m) van de vooroever, waar relatief fijn zand (mediane korrelgrootte rond 150-250 μm) ligt. Wanneer in deze zone het sediment grover zou worden, kan dat effecten hebben op het voorkomen van de meer gevoelige soorten en doorwerken op de samenstelling van de bodemdiergemeenschap. De veranderingen in de gemeenschap zouden ecologische gevolgen kunnen hebben voor de rest van het voedselweb, maar informatie daarover kan uit deze studie niet worden afgeleid. Er zijn uitzonderingen omdat er op die diepte ook gespecialiseerde soorten van grover sediment voorkomen. In die grovere sedimenten is de diversiteit en dichtheid lager en door het ontbreken van de grotere schelpdieren is ook de biomassa lager.

In de ondiepe brandingszone zijn de meeste soorten niet sterk afhankelijk van de korrelgrootte van het sediment. Deze soorten zijn gespecialiseerd in het omgaan met de sterke verstoring door de branding en hebben vaak een sterk vermogen te ontsnappen naar de waterkolom, of zich zeer snel in te graven na verstoring van het sediment. Omdat suppleties weinig veranderen aan de fysische stress in die zone, is het niet te verwachten dat suppleties aanleiding geven tot een sterke verarming van de fauna in de ondiepe vooroever.

Samenvattend wordt geconcludeerd dat vergroving van het sediment vooral gevolgen kan hebben voor de fauna van de vooroever als het optreedt in het diepere deel van de vooroever (> 6m) en bij een uitgangssituatie van relatief fijn zand (ordegrootte 200 μm). Er worden geen sterke effecten van vergroving verwacht in de brandingszone (<6 m diep), of op vooroeverprofielen die reeds een mediane korrelgrootte >300 μm hebben.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	KPP project Beheer en Onderhoud Kust	8
1.2	Natuurlijk Veilig	8
1.2.1	Wadden	8
1.2.2	Strand en duinen	8
1.2.3	Vooroever	9
1.3	Onderzoek bodemdieren in de vooroever	9
1.3.1	Vraagstelling	9
1.3.2	Data verzameling	9
1.4	Doel van dit rapport	10
1.5	Leeswijzer	10
2	Sedimentsamenstelling vooroever	11
2.1	Inleiding	11
2.2	Gegevens over ontwikkeling Delflandse kust	11
2.2.1	Kustprofiel en lange-termijn bodemhoogteveranderingen	11
2.2.2	Sedimenttransport	13
2.2.3	Sedimentsamenstelling vooroever	13
2.2.3.1	Historische gegevens	14
2.2.3.2	Natuurlijke dynamiek in samenstelling	18
2.2.3.3	Effect Zandmotor	18
2.2.4	Sedimentsamenstelling van de duinen van de Hollandse kust	19
2.3	Inventarisatie invloedfactoren op bodemsamenstelling	20
2.3.1	Herverdelen van sediment op de vooroever	21
2.3.1.1	Kustwaarts transport	21
2.3.1.2	Noordwaarts getij- en golfgedreven transport	22
2.3.1.3	Verspreiding van het geërodeerde fijne zand in de diepe vooroever	23
2.3.2	Wijziging in de aanvoer van sediment	24
2.3.2.1	Verandering in aanvoer van sediment door de Nieuwe Maas	25
2.3.2.2	Verandering in de aanvoer van fijn duinzand	26
2.3.3	Invloed van het toevoegen van suppletiezand aan de kustzone	26
2.3.3.1	Verwachte mate van vergroving ter plaatse van de suppleties	26
2.3.3.2	Invloed van suppletiezand op de sedimentsamenstelling van de gehele kustzone	27
2.3.4	Versterkte hydrodynamische forcering bij constructies of suppleties	28
2.3.4.1	Invloed van verandering van de hydrodynamica op de sedimentsamenstelling	29
2.3.4.2	Invloed van grootschalige suppleties op de bodemsamenstelling	29
2.3.4.3	Invloed van havendammen op de bodemsamenstelling	30
2.4	Conclusies	32
3	Bodemdieren in de vooroever – bemonsteringen Natuurlijk Veilig 2017 en 2018	34
3.1	Inleiding	34
3.2	Materiaal en Methodes	34

3.2.1	Bemonstering	34
3.2.2	Voorbehandeling en statistische analyse van de gegevens	35
3.3	Resultaten	36
3.4	Discussie	42
3.5	Conclusie	45
4	Relatie tussen fysische stress, korrelgrootteverdeling en bodemdieren	46
4.1	Inleiding	46
4.2	Analyse van de data van de Zandmotor	46
4.2.1	Samenvatting van eerdere analyses	46
4.2.2	Respons van soorten op variaties in korrelgrootte, bodemschuifspanning en diepte	49
4.2.3	Conclusies uit de Zandmotor-dataset	52
4.3	Validatie met historische en recente datasets	52
4.3.1	Gebruikte gegevens	52
4.3.2	Diepte als proxy voor bodemschuifspanning	53
4.3.3	Analyse van de gecombineerde dataset	53
4.4	Hoe sterk kan een verandering van sediment de fauna veranderen?	56
4.5	Gemeenschapsrespons	59
5	Slotbeschouwing	61
6	Literatuur	66
A	Kaart met voorkomen slib (Van Alphen, 1987b)	69
B	Data studies	70
B.1	Sediment-data	70
B.2	Bodemdier-data	70
C	Berekening bodemschuifspanning en verandering korreldiameter	74

1 Inleiding

1.1 KPP project Beheer en Onderhoud Kust

Dit onderzoek, voor het programma 'Natuurlijk Veilig', is onderdeel van het KPP project 'Beheer en onderhoud kust' (BenO Kust). KPP BenO Kust levert systeemkennis van de Nederlandse kust. De onderzoeksvragen worden opgesteld vanuit het beheer en onderhoud van de kust. Inzichten in het systeemgedrag worden vertaald naar adviezen over het huidige kustbeheer (in het bijzonder suppleties). Dit levert een directe bijdrage aan kustlijnzorg en draagt bij aan het (toekomstig) kustbeleid.

Het onderzoek voor 'Natuurlijk Veilig' levert kennis over de effecten van zandsuppleties op de ecologie van het kuststelsel, zowel vooroever als strand en duinen. Doel is hiermee te adviseren over aanpassingen in het kustbeheer, in het bijzonder de wijze van suppleren, om de negatieve effecten op de ecologie te verminderen en positieve effecten te versterken.

1.2 Natuurlijk Veilig

In 2009 hebben Rijkswaterstaat en natuurbehoudsorganisaties via een convenant afgesproken met een onderzoeksprogramma de ecologische effecten van het kustbeheer nader in kaart te brengen en te zoeken naar verbeteringen van de praktijk. Dit leidde tot het programma "Ecologisch gericht suppleren, nu en in de toekomst" (Holzhauer *et al.* 2009). Na afloop van dit programma in 2015 is overeengekomen een vervolg te geven aan dit onderzoek. Dit vervolg startte met een rapportage die toewerkte naar een uitvoeringsplan (Herman *et al.* 2016). Die rapportage geeft een uitgebreide systeembeschrijving van de Nederlandse kust, waarin ingegaan wordt op de ecologische vraagstukken rond suppleties. De rapportage kijkt ook vanuit een breder perspectief naar de fysische, morfologische en ecologische processen in de kust. Op basis hiervan zijn kennisleemtes geïdentificeerd en is een ontwerp uitvoeringsplan opgesteld. De rapportage omvat ook een prioritering van de belangrijkste vraagstukken die onderzocht konden worden binnen het beschikbare budget en de periode van vijf jaar. Het onderzoek in 'Natuurlijk Veilig' in de jaren 2016-2020 kan onderverdeeld worden in drie onderdelen, 'Wadden', 'zeereep (strand en duinen)' en 'vooroever'.

1.2.1 Wadden

Het onderzoek naar de cumulatieve effecten van suppleties op de Waddenzee is afgerond in 2017. In de Waddenzee zelf vinden geen suppleties plaats, maar er worden wel suppleties uitgevoerd langs de Noordzeekust van de Waddeneilanden. Het onderzoek richtte zich op de vraag of de sedimentsamenstelling van de Waddenzee van belang is voor het bodemleven. Daarbij is ervan uitgegaan dat het belangrijkste effect van de suppleties (als dat er is) via sedimentsamenstelling loopt. Er is daarom een statistische analyse uitgevoerd van de relaties tussen bodemdieren en fysische factoren in de Waddenzee. Daarmee zijn voorspellingen gedaan over de mogelijke ecologische effecten van suppleties op de Waddenzee. De resultaten zijn gerapporteerd (Folmer *et al.* 2017) en samengevat in een memo¹.

1.2.2 Strand en duinen

Dit onderdeel onderzocht wat de effecten van veranderingen in suppleties en zeereepbeheer zijn op de diversiteit van landschap en ecologie in de zeereep. Er is geanalyseerd wat de

¹ <https://www.natuurlijkveilig.nl/binaries/natuurlijk-veilig/documenten/publicaties/2018/01/08/memo-waddenzee/Memo+Waddenzee.pdf>

effecten van verschillende vormen van suppleren en zeereepbeheer zijn op de diversiteit van duinlandschappen. De resultaten zijn gerapporteerd in 2019 (de Groen *et al.* 2019).

1.2.3 Vooroever

Dit onderdeel onderzoekt wat de langetermijneffecten zijn van reguliere suppleties op de ecologie van de vooroever, in het bijzonder de bodemdier- en visgemeenschap.

Als basis voor dit onderzoek zijn de volgende hypothesen geformuleerd:

- Regelmatige suppleties leiden tot een verandering van fysische karakteristieken in het habitat, met name korrelgrootteverdeling, steilheid van de vooroever, diepte en bankdynamiek. Hierdoor keren de gemeenschappen in de jaren na suppletie niet terug naar de uitgangssituatie, maar naar een gewijzigde samenstelling in overeenstemming met de gewijzigde karakteristieken. Dit geldt zowel voor benthos als vis.
- De vooroever is van groot belang voor de ontwikkeling van vispopulaties, omdat hij als kinderkamer fungeert. Veranderingen in de kinderkamerfunctie van de vooroever hebben een significant effect op de populaties, ook al treden ze slechts op in een ruimtelijk beperkte fractie van het verspreidingsgebied van de (adulte) populatie.
- Er zijn ruimtelijke gradiënten in de habitats van de vooroever langs de Nederlandse kust, van Zeeland tot de Waddenzee, die zich reflecteren in de samenstelling van de gemeenschappen van benthos en vis en die de gevoeligheid van deze gemeenschappen voor suppleties beïnvloeden. Gradiënten kunnen scherp zijn bij geulen en buitendelta's en door deze landschapselementen worden bepaald. Een betere habitatclassificatie verbetert de voorspelbaarheid van effecten van (herhaalde) suppleties.

Voor de visgemeenschap heeft het onderzoek zich, via veldonderzoek en modellering, gericht op de vraag in hoeverre suppleties invloed hebben op de visgemeenschap in de kustzone en op de kinderkamerfunctie van de vooroever. Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Marine Research en wordt apart gerapporteerd (Van Hal *et al.*, 2021).

Voor de bodemdiergemeenschap zijn de relaties tussen fysische omgevingsfactoren en bodemdieren statistisch onderzocht. Het doel is om op basis daarvan meer inzicht te krijgen in hoeverre suppleties, door het beïnvloeden van omgevingsfactoren (zoals diepte, bodemschuifspanning, korrelgrootteverdeling) doorwerken op de bodemdiergemeenschap. De resultaten van het onderzoek aan de bodemdiergemeenschap staan in dit rapport.

1.3 Onderzoek bodemdieren in de vooroever

1.3.1 Vraagstelling

Suppleties hebben directe effecten op de bodemdierengemeenschap doordat de bodemdieren bedekt raken met zand en afsterven. Dit effect is lokaal en herstel treedt op in een termijn van enkele jaren. Aan deze effecten van suppleties is relatief veel onderzoek gedaan. De cumulatieve effecten van suppleties op een termijn van meer dan vijf jaar en op de schaal van de gehele Nederlandse kust kunnen echter niet afgeleid worden uit die onderzoeken. De belangrijkste openstaande vragen voor de cumulatieve effecten op middellange en lange termijn hebben betrekking op de fysische en ecologische processen in de vooroever (Herman *et al.* 2016): "Hierbinnen liggen verschillende vragen met een fysische koppeling, bijvoorbeeld over de rol van de korrelgrootte voor benthos en vis, de langetermijneffecten van suppleties op het sorteringsmechanisme, de relatie tussen bankdynamiek en benthos. Daarnaast liggen er verschillende vragen over ecologische processen zoals over voedselwebinteracties en het belang van de vooroever voor vis."

1.3.2 Data verzameling

Er is voor gekozen geen grootschalig bemonsteringsprogramma op te zetten. In samenhang met het veldonderzoek aan de visgemeenschap van de vooroever zijn op beperkte schaal

bemonsteringen uitgevoerd van de bodemdiergemeenschap. Deze data zijn gebruikt in de analyses die in dit rapport beschreven worden.

Daarnaast is besloten zoveel mogelijk gebruik te maken van bestaande datasets. Er is een inventarisatie gemaakt van beschikbare data uit eerder veldonderzoek. Op basis daarvan is een selectie gemaakt en die data zijn opgewerkt tot een standaard format. Een beschrijving van de uiteindelijke datasets en de verwerkingsstappen is opgenomen in Bijlage B.

De verzamelde en opgewerkte data zijn beschikbaar via <https://www.informatiehuismarien.nl/open-data/>

1.4 Doel van dit rapport

Dit rapport doet verslag van de analyses die zijn uitgevoerd door Deltares in het kader van Natuurlijk Veilig. Onderzocht is of suppleties kunnen leiden tot langetermijnveranderingen in sedimentsamenstelling en of dit invloed zou kunnen hebben op de bodemdiersamenstelling in de vooroever.

In vervolg op dit voorliggende rapport en het rapport over de visgemeenschap in de vooroever (van Hal et al. 2021), wordt in 2021 een synthese opgesteld van het onderzoek in Natuurlijk Veilig aan de langetermijneffecten van suppleties op de vooroever. Die synthese gaat meer in op de implicaties voor de uitvoering van suppleties en adviezen over aanpassingen in de wijze van suppleren of van het kustbeheer om negatieve effecten op de ecologie te verminderen en positieve effecten te versterken.

1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de resultaten van de analyses van langetermijnveranderingen in de sedimentsamenstelling van de vooroever in relatie tot fysische factoren. Hier wordt beschreven in welke mate suppleties en andere processen een rol spelen.

Hoofdstuk 3 bevat een analyse van de gegevens van bodemdieren uit de bemonsteringen die in het kader van Natuurlijk Veilig in 2017 en 2018 zijn uitgevoerd, en beschrijft de veranderingen in de bodemfauna met de diepte in de vooroever.

Hoofdstuk 4 rapporteert over de analyse van de uitgebreidere dataset van de Zandmotor, waarbij in meer detail is gekeken naar de invloed van specifieke fysische omgevingsfactoren op de bodemdierengemeenschap.

Hoofdstuk 5 omvat een discussie van de resultaten en de belangrijkste conclusies.

2 Sedimentsamenstelling vooroever

2.1 Inleiding

De sedimentsamenstelling van de kust is van groot belang voor de bodemdiergemeenschap, maar kan ruimtelijk wezenlijk verschillen en ook veranderen in de tijd (Holland & Elmore, 2008). Deze veranderingen kunnen grote effecten hebben op bodemdieren (McLachlan, 1996) en jonge vissen (Gibson en Robb, 1992; Knaapen et al. 2003). Dit hoofdstuk beschrijft het onderzoek naar de sedimentsamenstelling van de vooroever over de afgelopen decennia. Geanalyseerd is in hoeverre zandsuppleties kunnen bijdragen aan veranderingen in sedimentsamenstelling.

De Delflandse kust is als voorbeeld-kustzone gebruikt, vanwege de relatief uniforme kustlijn in kustlangse richting én omdat voor dit kustvak de meeste data over sedimentsamenstelling beschikbaar zijn.

De onderzoeksvragen zijn:

- “Is de sedimentsamenstelling van de Delflandse kust in afgelopen decennia veranderd?”
- “Kunnen bijdrages van processen die hierop invloed hebben kwantitatief worden bepaald?”

In het project Kustgenese 2 is recent veel onderzoek gedaan aan de dynamiek van het Amelandse zeegat. Dit is een heel andere, nog complexere, situatie dan de vooroever van een uniforme kust. In een zeegat is de variatie in sedimentsamenstelling in de getijgeulen groot en is de situatie onvergelijkbaar met de ondiepe zone van de Hollandse kust waar de invloed van golven dominant is. Het valt buiten het kader van het onderzoek in Natuurlijk Veilig om ook de processen in de zeegaten mee te nemen in de analyses.

In §2.2 staat een overzicht van de beschikbare informatie over veranderingen in de bodemhoogte, transporten en sedimentsamenstelling. Hierna volgt een overzicht van mogelijke oorzaken voor een verandering in korrelgrootte van de Delflandse kust én een 1^e orde inschatting van de bijdrage van die verschillende oorzaken (§2.3). Aandacht krijgen achtereenvolgens 1) het herverdelen van sediment door het natuurlijke systeem, 2) invloed van veranderingen in de aanvoer van (fijner) zand vanuit de rivier of de duinen, 3) de directe invloed van het storten van zand bij suppleties en 4) de lokale invloed van grootschalige kustmaatregelen op de bodemsamenstelling. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van eenvoudige berekeningen van de verwachte ordegrootte van de bijdrage.

2.2 Gegevens over ontwikkeling Delflandse kust

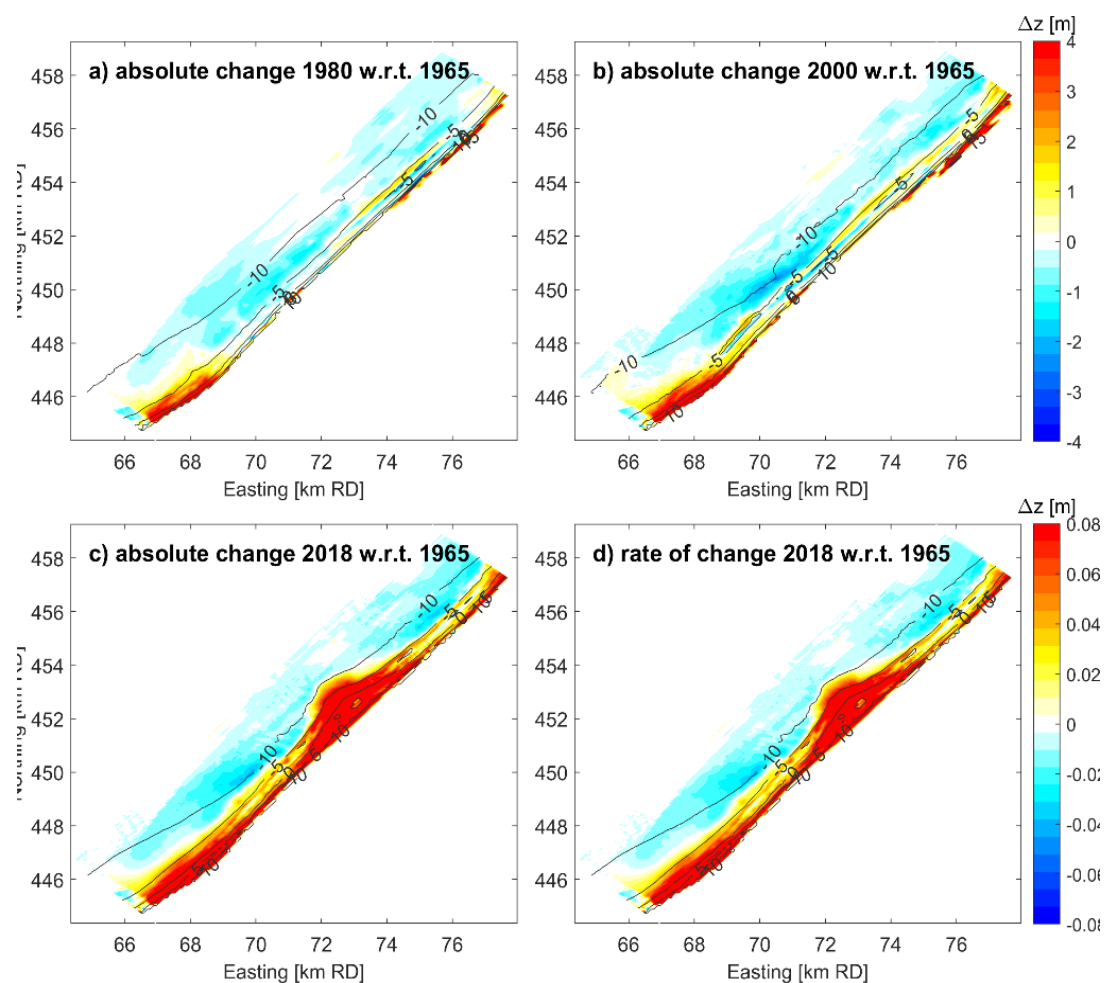
Deze paragraaf beschrijft de situatie en ontwikkeling van de Delflandse kust wat betreft de bodemhoogte, transporten en sedimentsamenstelling.

2.2.1 Kustprofiel en lange-termijn bodemhoogteveranderingen

De Delflandse kust wordt gekenmerkt door een strandhelling van 1:35 met een mildere helling van 1:150-1:200 in de brekerszone (Rijkswaterstaat, 2019). Onderscheid wordt gemaakt tussen de ‘ondiepe vooroever’ of brandingszone (tot NAP -6m) en de diepe vooroever (zeewaarts van NAP -6m). Van nature is de kust bij Delfland erosief, maar suppleties gaan dit tegen. Sinds de jaren 60 zijn zandsuppleties uitgevoerd, eerst tegen de duinen en later op het strand of onder water (vóór de eerste brekerbank). Daarnaast is de constructie van de havendammen van de Nieuwe Waterweg tussen 1865 en 1872 (en latere

verlenging daarvan) van belang. Dit creëerde een luwe zone waar sediment kon achterblijven. In de jaren 70 is met 19 miljoen m³ zand dat vrijkwam bij de ontgraving van de Europoort havens een grote driehoeksvormige landaanwinning van 150 hectare gemaakt bij Hoek van Holland (de 'Van Dixhoorndriehoek'), net noordelijk van de havendam (dit is ook zichtbaar in Figuur 2.1a).

Sinds de jaren 90 is er geen erosie meer in ondiep water, op het strand en in de duinen. Na het jaar 2000 is er sprake van kustuitbouw, voornamelijk omdat suppletiezand vanuit de BKL-zone naar de duinen is getransporteerd. In 2011 is met een grootschalige suppletie de Zandmotor aangelegd. Figuur 2.1 laat ook het effect van de Zandmotor zien.



Figuur 2.1 Bodemhoogteverandering van Delflandse kust voor 1980, 2000 en 2018 (t.o.v. 1965), waarin de blauwe kleuren duiden op erosie en de gele/rode kleuren op verhoging van de bodem.

2.2.2 Sedimenttransport

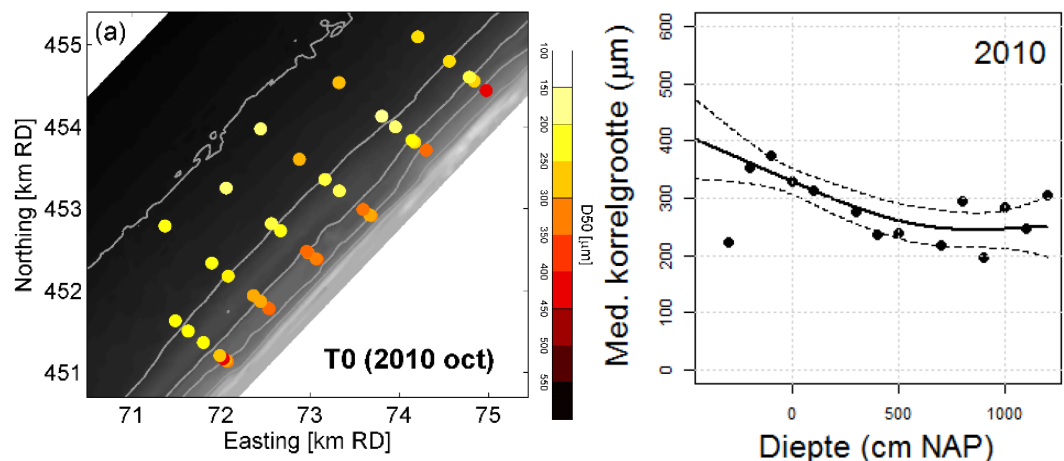
Voor de Delflandse kust is het kustlangse sedimenttransport als gevolg van golfgedreven transport gemiddeld ongeveer 100.000 tot 200.000 m³/jaar (Van Rijn, 1997). Per jaar kan dit aanzienlijk verschillen (van 0 tot 400.000 m³/jaar) en vanzelfsprekend is het ook afhankelijk van de locatie langs de kust (Huisman et al., 2018b).

Suppleties zorgen voor een netto toename van het volume van de Delflandse kust sinds 2000. Zonder suppleties zou er sprake zijn van erosie. Uit de analyse van sedimentbudgetten van de Delflandse kust na aanleg van de Zandmotor (Huisman et al., 2018b) blijkt dat de duinen tussen Hoek van Holland en Scheveningen sterk aanzanden (met ongeveer 200.00 m³/jaar) terwijl er erosie is op zowel de ondiepe vooroever (strand/brandingszone; -60.000 m³/jaar) als de diepe vooroever die tot circa 12 meter waterdiepte is ingemeten (circa 100.000 m³/jaar). Fijn sediment wordt door de wind via het strand naar de duinen gevoerd. De analyse (Huisman et al., 2018b) kon echter geen volledig beeld geven van alle veranderingen op de vooroever, aangezien er vrijwel geen informatie was over het deel zeewaarts van de NAP-12 m dieptecontour.

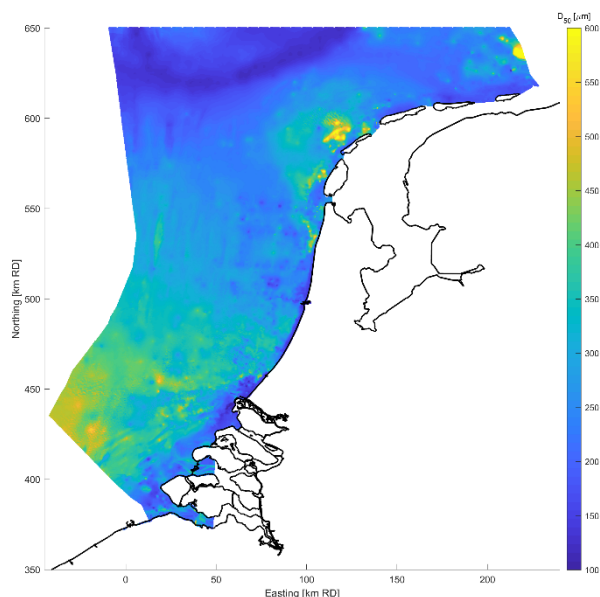
2.2.3 Sedimentsamenstelling vooroever

De bodemsamenstelling in de (ondiepe) kustzone hangt samen met de morfologie. Het grofste sediment is aanwezig rond de waterlijn in de zogenaamde “swash zone” (o.a. Inman, 1953). De Delflandse kust heeft een mediane korrelgrootte (D_{50}) aan de waterlijn van 300-400 μm . In zeewaartse richting is sprake van een natuurlijke verfijning van het bodemmateriaal (Figuur 2.2) tot een D_{50} van 150-200 μm op 10 m en dieper (Wijsman et al., 2015; Huisman et al., 2016). Op het strand en in de duinen heeft het sediment een D_{50} van 150 tot 250 μm .

Voor de gebieden op zee is data beschikbaar van TNO surveys (Figuur 2.3). Deze data laat de variatie zien van sediment op zee, met grovere gebieden in het zuidwesten en bij Texel en Vlieland, terwijl er aanzienlijk fijner sediment aanwezig is in het noordelijke deel van het NCP. Voor de ondiepe kustzone (1-3 km van de kustlijn) en de estuaria (zoals de Westerschelde) zijn deze metingen echter niet geschikt, omdat er in dit gebied geen of zeer weinig monsters worden genomen.



Figuur 2.2 Mediane korreldiameter van het bodemsediment (D_{50} in μm) voor de Delflandse kust in 2010. Links: Ruimtelijke verdeling van de mediane korreldiameter (Huisman et al., 2016). Rechts: de kustdwarse verdeling (Wijsman et al., 2015).



Figuur 2.3 Mediane korreldiameter van het bodemsediment (D_{50} in μm) voor de Nederlandse kust voor het jaar 2007 (TNO data).

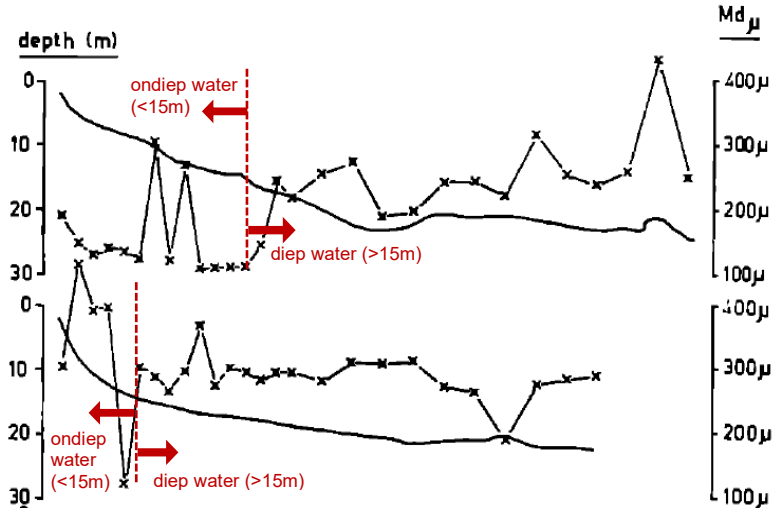
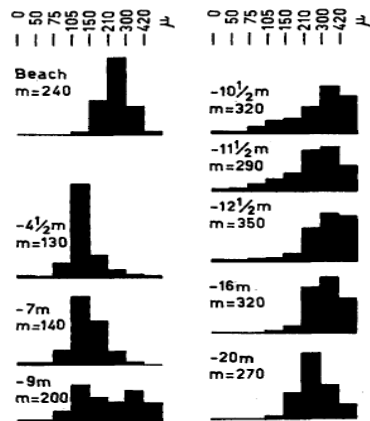
2.2.3.1 Historische gegevens

Metingen van vóór 1970 van de korrelgrootte zijn niet zo gedetailleerd als recente metingen én enkel beschikbaar voor Hoek van Holland en Scheveningen (Eisma, 1968). De mediane korrelgrootte die door Eisma (1968) is gemeten bij Hoek van Holland (op waterdiepte kleiner dan 15 m) lag tussen de 100 en 200 μm (zie Figuur 2.4), wat aanzienlijk fijner is dan in de recente metingen uit 2010 (o.a. Wijsman et al, 2015). De kustlijn is hier echter door de jaren heen sterk aangezand als gevolg van de aanleg van havendammen en de Van Dixhoorndriehoek. Verondersteld wordt dat het fijnere sediment is begraven onder nieuw sediment dat zowel op natuurlijke wijze aangezand is als is gesuppleerd. Ook zonder suppleties was hier sterke verzanding opgetreden.

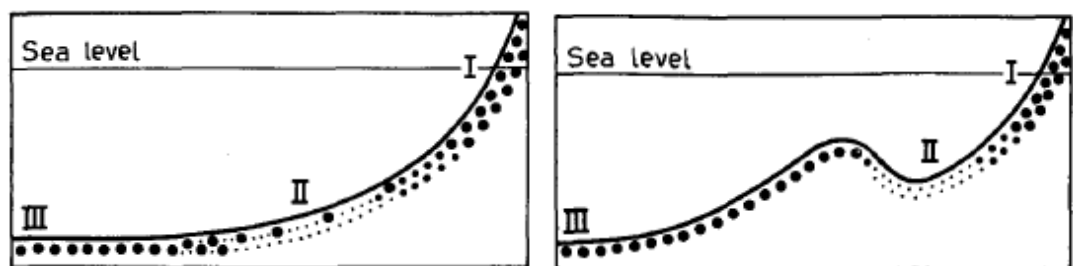
Indien de informatie van Van Straaten (1965) wordt vergeleken met Eisma (1968; Figuur 2.4) dan valt op dat de samenstelling in dieper water vergelijkbaar is (D_{50} van $\sim 300 \mu\text{m}$) maar dat de korrelgrootte dicht bij de kust (in minder dan 7 m waterdiepte) aanzienlijk fijner is bij Van Straaten (1965). Op ondiep water vindt Eisma (1968) grover sediment met een D_{50} van 300 tot 450 μm , terwijl er volgens Van Straaten (1965) fijner sediment met een D_{50} van 130 tot 240 μm ligt tussen de waterlijn en de 9 meter dieptecontour (Van Straaten, 1965; zie Figuur 2.4). Mogelijkerwijs is er veel verschil omdat net andere raaien zijn gemeten, wat er op zou duiden dat er op korte afstand aanzienlijke verschillen in korreldiameter mogelijk zijn. Echter de metingen van Eisma (1968) sluiten meer aan op de verwachtingen met betrekking tot de korreldiameter in ondiep water, welke rond de 300 μm ligt. De metingen van Van Straaten lijken niet heel realistische waardes te geven voor de D_{50} van 130 a 140 μm in 4 tot 7 meter diep water.

Methodische verschillen in de analyses kunnen een rol spelen. Zowel Eisma als Van Straaten hebben de monsters gezeefd, maar de wijze van uitvoeren van de zeefanalyses kan invloed hebben gehad op de meetresultaten.

Scheveningen (Van Straaten, 1965)



Figuur 2.4 Kustdwarse verdeling van mediane korreldiameter van het bodemsediment (D_{50} in μm weergegeven als 'm') voor de Delflandse kust bij Scheveningen en Hoek van Holland (links : Van Straaten, 1965; rechts : Eisma, 1968).



Figuur 2.5 Kustdwarse verdeling van mediane korreldiameter van het bodemsediment voor de Delflandse kust bij Scheveningen (Van Straaten, 1965).

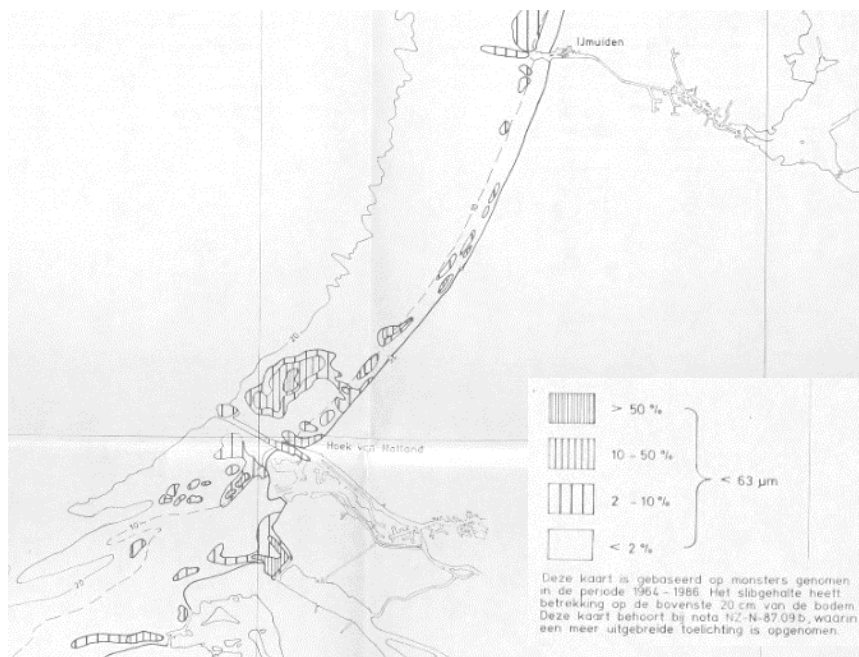
Van Straaten (1965) geeft aan dat de ruimtelijke variatie in bodemsediment samenstelling op diep water samenhangt met de heersende netto noordwaartse sedimentstromen, terwijl het op ondiep water wordt bepaald door de golfwerking, wat samenhangt met de waterdiepte (Figuur 2.5). Met name op dieper water geldt dat de ruimtelijke variatie van de bodemsamenstelling (in de kustdwarse en kustlangse richting) het resultaat is van het verschil in gedrag van bodemmateriaal op dezelfde hydrodynamische forcering (Huisman et al., 2018a). Een verschil in sortering kan worden veroorzaakt door verschillen in opwoeling (resuspensie) en transport van sediment, waarbij fijn materiaal bij een lagere kritische bodemschuifspanning in suspensie wordt gebracht dan grover (en dus zwaarder) sediment en daardoor sneller erodeert en relatief verder verspreidt over het aangrenzende gebied.

Bij zandbanken kan de bodemsamenstelling ruimtelijke 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; Katoh & Yanagishima, 1995), terwijl het tegenovergestelde is geobserveerd voor Nederlandse kustgebieden (Van Straaten, 1965; Figuur 2.5). Door Huisman et al. (2016) wordt grover sediment gevonden aan de landwaartse zijde van de brekerbank. De bevindingen van Van Straaten wijken af van het algemene beeld in de literatuur. Het is niet eenvoudig te bepalen waardoor dit komt, maar verondersteld wordt

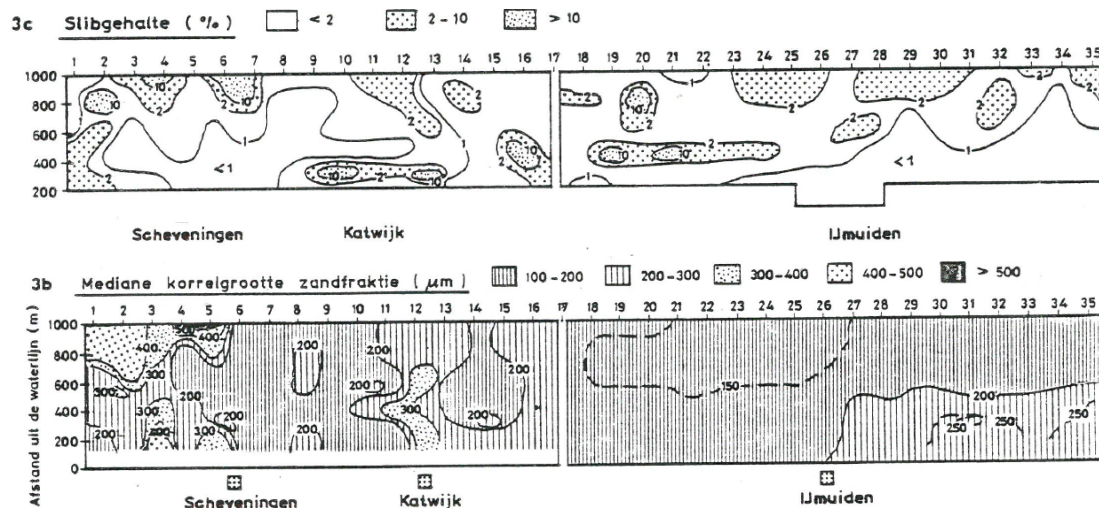
dat de dichtheid van de metingen bij Van Straaten te laag was om een goed beeld te verkrijgen van de effecten van zandbanken op de sedimentsamenstelling.

Als naar de diepere zone zeewaarts van de brekerbanken wordt gekeken dan werd in het verleden ook slibbig materiaal gevonden op verschillende plaatsen langs de Nederlandse kust (Figuur 2.6). Van Alphen (1987b) geeft aan dat slibbig materiaal met name aanwezig is 1) op het centrale en noordelijk deel van de Nederlandse Noordzee (o.a. Doggersbank) en 2) bij de mondingen van Rijn, Eems en Westerschelde waar lokaal meer dan 50% van het materiaal slibbig is. Op sommige plaatsen werd slibbig materiaal gevonden (2 tot 10%), zoals op de Vlake van de Raan, kust van Zeeuws-Vlaanderen en noordelijk van de eilandkoppen van Noord-Beveland, Schouwen en Goeree (Haringvliet monding).

Bij de Hollandse kust lag het slibbige materiaal met name op Loswal Noord (tot 50%) als gevolg van het storten van gebaggerde specie uit de Nieuwe Waterweg en havens van Rotterdam (Figuur 2.6). Bij Hoek van Holland lag het zand met een fractie slib (2 tot 10%) tot dichtbij de kust. Langs de Delflandse kust zijn ook patches met licht slibbig zand (2 tot 10%) aanwezig, maar deze lagen met name buiten de brekerbank (op 8 tot 12 meter waterdiepte). Verder noordelijk is slibbig materiaal (>10%) waargenomen op de destijds erosieve kust van Katwijk én noordelijk bij de havendammen van IJmuiden (2 tot 10%; zie Figuur 2.6 en Figuur 2.7). Verwacht wordt dat het slibbige materiaal weinig invloed heeft op de stabiliteit van de kustlijn omdat het gemakkelijk wegspoelt als het zandige materiaal (waarin het zich bevindt) erodeert. Ter plaatse van Hoek van Holland is de kust op dit moment overwegend zandig. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de sterke sedimentatie die daar heeft plaats gevonden in de afgelopen decennia en het slibbige zand heeft afgedekt met nieuw zand. Of de andere kustgedeeltes nog steeds slibbig zand bevatten is niet bekend.



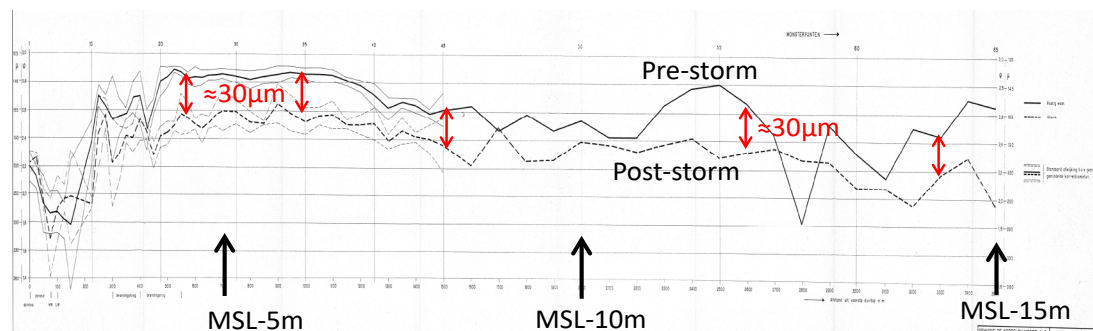
Figuur 2.6 Mate van aanwezigheid van slib in bodemsediment voor de Hollandse kust (Van Alphen, 1987b).



Figuur 2.7 Kustlangse en kustdwarse verdeling van het slijtgehalte (boven) en mediane korreldiameter (onder) van het bodem-sediment voor de kust van Ter Heijde tot aan Egmond (Van Alphen, 1987a, b).

Van Alphen (1987a) merkt op dat er veel variatie is in mediane korreldiameter op de Delflandse kust (Figuur 2.7). Dit hangt waarschijnlijk ook samen met de optredende erosie op dieper water in dit kustvak. Daardoor is niet de korreldiameter van het aangevoerde sediment bepalend, maar de eigenschap van het beschikbare sediment in de bodem (dus: wat geologisch aanwezig is in het substraat). Opvallend is verder dat de door Van Alphen (1987a) gemeten mediane korreldiameter (in Figuur 2.7) voor het gebied zeewaarts van Ter Heijde (D_{50} van ~400 μm op 1000 meter uit de kust) aanzienlijk grover is dan de in 2010 gemeten mediane korreldiameter (Huisman et al. 2016) waarin een D_{50} van ~200 μm werd gevonden. Mogelijk hebben zandsuppleties of aanvoer vanuit Loswal Noord over de afgelopen 30 jaar gezorgd voor deze verandering in korreldiameter. Echter hier moet meegewogen worden dat de analyse van Van Alphen (1987a) gemaakt is op basis van slechts 5 raaien zuidelijk van de haven van Scheveningen welke bestonden uit 4 tot 6 monsterpunten per kustdwarse raai. Hierdoor is er een aanzienlijke onzekerheid in deze resultaten uit 1987.

Van Alphen (1987a) stelt verder vast dat de destijds geobserveerde grovere sedimenten op de kustlijn samenhangen met erosie van de kust en duinen op deze plaatsen (namelijk Delflandse kust en Katwijk-Noordwijk). Hierbij veronderstelt Van Alphen dat er dus sprake moet zijn van overwegend dwarstransport, wat naar onze mening niet onderbouwd is. Het lijkt eerder gedreven door gradiënten in langstransport. Het netto transport langs de Hollandse kust is noordwaarts (Van Rijn, 1997) en sediment wordt door de langsstroom opgepikt bij de Delflandse kust die hierdoor vergroft (omdat de fijne korrels makkelijker afgevoerd worden). Katwijk is ook een gebied met erosie door golfgedreven langstransport. De onderwateroever erodeerde daar tijdens normale condities, terwijl daarna tijdens stormen erosie kon optreden van de duinen. Merk op dat er een groot verschil lijkt te zijn tussen de gemeten korreldiameters noord en zuid van raai 17, wat naar alle waarschijnlijkheid veroorzaakt is doordat de raaien 1 t/m 17 in het najaar zijn gemeten, en de raaien 17 t/m 35 in het voorjaar. Dit geeft aan het moment van monitoren een zeer grote invloed kan hebben. De resultaten uit deze analyse zijn relevant voor het begrijpen van de geschiedenis van de Delflandse kust. Verder is het opvallend dat de kustzone destijds slibbiger was dan nu, omdat er nu vrijwel geen slib meer wordt gevonden in de ondiepe kustzone van Delfland en Rijnland.



Figuur 2.8 Variatie in mediane korrelgrootte van het bodem sediment bij Katwijk (Terwindt, 1967)

2.2.3.2 Natuurlijke dynamiek in samenstelling

Bij het bepalen van de sedimentsamenstelling van een kustvak dient ook rekening gehouden te worden met de natuurlijke dynamiek. Als gevolg van stormen kan de bodem lokaal vergroven of verfijnen. Ook kan er afdekking van lagen met grover sediment plaats vinden in rustige periodes. De invloed van een storm bestaat meestal uit een vergroving van het bodemsediment van de kustzone (afvoer van fijnere fracties naar dieper water). Terwindt (1962) laat bij Katwijk een algem zien van de mediane korreldiameter van circa 30 μm na een storm (Figuur 2.8), terwijl op andere locaties zoals Duck (USA) een vergroving tot wel 100 μm bij een storm is waargenomen (Stauble & 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. Per dieptezone kan deze seizoenvariatie anders zijn. Rond de waterlijn kunnen de seizoenverschillen tot 200 μm bedragen (voor de mediane korreldiameter), terwijl er ~ 20 μm seizoenvariatie in D_{50} werd waargenomen op 8 m waterdiepte bij El Puntal (Spanje). In uitzonderlijke gevallen (bijv. bij de Zandmotor) bleek er buiten de actieve zone (i.e. dieper dan 6 m) een verfijning te kunnen optreden van de mediane korrelgrootte van 30 tot 40 μm na een storm. Als gevolg van de grote seizoenvariaties die kunnen optreden in de korrelgrootte van het sediment langs de kust, is het niet eenvoudig om vast te stellen wat de samenstelling is van de kust. Eigenlijk zou dit op meerdere momenten in een jaar gemeten moeten worden. De seizoenvariatie in de sedimentsamenstelling van de kustlijn geeft een perspectief op de relevantie van eventuele veranderingen in bodemsamenstelling die door suppleties worden veroorzaakt. Blijkbaar kan het natuurlijk systeem deze aanzienlijke kortetermijnvariaties verdragen. Er kan qua impact van suppleren gekeken worden naar 1) variaties die groter zijn dan deze natuurlijke seizoenseffecten en 2) de structurele veranderingen van het hele kustvak (verschuiving transect-gemiddelde korrelgrootte).

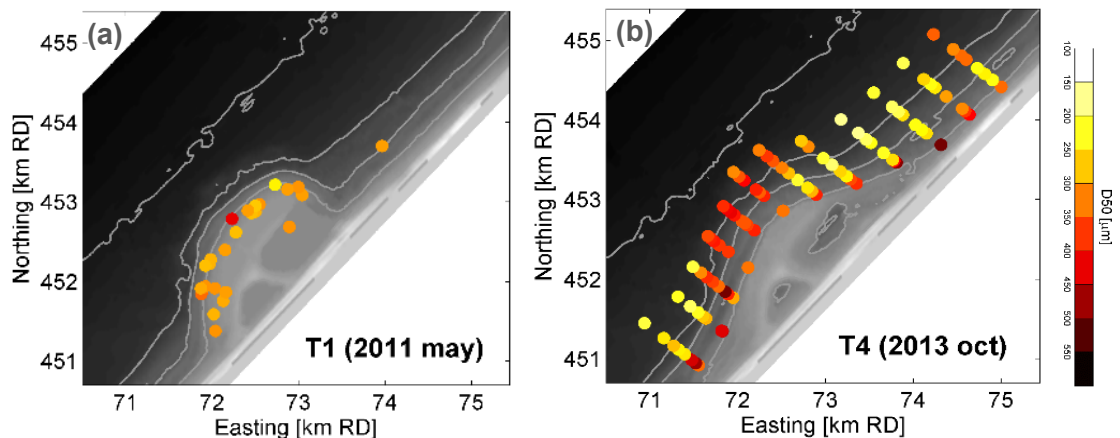
2.2.3.3 Effect Zandmotor

Als gevolg van aanleg van de Zandmotor is de sedimentsamenstelling tussen Ter Heijde en Kijkduin sinds 2011 aanzienlijk veranderd. Het zand dat gebruikt is voor de aanleg van de Zandmotor heeft een gemiddelde mediane korreldiameter van 278 μm (Huisman et al., 2016). Echter door sortering van zand is de sedimentsamenstelling op de vooroever bij de Zandmotor na aanleg van de Zandmotor in 2011 lokaal tot meer dan 200 μm grover dan het natuurlijke materiaal (Figuur 2.9). Aan de noord- en zuidzijde van de Zandmotor vond daarentegen juist depositie plaats van relatief fijn zand en silt, waardoor de mediane korreldiameter daar op dieper water gemiddeld circa 50 μm fijner is. Verwacht wordt dat de hier beschreven effecten van de suppleties op de bodemsamenstelling relevant zijn tijdens de levensduur van de Zandmotor (i.e. enkele tientallen jaren).

Zoals bij alle suppleties, zal op langere tijdschaal het suppletiemateriaal zich voegen naar de forcering (Richmond & Sallenger, 1984). Guillen & Hoekstra (1996) laten zien dat sedimentkorrels van een mengsel de neiging hebben zich te verspreiden naar de diepte waar

ze 'thuis horen' (i.e. waar er een balans is tussen zeewaarts en kustwaarts transport). Grovere sedimentkorrels zullen zich van de diepere vooroever kustwaarts verplaatsen richting de brandingszone en het strand (Richmond & Sallenger, 1984), wat een vergroving kan veroorzaken in de brandingszone. Op termijn verdeelt het zand zich over de dieptecontouren afhankelijk van de samenstelling, waardoor er een natuurlijk zeewaartse verfijning van het sediment ontstaat (Eisma, 1968).

Overigens wordt verwacht dat de verandering in bodemsamenstelling bij de Zandmotor aanzienlijk groter is dan bij vooroeversuppleties. Bij vooroeversuppleties is vooral de invloed van het lokaal gestorte materiaal van belang en in mindere mate de effecten op de omgeving als gevolg van een mogelijke verandering van de getijstrooming (De Bakker & Huisman, 2019). Op basis van de beschikbare gegevens kan niet vastgesteld worden of er een verfijning of vergroving van de mediane korreldiameter heeft plaats gevonden voor de Delflandse kust in de afgelopen decennia. Ter plaatse van de Zandmotor is een duidelijke vergroving te zien en daarmee samenhangend een verfijning op de vooroever die direct noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor ligt (Huisman et al., 2018a). De Zandmotor is echter uniek qua omvang en invloed op de getijstrooming. Door De Bakker & Huisman (2019) is vastgesteld dat vooroeversuppleties een duidelijk minder grote impact hebben op de bodemsamenstelling dan de Zandmotor, omdat de vooroeversuppleties zich in een ondiepere, meer golf-gedomineerde, zone bevinden. Op de locatie waar de vooroeversuppletie wordt geplaatst is vanzelfsprekend wel sprake van een directe impact door de bedekking met het nieuwe sediment.

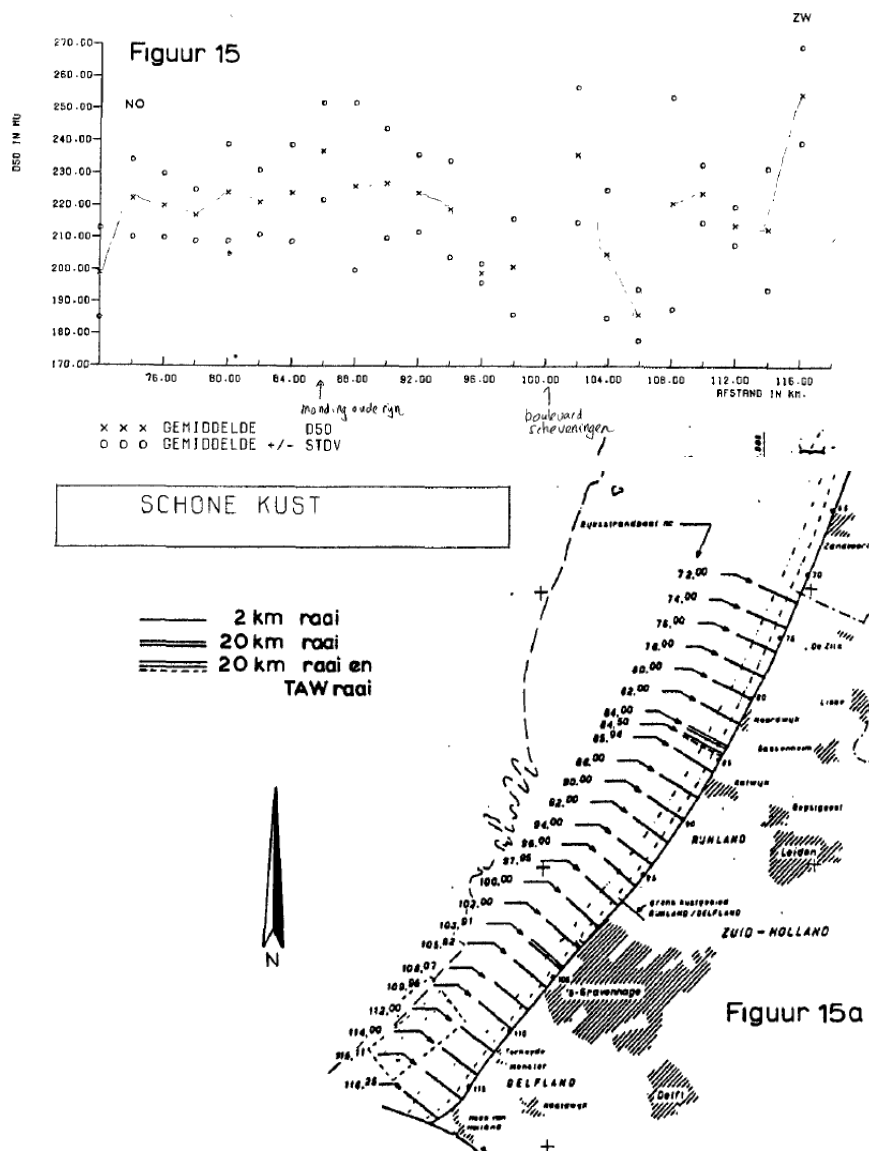


Figuur 2.9 Gemeten mediane korreldiameter (D_{50} in μm) tijdens (links) en na (rechts) aanleg van de Zandmotor op de Delflandse kust in 2011 en 2013 (Huisman et al. 2016)

2.2.4

Sedimentsamenstelling van de duinen van de Hollandse kust

Ook in de duinen is er kustlangse variatie van het sediment. Ter plaatse van Katwijk is het duinzand relatief grover dan op de omliggende kust (Kohsiek, 1985), omdat hier vroeger de Oude Rijn uitmondde in de zee. Naar het noorden en zuiden van Katwijk neemt zowel de korrelgrootte als de standaarddeviatie van de mediane korrelgrootte van duinzand af (Figuur 2.10). Door Kohsiek (1985) wordt opgemerkt dat de korrelgrootte van duinzand lokaal ook erg kan verschillen als gevolg van duinsuppleties. In het algemeen is sprake van relatief fijn sediment met een korrelgrootte (D_{50}) van $\sim 220 \mu\text{m}$ met een variatie van $\pm 40 \mu\text{m}$. Grover materiaal wordt gevonden op plaatsen waar een duinsuppletie heeft plaatsgevonden, wat veelal te maken heeft met het van zee afkomstige zand dat daar gesuppleerd is. Er zijn geen aanwijzingen dat de sedimentsamenstelling in de duinen op dit moment afwijkt van de metingen van Kohsiek (1985).



Figuur 2.10 Mediane korrelgrootte van duinzand langs de Zuid-Hollandse kust (Kohsiek, 1985)

2.3 Inventarisatie invloedfactoren op bodemsamenstelling

Deze paragraaf gaat in op de factoren die van invloed zijn op de gemiddelde korrelgrootte en de ruimtelijke verdeling (de natuurlijke toestand is zeewaartse verfijning) van het bodemsediment. Figuur 2.11 geeft een schematisch overzicht van relevante deelgebieden en processen. De factoren zijn:

I. Herverdelen van sediment door natuurlijk transport langs en richting de kust

De diepere vooroever van de Delflandse kust (tussen MSL-6 m en MSL-14 m) verdiept door de tijd heen waardoor de sedimentsamenstelling hier vergroft. In de afgelopen millenia heeft kustdwars transport sterk bijgedragen aan dit proces, waardoor ook de duinen langs de Hollandse kust zijn gevormd. Echter deze duinvorming is nu aanzienlijk minder groot dan dat deze enkele duizenden jaren geleden was. Tegelijkertijd is ook bekend dat er op de vooroever een getijgedreven noordwaarts transport is dat ook zou kunnen bijdragen aan de erosie van met name de diepere vooroever (zie §2.3.1).

II. Verandering van de aanvoer van sediment

Een verandering in de aanvoer van sediment kan invloed hebben op de kust. Gedacht kan worden aan de erosie van de duinen die zorgt voor een aanvoer van fijn zand naar de brandingszone. Verwacht wordt dat dit sterk is afgenomen. De aanvoer van sediment vanaf de monding van de rivieren en estuaria (Nieuwe Waterweg en Haringvliet) is ook afgenomen in de 20^e eeuw. Wel wordt er gebaggerd materiaal aangevoerd naar de stortlocaties op de vooroever van de kust (o.a. Loswal Noord) die een belangrijke bron kunnen zijn voor (fijner) riviersediment. Dit wordt behandeld in §2.3.2.

III. Invloed van toevoegen van suppletiezand aan de kustzone

Verwacht wordt dat er sprake is van een directe invloed op de lokale bodemsedimentsamenstelling als er wordt gesuppleerd met een andere korrelgrootte dan wat voorkomt op de desbetreffende locatie. Naast de lokale invloed wordt dit nieuwe sediment (met mogelijk andere eigenschappen) op termijn gemengd met het bestaande kustsediment in de actieve zone van de kust. Ook de steilheid van het kustprofiel kan hierdoor veranderen. Dit wordt behandeld in §2.3.3.

IV. Versterkte hydrodynamische forcering bij constructies of suppleties

Ter plaatse van grootschalige constructies en/of suppleties kunnen de stromingscondities zodanig wijzigen dat 1) erosie optreedt zeewaarts van de kustmaatregel en 2) fijner zand getransporteerd wordt naar omliggende kustgedeeltes met rustiger condities. Door constructies kan ook een luw gebied ontstaan wat fijner zand 'onttrekt' aan de omgeving, zoals bijvoorbeeld in de kustzone direct noordelijk van de dammen bij Hoek van Holland. Het effect van deze verandering is een regionale herverdeling van zand én meer ruimtelijke variatie in de sedimentsamenstelling. Dit wordt behandeld in §2.3.4.



Figuur 2.11 Schematisch overzicht van relevante deelgebieden en processen.

2.3.1 Herverdelen van sediment op de vooroever

De erosie die over de afgelopen 50 jaar is waargenomen op de ondiepe vooroever van de Delflandse kust (Figuur 2.1) hangt samen met natuurlijk landwaarts transport van sediment van de vooroever naar de ondiepe kustzone én een netto noordwaarts gericht getijdengedreven transport (Huisman et al., 2018b).

2.3.1.1 Kustwaarts transport

Na het ontstaan van de Noordzee (sinds ~5000 V.C) was landwaarts transport van zand een belangrijke oorzaak van verdere verdieping van de zeebodem en van het ontstaan van de Hollandse duinen (naast de bijdrage van rivierdelta's van de Oude Rijn). Grover zand wordt later gemobiliseerd dan fijn zand, wat geresulteerd heeft in een vergroving van de zeebodem op de vooroever. Het fijnere zand (D_{50} van ~150 μm) werd over het strand naar de duinen

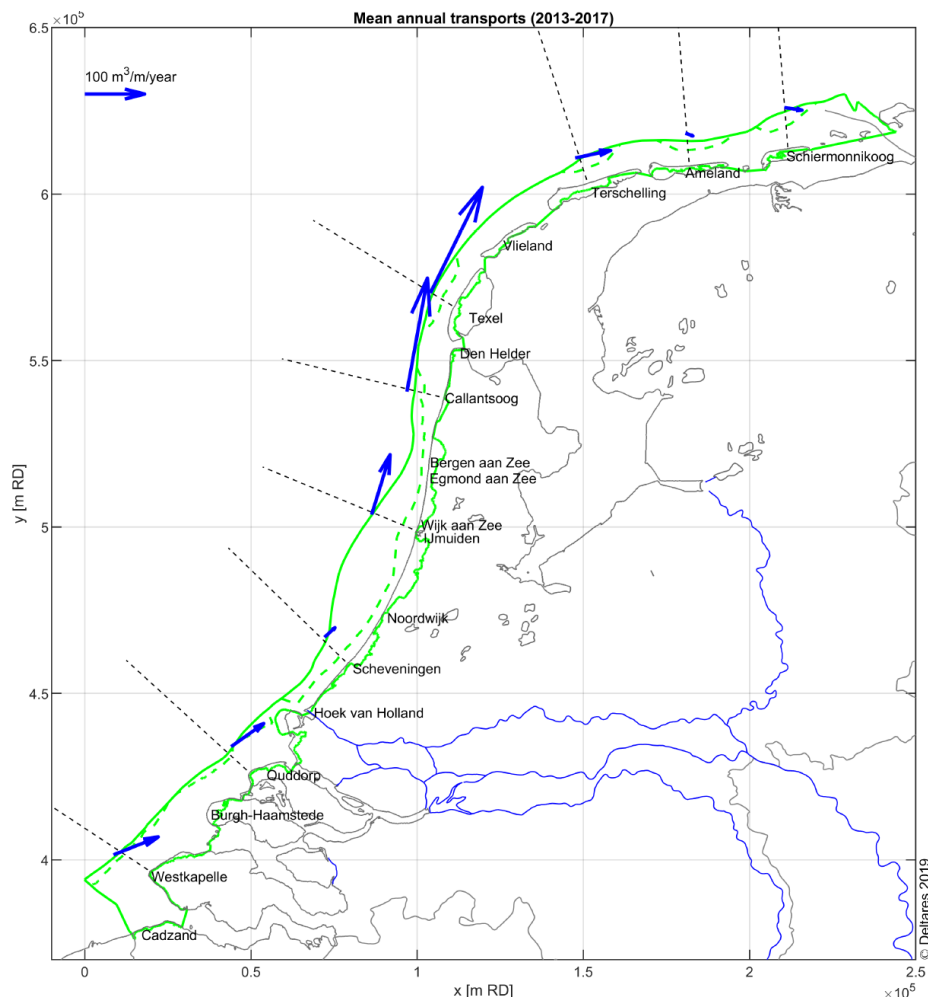
getransporteerd, waardoor alleen het middelgrove en grovere sediment overbleef in de kustzone.

Het proces van verdieping van de zeebodem én kustwaarts transport is naar verwachting nog steeds (in enige mate) aanwezig, maar leidt niet meer tot significante kust- en duingroei. Het zand dat landwaarts wordt verplaatst in ondiep water, wordt namelijk in noordwaartse richting meegenomen door golfgedreven stromingen én (in mindere mate) ook over het strand naar de duinen getransporteerd. De verwachting is dat er nog enige erosie kan plaatsvinden van de vooroever door kustdwars transport, maar dat het effect van het kustwaarts gerichte transport niet waarneembaar zal zijn in de ondiepe kustzone.

2.3.1.2 Noordwaarts getij- en golfgedreven transport

Noordwaarts gericht kustlangs transport kan ook bijdragen aan verandering van de bodemsamenstelling van de kust, aangezien over het algemeen een groter deel van de fijnere zandfractie van het bodemsediment wordt meegenomen dan van de grovere korrels (Huisman et al., 2018a). In Grasmeijer et al. (2021) is een berekening gedaan van het netto noordwaarts transport (Figuur 2.12): voor de diepe vooroever van het kustvak tussen Scheveningen en Wijk aan Zee is een verschil in transport van circa 80 m³/m/jaar berekend, wat neerkomt op een erosie van circa 2 mm/jaar of circa 1 à 2 miljoen m³ uit het kustvak Rijnland. Zuidelijk van Scheveningen kan op basis van deze berekeningen geen kustlangs toenemend transport (dat erosie kan veroorzaken) worden vastgesteld, omdat de aanvoer vanuit het zuiden (langs de havendammen van de Nieuwe Waterweg) niet berekend is. Het noordwaarts transport bij Scheveningen is circa 30 m³/m/jaar, wat over een kustdwarse breedte van 10 km ongeveer overeenkomt met 300.000 m³/jaar. In het meest extreme geval, indien verondersteld wordt dat er geen aanvoer is vanuit het zuiden naar de Delflandse kust, zou er op de diepe vooroever van de Delflandse kust gemiddeld maximaal 2 mm/jaar erosie kunnen plaatsvinden als gevolg van alleen het getijgedreven langtransport. Lokaal kan de erosie natuurlijk groter of kleiner zijn dan het berekende gebiedsgemiddelde.

Op basis van het voorafgaande is de aanname dat, onafhankelijk van de oorzaak (kustlangs of kustdwars transport), er een vergroving van het bodemsediment is opgetreden door de erosie van de vooroever van Delfland (Figuur 2.1), omdat de fijnere sedimentfracties ook bij kustlangtransport sneller eroderen dan de grovere sedimentfracties. Deze vergroving vindt van nature ook plaats op de Nederlandse kust als gevolg van zowel het selectieve transport van fijner zand naar de duinen als ook door de getijstrooming naar het noorden. Echter in het verleden was er mogelijk nog aanvoer van fijner zand uit de rivieren, wat nu zeker niet meer het geval is.



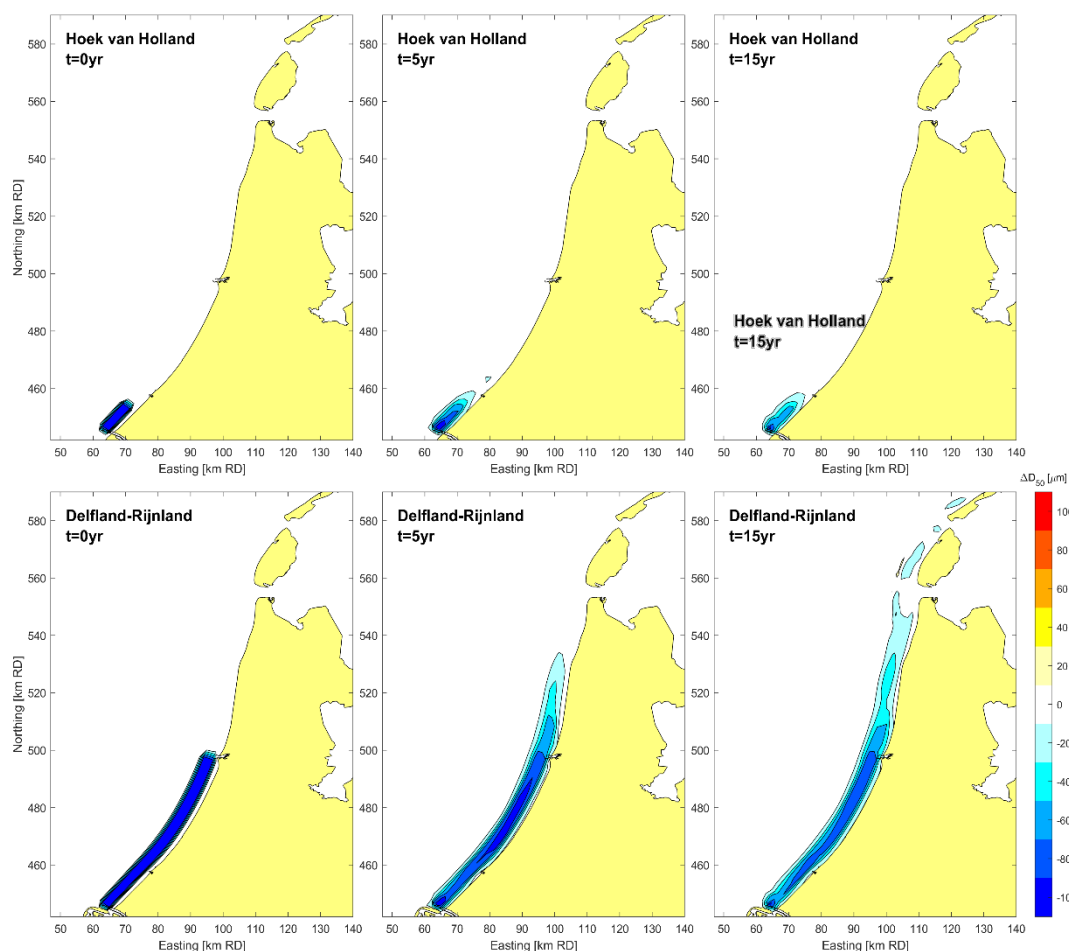
Figuur 2.12 Berekende netto transporten op de vooroever van de Nederlandse kust (Grasmeijer et al., 2021)

2.3.1.3 Verspreiding van het geërodeerde fijne zand in de diepe vooroever

Om een indicatie te krijgen van de snelheid waarmee bodemveranderingen op de vooroever kunnen optreden én hoe het zand zich verspreidt, is een modelanalyse uitgevoerd waarin sediment met een fijnere samenstelling (D_{50} van 150 μm) is toegepast in twee gebieden op de diepe vooroever (Figuur 2.13). De berekening is gedaan met het kuststrook-model (Delft3D) met golven en getijstrooming (zie Bijlage C). Met dit model zijn berekeningen gemaakt van de verandering in de mediane korreldeiameter van het bodemsediment ten opzichte van een situatie waarin overal hetzelfde sediment ligt. Relevante instellingen (zoals dikte van de transportlaag en sediment transportcoëfficiënten) zijn gelijk aan een eerdere gevalideerde studie voor de Zandmotor (Huisman et al., 2018a). Het model is niet geschikt voor berekeningen in de ondiepe vooroever waar de golven breken (laatste honderden meters tot aan de kustlijn).

De eerste simulatie is gedaan voor een relatief klein gebied met fijn zand voor de kust van Hoek van Holland (tot aan Ter Heijde). Dit gebied strekt zich 10 km uit langs de kust uit en beslaat kustdwars ruwweg de zone vanaf NAP-9m tot aan NAP-15m.

De tweede simulatie betreft een gebied op de diepe vooroever van de volledige Delflandse en Rijnlandse kust (op dezelfde dieptezone). Beide simulaties zijn hypothetisch en dienen als illustratie van de aanpassingstijdschaal van de bodemveranderingen als er een verandering plaatsvindt in een groot gebied (vele km^2).



Figuur 2.13 Berekende relatieve verandering van de mediane korreldiameter (D_{50}) van de toplaag van het sediment in de diepe vooroever als gevolg van het plaatsen van fijn zand (D_{50} van $150\ \mu\text{m}$) voor een gebied bij Hoek van Holland en voor de gehele Delflandse-Rijnlandse kust voor de initiële situatie, na 5 jaar en 15 jaar.

De tests laten zien dat zand zich hoofdzakelijk noordwaarts verplaatst op de diepe vooroever van de Nederlandse kust (Figuur 2.13). Met name voor de tweede simulatie (met fijn zand langs de hele Delflandse en Rijnlandse kust) is dit duidelijk te zien. Ook wordt de samenstelling van de bodem in deze gebieden door de tijd heen weer steeds meer vergelijkbaar met de oorspronkelijke samenstelling (i.e. 'minder donkerblauwe kleur'). In feite wordt de toplaag langzaam gemengd met het omgevingszand.

Op basis van deze modelberekening wordt geconcludeerd dat het voor grotere gebieden (meerdere km^2) minimaal enkele decennia kan duren (~40 jaar voor de Delflandse-Rijnlandse kust) voordat de bodemsamenstelling weer vergelijkbaar wordt met de omgeving. Het kost ook tientallen jaren voordat fijner zand langs de kust naar het Marsdiep afgevoerd is. Fijn zand dat langs de Delflandse kust erodeert zal nog tientallen jaren invloed hebben op noordelijker gelegen raaien van de Hollandse kust.

2.3.2 Wijziging in de aanvoer van sediment

Een afnemende aanvoer van sediment kan erosie veroorzaken op de kust. Dit leidt meestal tot vergroving van het bodemsediment. Zo'n afname van de aanvoer kan optreden als de aanvoer van sediment vanuit de Rijn-Maas monding verandert (Nieuwe Waterweg). Daarnaast kan de aanvoer van fijn zand vanuit de duinen naar de kustzone en vooroever veranderen. De

hypothese is dat deze afneemt omdat versterkingen van de kustlijn er voor zorgen dat er minder duinerosie plaatsvindt.

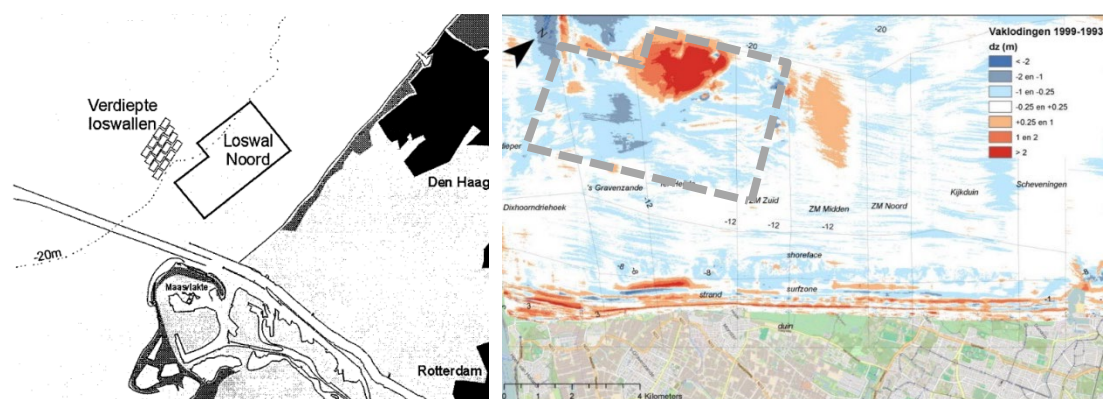
Verandering in sedimentsamenstelling kan bij gelijkblijvend aanvoervolume ook optreden als de samenstelling van het aangevoerde sediment verandert.

2.3.2.1 Verandering in aanvoer van sediment door de Nieuwe Maas

Naar verwachting is de natuurlijke aanvoer van sediment door de rivier (naar het kuststelsel) afgenomen in de afgelopen decennia als gevolg van de verdieping van de Nieuwe Waterweg, die in stand wordt gehouden door baggerwerk. Ook is er in het bovenstroomse deel van de Nederlandse Rijn sprake van een langetermijntrend van verdieping en vergroving van de bodem. Waarschijnlijk is de natuurlijke aanvoer van zandig sediment op dit moment bijna nihil, terwijl de aanvoer van slib niet is veranderd. Als gevolg van erosie zeewaarts van de havendammen zal er wel zandig materiaal aangevoerd worden naar de Delflandse kust. Door de tijd heen wordt de “zandbuffer” zeewaarts van de haventoeegang daarom geleidelijk aan kleiner en (beperkt) grover. Overigens zal dit een langzaam proces zijn omdat de getijstrooming zand zal aanvoeren (en mixen) uit omliggende gebieden (dus Voorne en Delflandse kust).

Indirect levert de Nieuwe Waterweg nog wel sediment aan de kustzone, aangezien een groot deel van de (wat schonere) baggerspecie gestort wordt op Loswal Noord (Figuur 2.14). Jaarlijks worden hier enkele miljoenen kubieke meters baggerspecie geplaatst (Projectgroep MER Loswal Noord, 1995). De bijdrage van resuspensie van fijn zand en slib aan de sedimentsamenstelling van de ondiepe vooroever is in het kader van deze studie niet onderzocht, maar zou aanknopingspunten kunnen bieden voor beter begrip van het sedimenttransport op de diepe vooroever.

Op basis van expert-beoordeling wordt aangenomen dat Loswal Noord van belang is voor de diepere vooroever (onder NAP -10m), maar te ver van de kust ligt om een wezenlijke invloed te hebben op de ondiepe kustzone.



Figuur 2.14 Locatie van Loswal Noord (linker paneel; Van den Brunt, 2000) en bodemhoogte verandering voor de periode 1993 tot 1999 op Loswal Noord (rechter paneel; Huisman et al., 2018b). Rood en blauw geven respectievelijk een aanzanding of erosie, de grijze stippellijn geeft indicatief de begrenzing weer.

2.3.2.2 Verandering in de aanvoer van fijn duinzand

De suppletie bij Terschelling in 1993 (Guillen & Hoekstra, 1996) heeft laten zien dat fijner sediment, zoals het duinsediment dat beschikbaar komt als er stormerosie optreedt, zich (voor een kust zonder langstransportgradiënt) naar de diepwaterzone verplaatst waar de condities zo zijn dat het daar vastgehouden kan worden.

Een schatting kan inzicht geven in de ordegrrootte van mogelijke invloed van duinerosie op de vooroever van de Delflandse kust. Om de bovengrens te schatten wordt verondersteld dat het duinzand niet meegenomen wordt door de golfgedreven stroming. Bekend is dat de duinen van de Delflandse kust in de periode voorafgaande aan de kustlijnsuppleties (vóór 1990) met circa 0.5 tot 1 meter per jaar erodeerden. In theorie is er dan een aanvoer van relatief fijn duinzand (D_{50} van $\sim 150 \mu\text{m}$) naar de vooroever waar het zand een D_{50} van $200 \mu\text{m}$ heeft. Uitgaande van een hoogteverschil van 12 meter van de duinvoet tot duintop, komt dit overeen met 100.000 tot 200.000 m^3/jaar voor de Delflandse kust. Als dit zand zich verspreidt (tijdens stormen) over een kustdwarse zone van circa 2 km (ruwweg tot de NAP-14 m dieptelijn) is er een aanzanding van fijn sediment van 3 tot 6 mm per jaar over het ondiepwater kustprofiel. Bij een veronderstelde actieve dikte van de bodem van 50 cm (over langere termijn) kan dit de mediane korreldiameter in dit gebied jaarlijks ten hoogste 0.3 tot $0.6 \mu\text{m}$ fijner maken. Afwezigheid van deze jaarlijkse aanvoer van fijn zand zou daarom op termijn kunnen zorgen voor een lichte vergroving van de bodem (of beperktere verfijning).

Deze schatting van maximaal $0.6 \mu\text{m}$ verfijning per jaar is een bovengrens. In de praktijk zal de invloed van het duinzand aanzienlijk kleiner zal zijn omdat 1) een aanzienlijk deel van dit fijnere sediment meegenomen zal worden door de golfgedreven langsstroming in noordwaartse richting, 2) de golven en 'onderstromingen' tijdens stormen mogelijk zo sterk zijn dat zand verder zeewaarts verspreid zal worden over een groter gebied dan de eerste 2 km kustzone), 3) zand door getijdestroming over een groter kustlangs gebied wordt verspreid.

Het ligt daarom niet voor de hand dat dit proces opweegt tegen andere aspecten zoals afvoer van het fijne sediment door langstransport. Er wordt slechts een heel beperkte invloed verwacht van de aanvoer van fijn zand uit de duinen op de korrelgrootte in de vooroever van de Delflandse kust. Ook voor de Rijnlandse en Noord-Hollandse kust wordt een vergelijkbaar klein effect verwacht.

2.3.3 Invloed van het toevoegen van suppletiezand aan de kustzone

2.3.3.1 Verwachte mate van vergroving ter plaatse van de suppleties

Het suppleren van zand kan lokaal op de stortlocatie zorgen voor een verandering van de bodemsamenstelling. Het suppletiezand is meestal iets grover is dan het natuurlijke zand op de kust. Zand moet aangevoerd worden vanuit de wingebieden op zee (i.e. op 10 tot 50 km zeewaarts van de kust) waar meestal geen zand met exact de juiste samenstelling gevonden kan worden. Voor de Zandmotor werd bijvoorbeeld zand met een gemiddelde mediane korreldiameter van $278 \mu\text{m}$ gebruikt (Huisman et al, 2016) wat overeenkomt met zand in de brandingszone maar iets grover is dan het zand in de rest van het profiel. De D_{50} van vooroeversuppleties wordt geschat op $250 \mu\text{m}$ (o.a. Egmond '99 en Bergen '00; Van Duin et al., 2004; Huisman et al., 2019). Incidenteel was de korrelgrootte aanzienlijk grover, zoals voor Noordwijk'98 waar de $D_{50} \sim 400 \mu\text{m}$ was (Ojeda et al., 2008). Geschat wordt dat het kustprofiel van de ondiepe kustzone (tot NAP -10m) een gemiddelde D_{50} heeft van $\sim 250 \mu\text{m}$ zoals te zien in Figuur 2.2 voor het deel dieper dan 5 meter waterdiepte (zie ook Wijsman et al. 2015; Huisman et al., 2016). Het verschil in korreldiameter tussen gesuppleerd zand en het gemiddelde zand in de kustzone is belangrijk voor het inschatten van de invloed van suppleties. De grootste onzekerheid bij de inschatting van dit verschil zit in de beschikbare data over samenstelling van de suppleties.

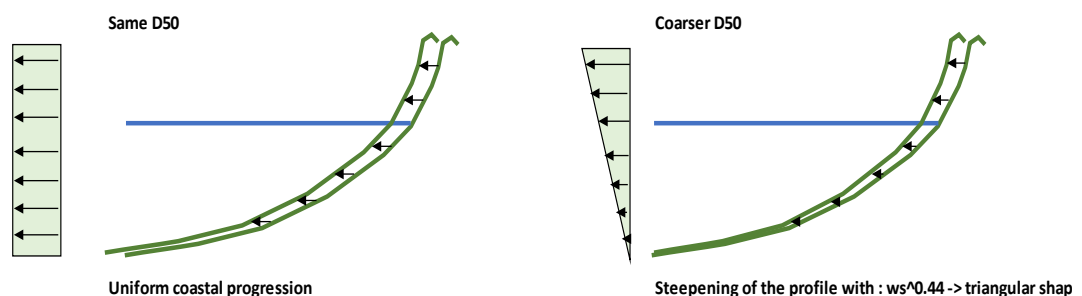
Op de stortlocatie zal de invloed op bodemsamenstelling tenminste even lang zijn als de levensduur van de suppletie. De levensduur van strandsuppleties is één tot vier jaar, voor

vooroeversuppleties is dit drie tot zes jaar, terwijl een grootschalige suppletie zoals de Zandmotor enkele tientallen jaren kan blijven liggen. Over de levensduur van de suppletie zal het effect op de lokale sedimentsamenstelling (in het gebied waar de suppletie is geplaatst) geleidelijk afnemen (zie ook de verandering bij de Zandmotor; Huisman et al., 2016).

2.3.3.2 Invloed van suppletiezand op de sedimentsamenstelling van de gehele kustzone

Hier maken we een inschatting van de invloed van het suppletiezand op de sedimentsamenstelling van het hele kustvak. De aanname is dat sediment op middellange termijn (~10 jaar) gemengd zal worden met het 'actieve sediment' van de kustzone; het actieve gebied waarin deze menging plaatsvindt strekt zich uit van de waterlijn tot aan 10 meter waterdiepte, aangezien dit het gebied is waar sedimentverplaatsingen (en bankontwikkeling) prominent aanwezig zijn. Dit betreft een zone van circa 1 km breed. Op lange termijn (decennia) zullen er mechanismes zijn die het sediment verder van de kust af zullen verspreiden, echter op diep water (>NAP-10m) zal de tijdschaal groot zijn ten opzichte van de mate van aanvoer van suppletiezand. Afhankelijk van de waterdiepte zal in het 'actieve deel' van de kust tot 10 m waterdiepte een menging van 20 cm tot 2 m diepte optreden (Oost et al., 2019). Uitgaande van een gemiddelde van 50 cm zou er een totaal buffervolume voor de ondiepe Hollandse kust (met een lengte van 118.5 km) zijn van ongeveer 60 miljoen kubieke meter.

De gemiddelde korreldiameter van het kustprofiel verandert, omdat suppletiezand mengt met de actieve laag van het kustprofiel. Een aanvullende complexiteit daarbij is dat het sediment zich niet homogeen zal mengen over het beschouwde kustdwarse profiel. De grovere sedimentkorrels van het gesuppleerde zand zullen vooral aanzanden in ondiep water (volgens de evenwichtskorrelgrootte verdeling van Guillen & Hoekstra (1996). Als gevolg van het toevoegen van zand zal het profiel dus niet alleen vooruitschuiven, maar kan het ook steiler worden als er relatief grof zand wordt aangebracht. De natuurlijke processen zorgen voor de verdeling van de korrels, want als het bodemsediment grover wordt (door het suppletiezand) zal er ook netto meer landwaarts gericht kustdwars transport zijn van de grovere sedimentkorrels, totdat een nieuw evenwicht ontstaat met de profielvorm. Er kan van uit worden gegaan dat de respons van de ondiepe kustzone zal bestaan uit een combinatie van zeewaarts schuiven van het kustprofiel én een versteiling van het profiel (Figuur 2.15). Het resultaat hiervan is dat er door deze versteiling van het profiel uiteindelijk netto een minder grote verandering van de gemiddelde korreldiameter van het kustprofiel optreedt dan verwacht kon worden als het suppletiezand zich gelijkmatig over het profiel zou verdelen.



Figuur 2.15 Principes voor de respons van het kustprofiel op het toevoegen van sediment. Links: zeewaarts schuiven van het profiel. Rechts: versteiling van de profielvorm als gevolg van vergroving van de sedimentsamenstelling van de bodem als gevolg van suppletiezand (rechts).

De versteiling van het profiel kan worden geschat op basis van de formulering voor de evenwichtsprofielvorm van de kust (o.a. Vellinga, 1984 en Dean, 1987):

$$d = Ax^m \quad [\text{eq. 1}]$$

$$A = 0.067w^{0.44} \quad [\text{eq. 2}]$$

waarin d de waterdiepte is [m], x de kustdwarse afstand [m], w de valsnelheid van een korrel in water [m/s] en A en m de profielvorm parameters. Voor de Hollandse kust situatie (i.e. profiel en sediment) wordt de steilheid van het profiel ongeveer 0.2% groter per 1 μm vergroving van de D50. Op 5 meter waterdiepte komt dit overeen met een verondieping van circa 1 cm per 1 μm gemiddelde vergroving van de mediane korreldiameter van de bodem (i.e. van het actieve deel van het bodemsediment). Deze veranderingen zijn niet bijzonder groot als ze vergeleken worden met normale veranderingen in bodemhoogte door langstransport gradiënten, bodemvormen en/of seizoenvariatie in profielvorm (zomer/winter), en daarom moeilijk te meten. Desalniettemin zijn dergelijke veranderingen wel structureel voor het hele gesuppleerde kustvak, en kan er daardoor op de lange termijn wel een invloed zijn op de profielvorm.

De invloed van het jaarlijks op de Hollandse kust suppleren van 1 tot 3 miljoen m^3/jaar (i.e. benodigd suppletievolume voor het vasthouden van de BKL in ondiep water) wordt voor een gemiddelde D50 van 250 tot 300 μm (i.e. 0 tot 50 μm grover sediment ten opzichte van de korrelgrootte van 250 μm van het gewone zand) geschat op 0 tot +1.2 μm per jaar, met een beste schatting van +0.4 μm per jaar. Hierbij is rekening gehouden met zowel het zeewaarts schuiven als de versteiling van het profiel (voor de $\sim 1\text{ km}$ brede zone tot NAP -10 m).

De gevoeligheid van de verandering in korrelgrootte door suppleren hangt niet alleen af van het volume en de korrelgrootte van het te suppleren zand, maar ook af van de breedte en diepte van het actieve kustprofiel waarover het suppletiezand gaat mengen. Mogelijk is het actieve deel van het kustprofiel groter is dan nu verondersteld; met een breedte van 1500 m en actieve laag van 1 meter dik, halveert het netto effect van de suppletie op de verandering in korrelgrootte (+0.2 $\mu\text{m}/\text{jaar}$). Bij een groter suppletievolume en gebruik van relatief grof suppletiezand kan de verandering uiteraard groter zijn.

Belangrijk punt is in alle gevallen dat de veranderingen in korrelgrootte langzaam gaan en pas op een tijdschaal van decennia merkbaar zullen worden.

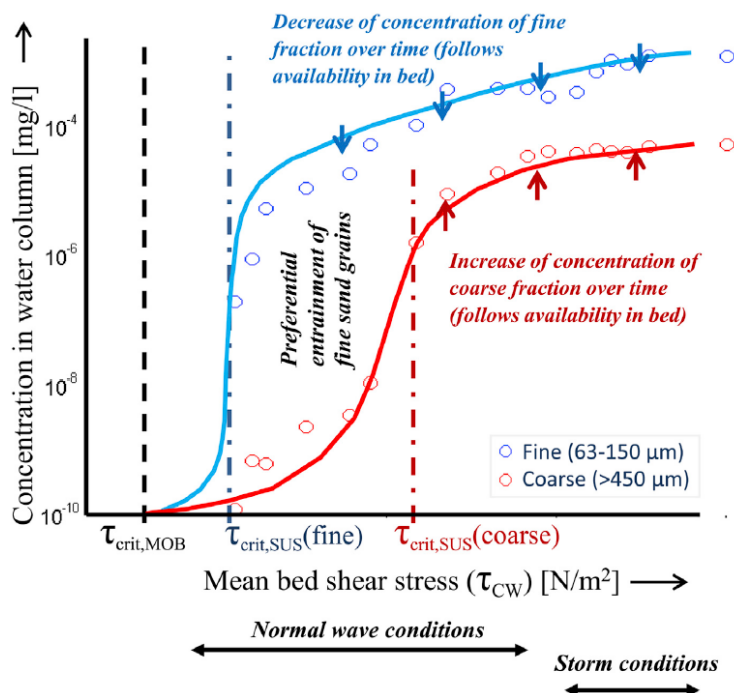
In het kort komt het erop neer dat het kuststelsel een sedimentbuffer is die er voor zorgt dat de bodemsamenstelling niet veel kan veranderen als gevolg van individuele suppleties. Maar op lange termijn is wel een verschuiving mogelijk als er structureel zou worden gesuppleerd met grover sediment dan wat op de suppletielocatie ligt. Versteiling van het kustprofiel zorgt voor een negatieve terugkoppeling op de verandering van de korrelgrootte van het bodemsediment door suppleties (waardoor deze verandering minder groot is). Een gunstig neveneffect van de versteiling van het profiel is overigens dat er minder zand nodig is om de kust bij de waterlijn (i.e. de BKL zone) vooruit te laten gaan. Hierdoor is een suppletie met grover zand effectiever in het onderhouden van de waterlijn, maar wordt er ook minder sediment geleverd aan de diepere vooroever.

2.3.4 Versterkte hydrodynamische forcering bij constructies of suppleties

Als gevolg van menselijke maatregelen kan de fysieke belasting op de bodem toenemen waardoor (lokaal) erosie en sortering van het bodemsediment zal plaats vinden. Voor de Delflandse kust zijn de aanleg van de havendammen van de Nieuwe Waterweg, landaanwinningen zoals de Maasvlakte en grootschalige suppleties zoals de Zandmotor belangrijke ingrepen geweest. Door constructies kan ook een luw gebied ontstaan waar fijner zand sedimenteert, zoals het geval is voor de kustzone direct noordelijk van de havendammen bij Hoek van Holland.

2.3.4.1 Invloed van verandering van de hydrodynamica op de sedimentsamenstelling

Zeewaarts van constructies en grootschalige suppleties kan de getijstrooming aanzienlijk toenemen. Als gevolg hiervan zal sediment makkelijker (en vaker) worden opgewoeld én meegenomen door de stroming. Een sterke toename van het transport van zandfracties treedt vooral op als de grens voor resuspensie wordt overschreden, wat eerder gebeurt voor de fijne dan voor de grove zandkorrels. In Figuur 2.16 wordt de mate van opwoeling geïllustreerd in relatie tot de bodemschuifspanning, door de concentraties van fijne en grove korrels in de waterkolom weer te geven. Vooral in het tussengebied waar de kritische schuifspanning voor de fijne korrels (blauw) is overschreden maar nog niet voor de grove korrels (rood) is er sprake van een duidelijk verschil in transport van de fijne en grove korrels. Door dit transport wordt de bodemsamenstelling grover.

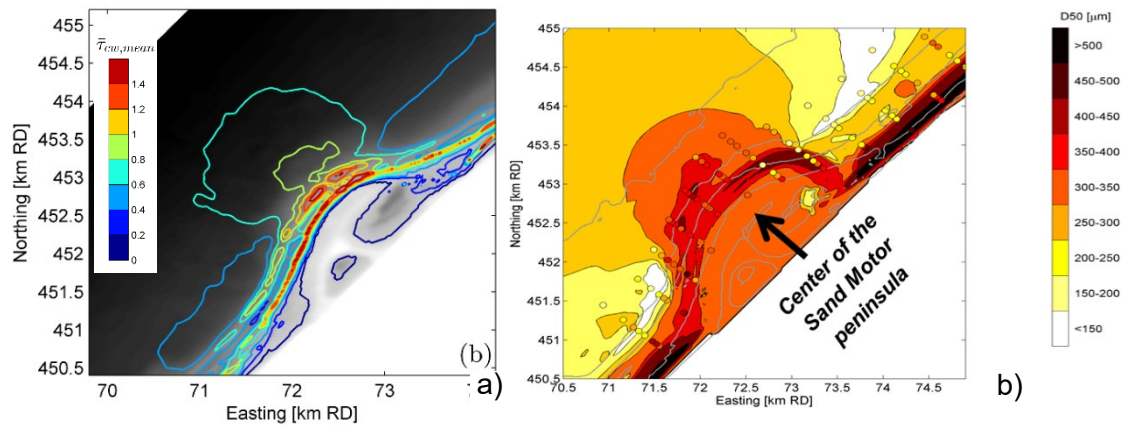


Figuur 2.16 Schematisch overzicht van het verschil in resuspensiegedrag van fijne (blauwe lijn) en grove (rode lijn) zandfracties voor gemiddelde en stormcondities. Dit betreft dieptegemiddelde sediment concentraties op een locatie op 11 meter waterdiepte direct zeewaarts van de Zandmotor (E71856m, N453237m RD).

2.3.4.2 Invloed van grootschalige suppleties op de bodemsamenstelling

Omdat grootschalige suppleties zoals de Zandmotor de hydrodynamica beïnvloeden, is er een effect op de sedimentsamenstelling. Zeewaarts van de Zandmotor is sortering van het sediment waargenomen door toegenomen getijstrooming.

In Huisman et al. (2016) wordt inzichtelijk gemaakt wat het gebied is waar bodemveranderingen te verwachten zijn. Hiervoor is de bodemschuifspanning als proxy gebruikt (Figuur 2.17). Gemeten vanaf de waterlijn van de haak van de Zandmotor is het invloedsgebied met een verhoogde bodemschuifspanning (van tenminste +0,2 N/mm²) kustdwars ongeveer 1,5 tot 2 km groot. Dat is aanzienlijk meer dan de kustdwarse breedte van de Zandmotor boven water (~ 1km). Daarmee reikt de invloed aanzienlijk verder dan het initiële gebied waarin de Zandmotor (inclusief onderwaterdeel) was geplaatst. Het invloedsgebied beslaat ongeveer ~4 km².



Figuur 2.17 Berekende gemiddelde bodemschuifspanning (τ_{mean}) voor Februari 2014 door golven en getijstrooming als gevolg van de aanleg van de Zandmotor (linkst; Huisman et al., 2016) en de berekende en gemeten mediane korreldiameter in September 2013 (rechtst; Huisman et al, 2018).

Zeewaarts van de Zandmotor is lokaal een vergroving van de mediane korreldiameter (D_{50}) tot +200 μm vastgesteld (gemiddeld +150 μm voor raaien op de kop tot 10 m waterdiepte; zie Figuur 2.17). Overigens wordt de weggespoelde fijnere sedimentfractie naar het aangrenzende kustgebied (net noordelijk en zuidelijk van de Zandmotor) getransporteerd, waar juist aanzanding plaats vindt van relatief fijn zand en silt. Noordelijk van de Zandmotor was de verandering in de D_{50} gemiddeld ongeveer -50 μm .

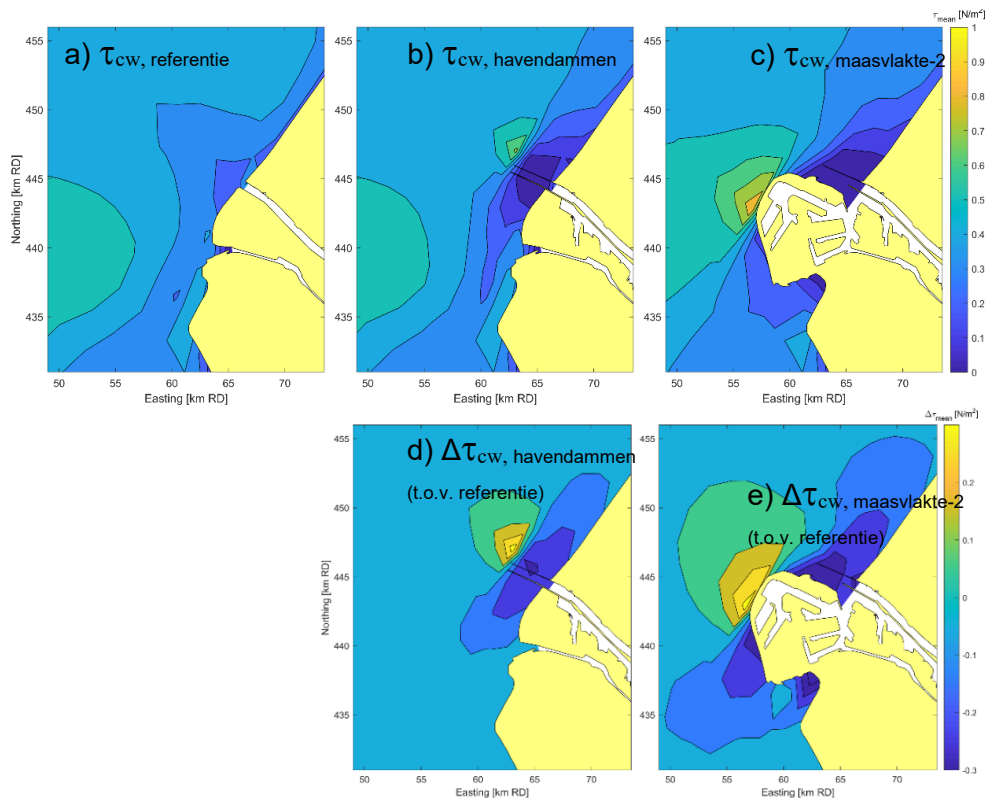
De sortering van het sediment van de Zandmotor vond volgens de metingen zeker al binnen anderhalf jaar plaats, aangezien er in februari 2013 een duidelijk patroon is ontstaan (Huisman et al., 2016). Het proces van sedimentsoortering verloopt langzamer naarmate de waterdiepte toeneemt (dus zeewaarts van NAP -10 m), omdat de opwoeling door golven minder groot is in dieper water.

2.3.4.3 Invloed van havendammen op de bodemsamenstelling

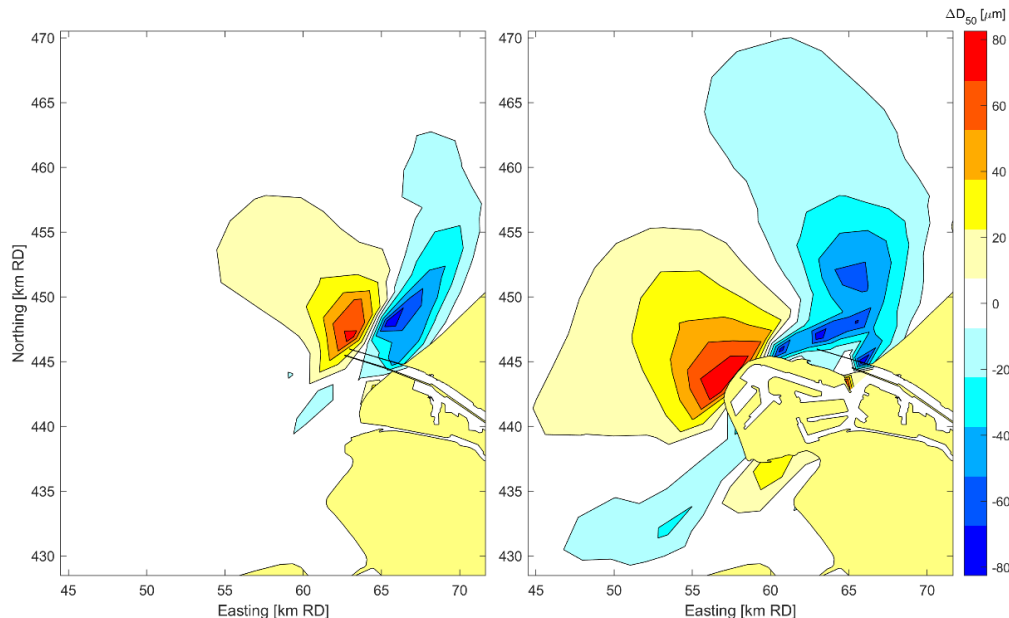
Havendammen en Maasvlakte 2 hebben tot aanzienlijk grotere verandering van de getijstrooming geleid dan de Zandmotor. Hier kijken we naar de omvang van het invloedgebied is en de mate van verandering van de bodemsamenstelling.

Als proxy voor het invloedgebied van de havendammen van de Nieuwe Waterweg en de Maasvlakte gebruiken we de relatieve invloed op de bodemschuifspanning omdat er een goede correlatie is tussen verandering in de bodemschuifspanning en verandering in de mediane korreldiameter (Huisman et al., 2016). Een berekening met getijstrooming en golven over een meerjarige periode geeft een indicatie van de invloed van de havendammen en Maasvlakte-2 op de bodemschuifspanning (Figuur 2.18 a tot c). Zeewaarts van deze constructies neemt de bodemschuifspanning toe, terwijl ten noorden en zuiden van de constructies luwe zones met afgenomen bodemschuifspanning ontstaan. Dit is het duidelijkst te zien in de relatieve verandering van de bodemschuifspanning ten opzichte van de referentiesituatie (Figuur 2.18 d, e). Duidelijk is dat de invloed van de havendammen van de Nieuwe Waterweg kleiner is dan die van Maasvlakte 2. Het invloedgebied met verhoogde bodemschuifspanning is circa 4x4 km voor de havendammen van de Nieuwe Waterweg, terwijl dit voor Maasvlakte 2 ongeveer 8x10 km groot is. Voor beide situaties is de maximale verhoging van de gemiddelde bodemschuifspanning vergelijkbaar (+/- 0,3 N/mm²).

Op de kustlijn kan duidelijk een luwtezone worden onderscheiden met verlaagde bodemschuifspanning. De luwte van de havendammen bestrijkt een gebied van Hoek van Holland tot en met Monster (circa 8 km) langs de Delflandse kust en ruim 3 km kustdwars. De luwte na aanleg van Maasvlakte 2 strekt zich uit vanaf Hoek van Holland tot aan Kijkduin (ruim 12 km).



Figuur 2.18 Berekening van de gemiddelde bodemschuifspanning ($\tau_{cw,mean}$) als gevolg van golven en stroming voor representatief getij en golfcondities ter illustratie van de invloed van havendammen en Maasvlakte 2 ten opzichte van een referentiesituatie zonder die ingrepen (bovenste figuren) en de relatieve verandering van de gemiddelde bodemschuifspanning ($\Delta\tau_{cw,mean}$) als gevolg van de aanleg van de havendammen en Maasvlakte 2 (onderste figuren).



Figuur 2.19 Berekening van de relatieve verandering van de mediane korreldiameter (D_{50}) van de toplaag van het sediment als gevolg van de aanleg van de havendammen van de Nieuwe Waterweg en Maasvlakte 2, berekend met het aangepast kuststrook model (Delft3D) met golven en getijstroming, ten opzichte van de referentiesituatie zonder de ingrepen.

Een indicatieve berekening van de verandering in sedimentsamenstelling na aanleg van de havendammen en Maasvlakte 2 laat zien dat er sprake kan zijn van een aanzienlijke verandering van de mediane korrelgrootte (voor een simulatie met uniforme initiële mediane korreldiameter van de bodem van 250 μm) (Figuur 2.19). De berekende verandering in D_{50} was ongeveer +/- 80 μm na circa 15 jaar.

De havendammen en Maasvlakte kunnen dus een grote invloed hebben op de bodemsamenstelling van de omliggende kust. Voor de vooroever van de Delflandse kust lijken de havendammen en de Maasvlakte echter vooral geleid te hebben tot een verfijning van de bodemsamenstelling. Het geërodeerde fijnere materiaal zeewaarts van de havendammen beweegt zich namelijk naar de Delflandse kust. Na verloop van tijd zal dit sediment weer meegenomen worden door de noordwaartse getijstroomingen langs de Hollandse kust. .

2.4 Conclusies

In dit hoofdstuk is ingegaan op 1) de veranderingen in de sedimentsamenstelling van de vooroever en 2) de bijdrage aan deze veranderingen door natuurlijke processen en menselijke ingrepen zoals suppleties. Doel is een inschatting te kunnen maken van de invloed van zandsuppleties op de sedimentsamenstelling in de vooroever.

De Delflandse kust is, als voorbeeldgebied, uitgebreid besproken. Op basis van beschikbare data voor de Delflandse kust kon geen langetermijnverandering van de gemiddelde korreldiameter in de vooroever worden vastgesteld. De ruimtelijke en temporele variaties in korreldiameter in de meetgegevens zijn hiervoor te groot.

Meerdere natuurlijke processen sturen de sedimentsamenstelling van de vooroever. In dit onderzoek is de wijze waarop deze processen invloed hebben verduidelijkt. En voor een aantal processen waarvoor dat mogelijk was, zijn ook inschattingen gemaakt van de bijdrage die ze kunnen hebben op de bodemsedimentsamenstelling van de kustzone. De volgende processen zijn beschouwd.

- Op de diepe vooroever van de Delflandse kust (ruwweg tussen NAP -10 en -14m) vindt erosie plaats én vergroving van de korreldiameter. Golven zorgen voor een transport in landwaartse richting vanaf diep water naar de brandingszone. De invloed van dit proces is op dit moment naar verwachting nog maar heel klein. Metingen van dit kustdwarse transport zijn echter niet beschikbaar én moeilijk te realiseren, waardoor dit moeilijk verifieerbaar is. Daarnaast zorgt de getijstrooming op de vooroever van de Delflandse kust voor kustlangtransport, van met name het fijne sediment, richting Rijnland. De grootte van het transport bij Scheveningen is ongeveer van dezelfde orde als de waargenomen verdieping van de vooroever (ongeveer 300,000 m^3/jaar). Het is dus niet duidelijk of de veranderingen op de diepere vooroever (dieper dan 10 meter) bepaald worden door het kustdwarse transport of door kustlangse getijstrooming.
- Suppletiezand zou in principe kunnen zorgen voor een geleidelijke verandering in sedimentsamenstelling. Deze invloed is vooral relevant voor de kustzone tot circa 10 meter waterdiepte, aangezien het suppletiezand meestal landwaarts beweegt. Veranderingen in bodemsamenstelling als gevolg van (langjarige) suppletieprogramma's blijken echter nog niet uit de (beperkt beschikbare) meetgegevens. Uit schattingen op basis van aannames over korrelgrootte van het suppletiezand kan worden geconcludeerd dat pas na langdurig (meerdere decennia) en structureel met grover sediment suppleren, verandering van de bodemsamenstelling voor het kuststelsel tot 10 meter waterdiepte zou kunnen optreden. In ondieper water (tot 6 m waterdiepte) is de invloed van dit grovere sediment op de bodemsamenstelling overigens veel beperkter dan in dieper water. Indien een vergroving van het sediment door suppleties zou optreden, wordt ook het kustprofiel wat steiler. Dit zorgt ervoor dat een groter deel van de grove korrels in ondiep water terecht komen, waar van nature de korrelgrootte al grover is.

- Andere processen als sedimentaanvoer vanuit rivieren en duinen, en ingrepen zoals bijvoorbeeld havendammen, hebben naar verwachting slechts geringe of alleen zeer lokale invloed op de sedimentsamenstelling.

3 Bodemdieren in de vooroever – bemonsteringen Natuurlijk Veilig 2017 en 2018

3.1 Inleiding

De brede vraagstelling van Natuurlijk Veilig is de mogelijke impact van kust- en vooroeversuppleties op de natuur langs de Nederlandse kust. Voor de vooroever is die vraagstelling toegespitst op mogelijke langetermijneffecten op bodemdieren en vissen. Voor vissen is vooral de kraamkamerfunctie van de ondiepe kustwateren van belang. Die kraamkamerfunctie is gerelateerd aan de bodemdierfauna, omdat de juveniele vissen predatoren zijn op bodemdieren. De vraagstelling is in detail uitgewerkt in Herman et al. (2016), waarnaar wordt verwezen voor details.

De ondiepe kustzone, en vooral de brandingszone, is een zeer moeilijk te bemonsteren omgeving. Stabiele grotere schepen met een zekere diepgang kunnen dit gebied niet bevaren, en het uitvoeren van bemonstering vanaf kleine rubberboten is geen sinecure in de branding. Alleen de getijdenzone, die vanaf het strand kan worden bemonsterd, is redelijk goed toegankelijk. In overeenstemming hiermee is het aantal gegevens over de Nederlandse ondiepe kustzone beperkt. Voor bodemdieren zijn een aantal intensieve campagnes met veel monsters beschikbaar, maar deze bestrijken slechts een beperkt gebied. De belangrijkste datasets zijn de bemonsteringen in het kader van “Ecologisch Gericht Suppleren” in Ameland en Schiermonnikoog (Holzhauer et al., 2009, 2020) en de bemonsteringen van de Zandmotor (Wijsman et al., 2015; Herman et al., 2021). Daarnaast zijn enkele historische datasets beschikbaar, maar deze zijn meestal projectgebonden, bestrijken een klein gebied in zeer verschillende periodes en dekken zelden de gehele vooroever tussen 0 en 10m diepte. Daarom zijn in het kader van Natuurlijk Veilig veldcampagnes uitgevoerd die tot doel hadden om binnen een beperkte periode de achtergrondtoestand van de kust te karakteriseren. Welke bodemdieren worden gevonden, hoe relateert dat aan het voorkomen van (juveniele) vis, hoe belangrijk is de ondiepe kustzone voor vis? Om praktische redenen zijn de campagnes over twee jaar verdeeld, 2017 en 2018. De campagnes zijn uitgevoerd in de zomer, omdat dat de gunstigste periode is voor het vangen van juveniele vis. Het aantal monsters in deze campagnes is beperkt (ongeveer 100), maar ze bestrijken de belangrijkste delen van de Nederlandse zandkust vanaf Zuid-Holland tot Schiermonnikoog. Binnen elk gebied bemonsteren ze de dieptegradiënt vanaf het strand tot ongeveer NAP-10 m.

In dit verslag wordt enkel de bodemdierfauna beschreven. Elders wordt gerapporteerd over de visfauna (van Hal et al. 2021). De resultaten van de analyse van de bodemdierfauna worden vergeleken met historische gegevens in hoofdstuk 4 van dit rapport.

3.2 Materiaal en Methoden

3.2.1 Bemonstering

De veldbemonsteringen, inclusief het gedetailleerde reisverslag over het verloop van het veldwerk, worden beschreven in van Hal *et al.* (2017) en Hal & Dijkman Dulkes (2018). In 2017 zijn bemonsteringen uitgevoerd in Zuid-Holland, Noord-Holland, Texel en Ameland. In 2018 is de set compleet gemaakt met transecten bij de kust van Schiermonnikoog. In elk van die gebieden zijn kustdwarse transecten gedefinieerd, die bemonsterd zijn op verschillende dieptes tussen de getijdenzone en een diepte van -10 m NAP. Door weersomstandigheden zijn niet alle transecten compleet.

Bodemdieren zijn bemonsterd met verschillende methoden, volgens de protocollen van Rijkswaterstaat (2018). In de 3-10 m zone, waar het schip (RV Luctor) kon varen, zijn in principe op 4 punten Reineck boxcores genomen. Uit de boxcore is een sedimentmonster genomen en

ingevroren. De rest van de inhoud is gezeefd en gefixeerd. In de ondiepe oeverzone is vanuit een rubberboot een steekmonster genomen met een verlengde steekbuis, op twee locaties. Lopend vanop het strand is op 1 locatie met steekbuizen gemonsterd. Alle monsters zijn op 1 mm gezeefd en in het veld gefixeerd. In het laboratorium zijn alle individuen gesorteerd en gedetermineerd op het hoogst mogelijke taxonomische niveau, meestal tot op soort.

3.2.2 Voorbehandeling en statistische analyse van de gegevens

De gegevens over bodemdieren zijn na analyse in het lab opgeleverd aan Rijkswaterstaat. Door Rijkswaterstaat zijn ze beschikbaar gesteld via Informatiehuis Marien.

De R scripts die zijn gebruikt bij het opwerken en analyseren van de gegevens over bodemdieren zijn te vinden op <http://github.com/pmijherman/EGSIlbenthos>. De scripts downloaden de gegevens van de geoserver van WMR, en voeren de analysestappen uit die hebben geleid tot de figuren die in dit rapport zijn opgenomen.

Alle taxonnamen zijn gecheckt in WoRMS (<https://www.marinespecies.org>) en waar nodig aangepast naar geldige taxonnamen volgens dit register. Bij genera die slechts een enkele soort in het gebied tellen, zijn determinaties tot op genusniveau vervangen door deze soortnaam. Hetzelfde is gedaan voor genera binnen families of families binnen ordes. Bij een enkel genus (de borstelworm *Magelona*) zijn de soorten samengevoegd op genusniveau omdat er veel onzekerheid is over de soortidentificatie.

De gemeenschap wordt gekenmerkt door een aantal karakteristieken. Totale dichtheid is de gesommeerde dichtheid (aantal per m²) van alle soorten in het monster. Totale biomassa kon niet worden berekend omdat de biomassa ontbreekt in de monsters van Schiermonnikoog. Omdat die monsters een afwijkende dichtheid hebben en hoogstwaarschijnlijk ook een afwijkende totale biomassa, is het niet mogelijk een evenwichtige bespreking van totale biomassa over alle monsters van de campagnes te maken. De som van log-getransformeerde dichtheid van de soorten is een maat voor dichtheid maar ook voor diversiteit. De dichtheid in abundante soorten weegt minder zwaar door dan de dichtheid van soorten die maar met één of enkele individuen zijn vertegenwoordigd. Als monsters over de tijd worden bekeken, dan weegt in deze maat een verdubbeling van de dichtheid van een zeldzame soort even zwaar door als een verdubbeling van de dichtheid van een algemene soort.

Het totaal aantal soorten per monster kon niet worden gebruikt als maat voor de diversiteit, omdat de monsters met verschillende methoden zijn genomen (boxcore, steekbuizen) en niet dezelfde oppervlakte hebben. Er is, in het algemeen, een niet-lineaire relatie tussen het verwachte aantal soorten en de oppervlakte van een monster. Die relatie kon in deze studie niet onafhankelijk worden bepaald, vooral omdat de kleine monsters in de ondiepe en soortenarme zone zijn genomen, en de grotere monsters in de soortenrijkere diepere zone van de vooroever. In geen enkele zone konden we kleine met grote monsters vergelijken.

Als omgevingsvariabelen zijn gebruikt: de diepte (getijgecorrigeerd) op het moment van monstereen, eigenschappen van de korrelgrootteverdeling van het sediment, en afstand tot de kust. Die laatste is bepaald aan de hand van GIS berekeningen van de kortste loodrechte afstand van een punt tot de kustlijn. Korrelgrootte is bepaald door WMR met laser diffractie. Gerapporteerd zijn de D10, D50 en D90 van de verdeling, en de fracties van de verdeling in verschillende grootteklassen. Voor de analyses hier is de mediane korrelgrootte gebruikt.

Om de gemeenschap verder te karakteriseren is een Principal Component Analysis (PCA) uitgevoerd op de log-getransformeerde dichtheid van de soorten die minimaal tienmaal zijn gevonden in de dataset. Na transformatie zijn de variabelen (dichtheid van de soorten) niet gestandaardiseerd.

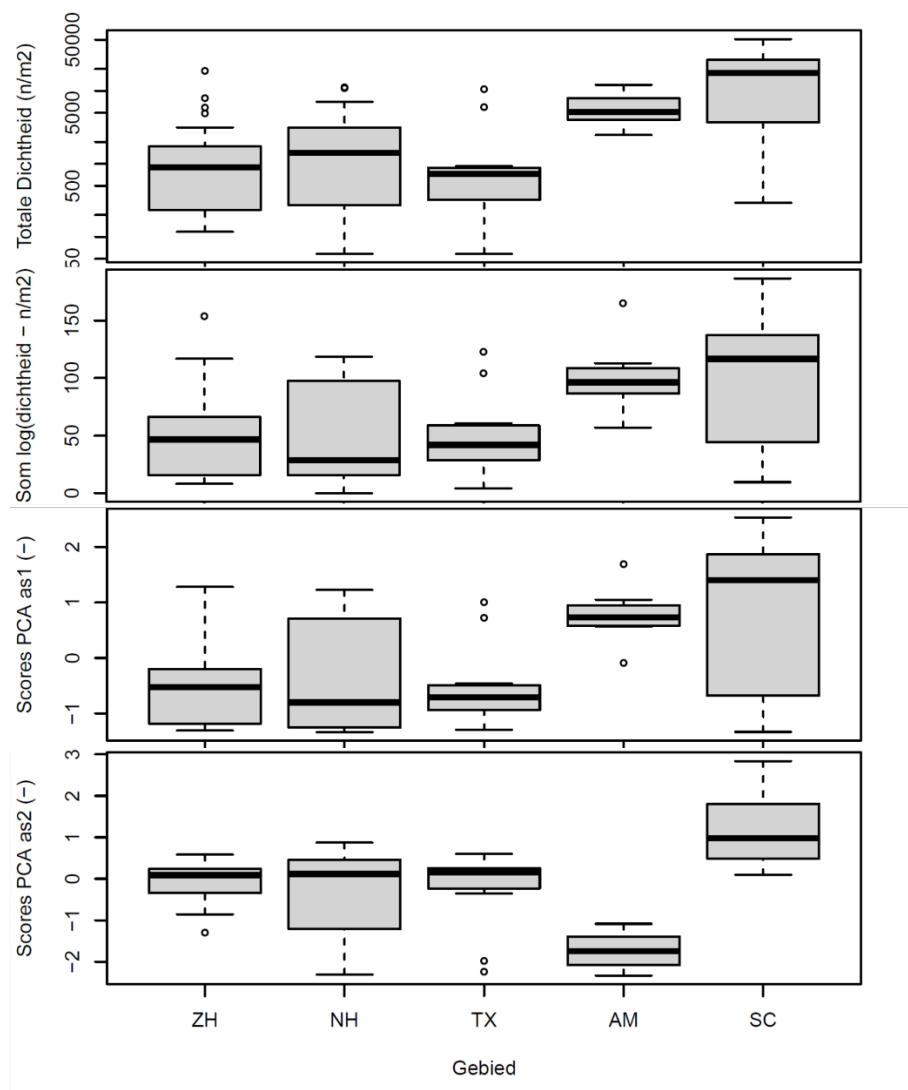
Alle analyses zijn uitgevoerd in R (R Core Team 2020).

3.3 Resultaten

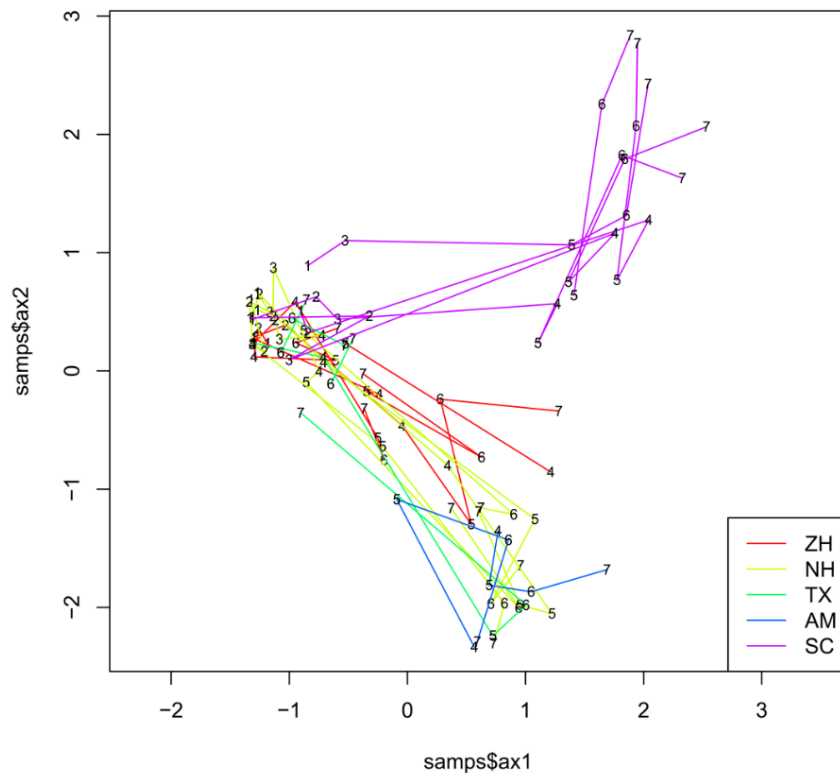
In totaal zijn in de 106 monsters 126 verschillende taxa van bodemdieren aangetroffen. Daarvan zijn 26 taxa slechts eenmaal gevonden in de dataset. Het meest frequente taxon (*Magelona*) is in meer dan de helft van de monsters (63/106) aangetroffen. De totale dichtheid varieerde tussen 0 (in 2 monsters) en ruim 50.000 individuen per m². Het aantal verschillende taxa per monster varieert van 0 tot 40, met twee duidelijke pieken in de verdeling: één piek bestaat uit een dertigtal zeer soortenarme monsters met 0-5 taxa per monster, en een andere piek vertegenwoordigt een 35-tal soortenrijke monsters met tussen de 20 en de 30 taxa per monster. Voor tenminste een deel is dit het gevolg van de monstergrootte. Alle soortenarme monsters waren kleine buismonsters. Er waren bij de boxcore monsters eveneens enkele soortenarme (<10) monsters, maar de meeste hadden meer dan 10 soorten. Omwille van het probleem van monstergrootte zijn verder geen statistieken over aantal soorten per monster opgenomen. De biomassa van de bodemdieren is slechts in een deel van de monsters bepaald en ontbreekt in de monsters van Schiermonnikoog die vaak zeer hoge dichtheden tonen. Het is dan ook niet mogelijk om over de verdeling van biomassa algemene uitspraken te doen. Zowel voor totale dichtheid als som van de log-getransformeerde dichtheid valt op dat de monsters uit de Waddenkust (Ameland en Schiermonnikoog) hogere waarden vertonen dan de andere locaties (Figuur 3.1). De gemiddelde dichtheid lag driemaal (Ameland) en negenmaal (Schiermonnikoog) hoger dan de dichtheid in de andere zones. De som van de log-getransformeerde dichtheid, een maat die zowel dichtheid als diversiteit in zich draagt, was ongeveer dubbel zo hoog in de Waddenmonsters als elders. Ook in de PCA onderscheiden de Waddeneilanden zich van de andere zones. Na compensatie voor diepte van het monster (een belangrijke bepalende factor voor de meeste maten) waren de verschillen tussen gebieden significant voor alle vier variabelen (two-way ANOVA, $p < 0.05$).

De samenstelling van de gemeenschap werd geanalyseerd met een PCA op de log-getransformeerde dichtheid van de taxa die vaker dan 10 keer werden gevonden in de totale dataset. De scores van de monsterplaatsen in het eerste vlak van de PCA worden weergegeven in Figuur 3.2 als transecten. Daarbij zijn alle monsters op verschillende diepte langs het transect met een lijn verbonden. Bij alle transecten loopt de nummering van 1 (strand) tot 7 (diepste station), maar niet alle transecten zijn volledig, in de zin dat alle dieptes bemonsterd zijn.

Voor vier van de vijf bemonsterde regio's lopen de transecten van links-midden (ongeveer positie -1,0.5) tot midden-onder (1, -2). De lijnen van de verschillende transecten verschillen niet veel van gebied tot gebied in hun algemene ligging. Wat wel verschilt tussen de transecten is de positie van de intermediaire stations 4,5 en 6 (en uitzonderlijk zelfs 7), die soms bij de ondiepe strandstations clusteren en soms ver daarvan af midden-onder in het diagram zijn te vinden.



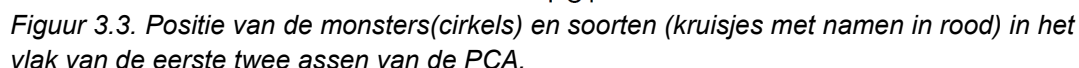
Figuur 3.1. Box and whisker plots van de samenvattende statistieken van de monsters: Totale dichtheid, som van de log-getransformeerde dichtheid en scores op de eerste en tweede as van de PCA. ZH: Zuid-Holland, NH: Noord-Holland, TX: Texel, AM: Ameland, SC: Schiermonnikoog.



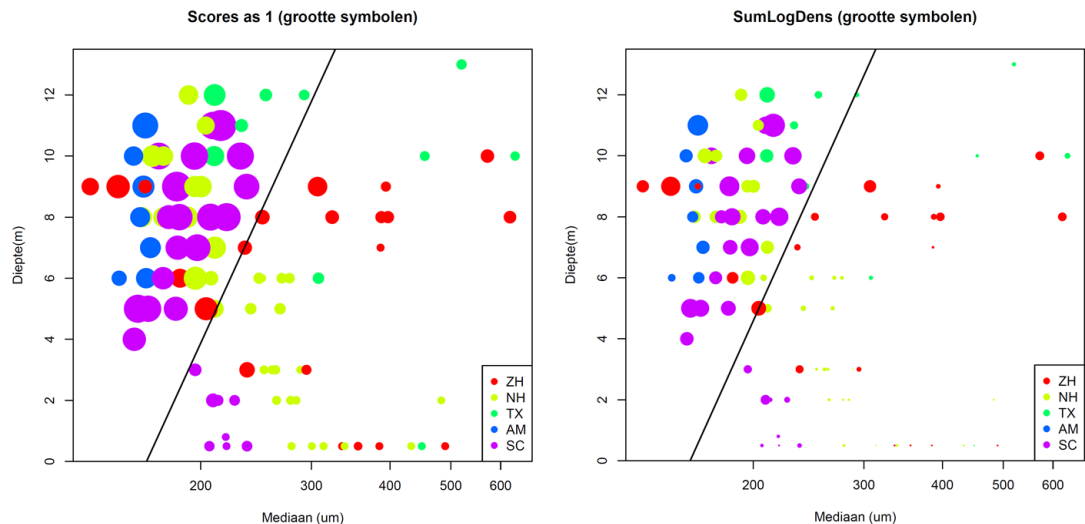
Figuur 3.2. Positie van de monsters in het vlak van de eerste twee assen van de PCA. De transecten in elk van de gebieden zijn aangegeven met lijnen in verschillende kleuren per gebied. De positie van het station langs het transect is aangegeven met cijfers (van 1:strand tot 7:10m diepte).

Figuur 3.3 illustreert welke soorten bij deze posities in het diagram horen. De ondiepe stations worden vooral gekenmerkt door mobiele kreeftachtigen en enkele wormen die een voorkeur hebben voor dynamische zanden. De diepere stations verschillen in soortensamenstelling tussen Schiermonnikoog en de andere gebieden. De monsters in Schiermonnikoog hebben een zeer grote dichtheid van kleine (pas gevestigde) mesheft *Ensis*, en verder van de borstelwormen *Owenia* en *Lagis*. Dat onderscheidt hen van de andere monsters, die vooral worden gekenmerkt door de schelpdieren *Spisula*, *Fabulina*, de schelpkokerworm *Lanice* en het vlokreeftje *Urothoe* als ze midden-onder vallen. Langs de eerste as is er geen heel duidelijk onderscheid tussen de monsters van Schiermonnikoog en de andere. In alle sets vallen diepere monsters meer naar rechts dan ondiepere, al is dat in Schiermonnikoog iets sterker het geval dan elders.

De detailverdeling van de samenvattende statistieken in de ruimte (Figuur 3.3) toont de gradiënt langs de transecten niet alleen voor de scores langs de PCA-assen, maar ook voor de andere samenvattende statistieken. De scores langs de eerste PCA-as correleren sterk met de totale dichtheid ($r=0.85$, $p<0.001$) en met de som van log-getransformeerde dichtheid ($r=0.98$, $p<0.001$). Hoge scores langs de eerste as zijn een indicatie van monsters die rijk zijn aan taxa en aan individuen, en de kans om dergelijke rijke monsters te vinden neemt sterk toe met de diepte langs een transect. Toch zijn er transecten, bijvoorbeeld bij Texel, waar relatief diepe stations toch weinig soorten en lage dichtheid vertonen (Figuur 3.2). Deze transecten worden gekenmerkt door een relatief grove korrelgrootte, en zijn waarschijnlijk sterk dynamische plaatsen (Figuur 3.4).



39 van 76

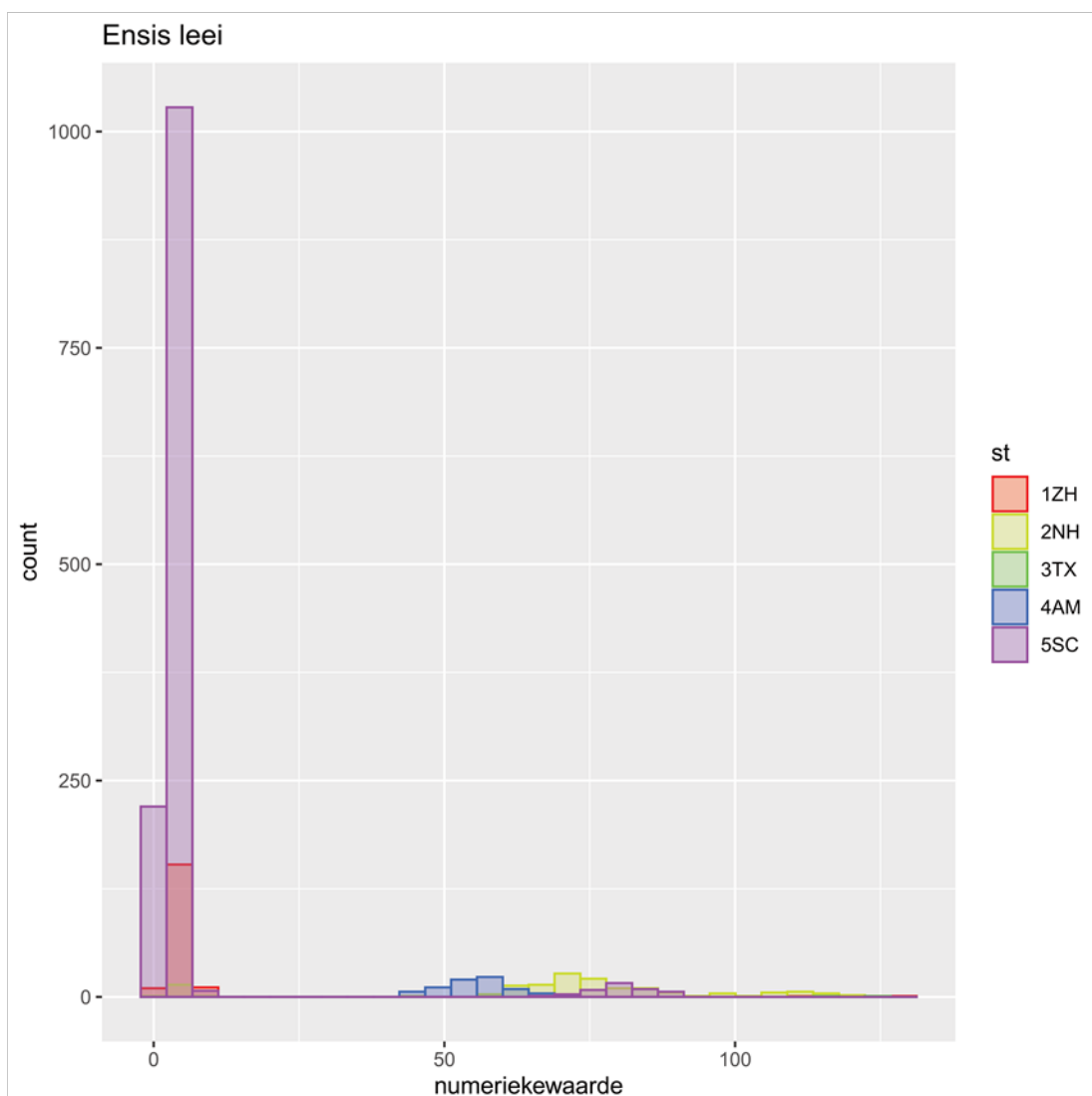


Figuur 3.4 Relatie tussen diepte, mediane korrelgrootte en (links) de scores op de eerste PCA-as en (rechts) de som van log-getransformeerde dichtheid. De grootte van de symbolen geeft de waarde van de variabele weer (score op de eerste PCA-as/som van log-getransformeerde dichtheid). De kleur onderscheidt de verschillende regio's die zijn bemonsterd (ZH=Zuid-Holland; NH=Noord-Holland; TX=Texel; AM=Ameland; SC=Schiermonnikoog). De lijnen scheiden de waarnemingen in twee groepen op basis van minimale variantie binnen de groepen.

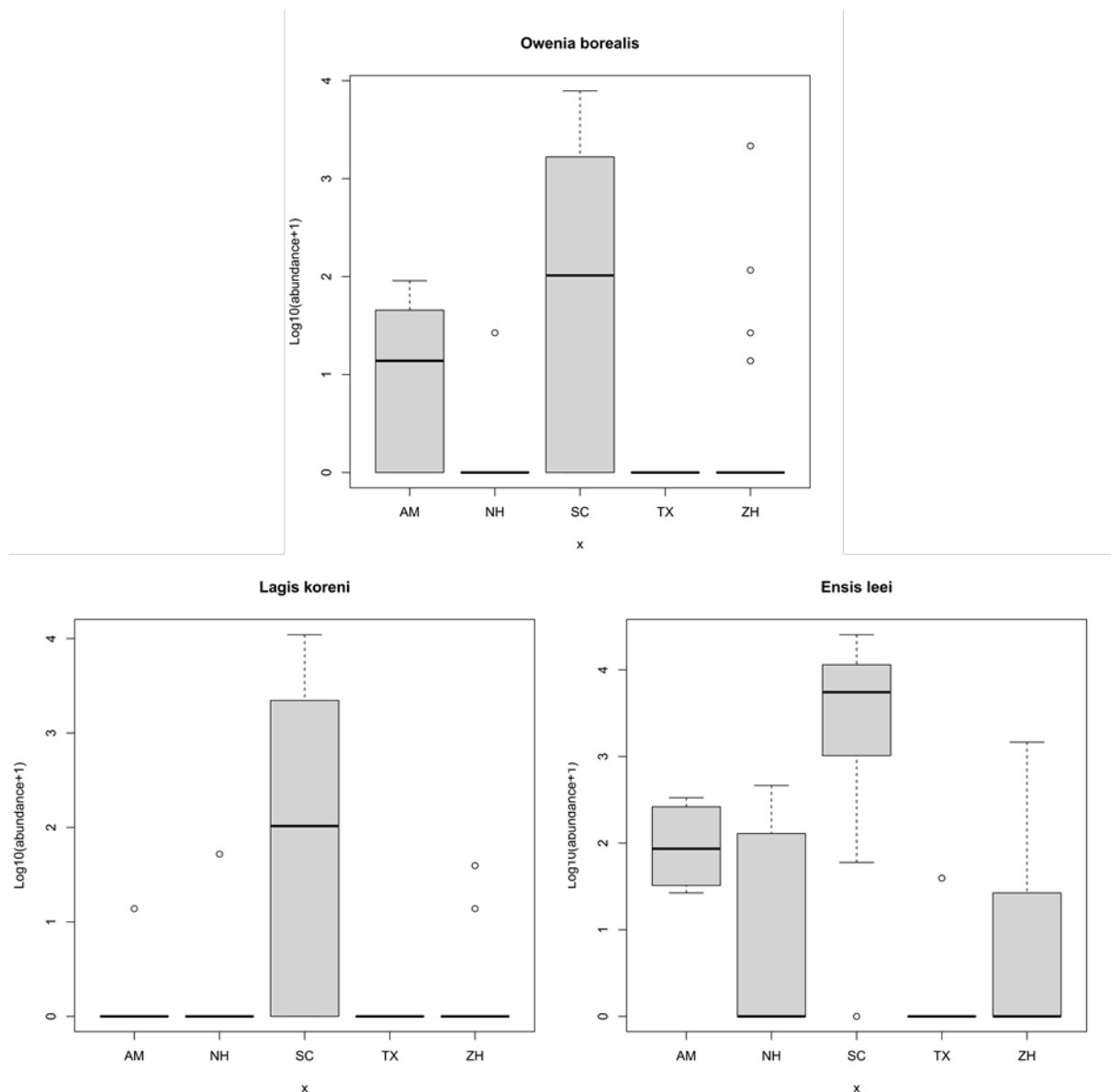
De variaties langs de tweede PCA-as (Figuur 3.2, 3.3) zijn niet duidelijk te correleren met de beschikbare omgevingsvariabelen. Er is langs de tweede as een onderscheid tussen Schiermonnikoog en alle andere regio's, tenminste voor wat betreft de diepere stations (Figuur 3.2). Dicht bij het strand bestaat dit verschil niet. Schiermonnikoog is de enige regio die in 2018 is bemonsterd, de andere punten zijn in 2017 bemonsterd. Het verschil tussen Schiermonnikoog en de andere regio's zou dus in principe een verschil tussen jaren in plaats van een ruimtelijk verschil kunnen zijn. Daarom is de fauna in deze monsters nader geanalyseerd.

De lengtemetingen van de schelpdieren laten toe om duidelijk te illustreren waar het grote verschil tussen de monsters in Schiermonnikoog en de andere monsters te vinden is. Er is bij Schiermonnikoog in de meeste diepere stations een grote dichtheid zeer kleine *Ensis* gevonden, zoals is geïllustreerd in Figuur 3.5. Daarnaast illustreert Figuur 3.6 de grote verschillen in dichtheid van *Owenia borealis* en *Lagis koreni* in de monsters van Schiermonnikoog. Of deze aantallen ook jonge, pas gerekruteerde, individuen betreffen, is uit de gegevens niet af te leiden omdat alleen schelpdieren zijn gemeten en er in Schiermonnikoog geen biomassa's zijn bepaald. Gezien de hoge aantallen gevonden individuen is het echter wel waarschijnlijk dat ook dit jonge pas gerekruteerde individuen zijn.

Lengteverdeling Ensis



Figuur 3.5 Lengteverdeling van Ensis leei (Amerikaanse zwaardschede) in de vijf regio's die zijn bemonsterd. De histogrammen van de verschillende regio's overlappen elkaar, maar zijn te onderscheiden omdat niet volledig verzadigde kleuren zijn gebruikt. De numerieke waarde op de x-as zijn de lengtes (mm) van de individuen. De y-as geeft het aantal individuen per monster weer in de grootteklasse aangegeven op de x-as. In de praktijk zijn niet al deze individuen afzonderlijk geteld, maar zijn de gegevens door subsampling verkregen.



Figuur 3.6 Box-and whisker plots van ($\log_{10}$ -getransformeerde) waargenomen dichtheden van drie soorten die opvallend meer aanwezig waren in de monsters van Schiermonnikoog dan in de andere regio's.

3.4 Discussie

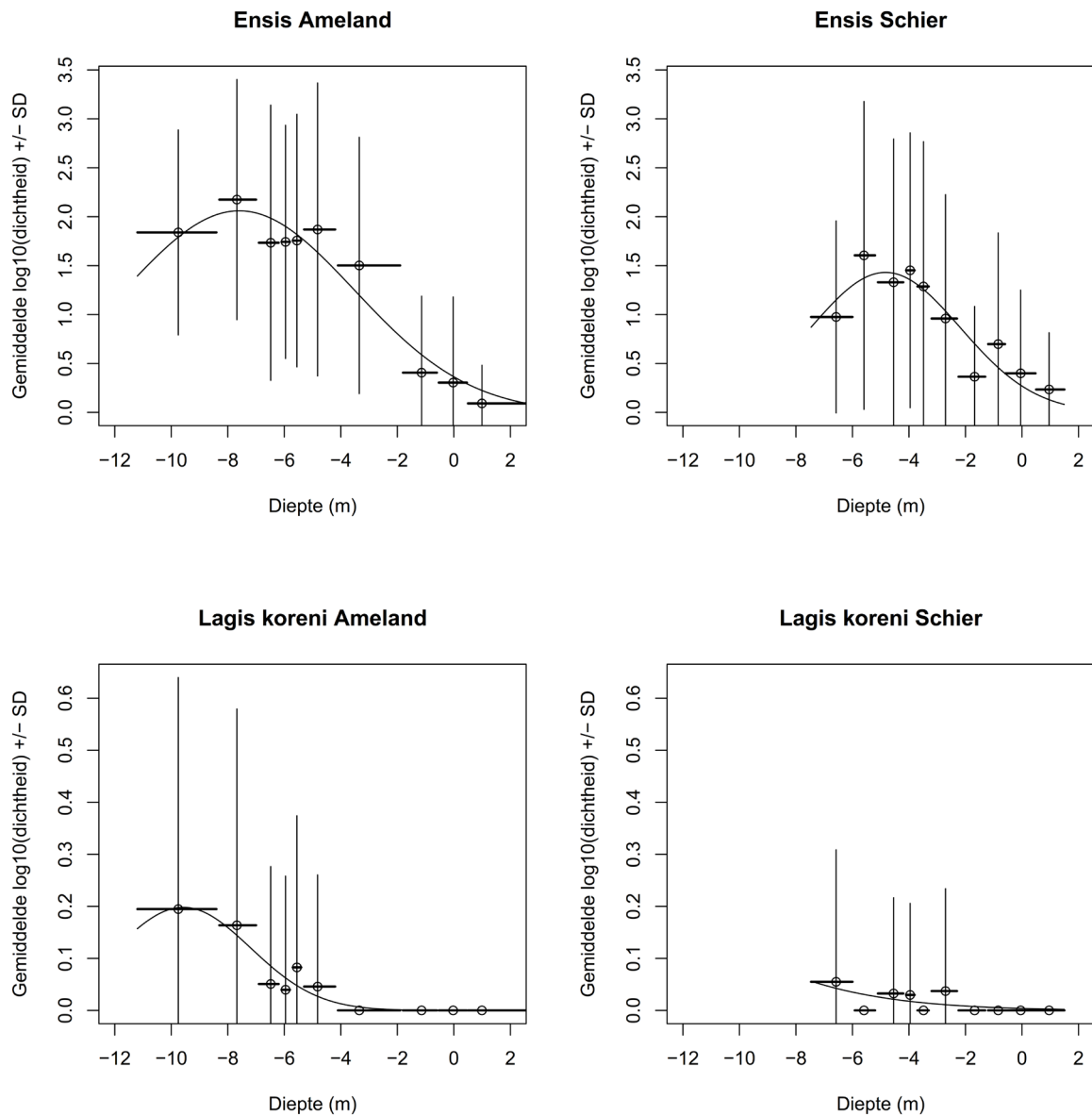
Deze studie heeft een beperkte omvang, maar heeft in vergelijking met andere studies het voordeel dat op bijna-synoptische wijze delen van de Nederlandse kust zijn bemonsterd over de hele gradiënt van de zeer ondiepe vooroever (0-10 m NAP). Een dergelijke dataset was tot nu toe niet voorhanden.

De dataset toont een consistente trend over alle bemonsterde regio's, van verandering van de fauna met de diepte in de vooroever. Dit patroon was goed gekend uit andere bemonsteringen langs de Nederlandse kust en elders (Holzhauer *et al.* 2020). Met toenemende diepte neemt verstoring van het sediment door golven in frequentie en in hevigheid af. De bodemschuifspanning die voortkomt uit golven is de bepalende factor voor deze variatie in de omgeving. Wordt de fauna in de zeer ondiepe brandingszone bijna volledig gedomineerd door soorten die extreem goed aangepast zijn aan fysische stress, dan zien we met toenemende diepte meer soorten verschijnen die afhankelijk zijn van iets

rustigere omstandigheden. Het dominante patroon in de multivariate gemeenschapssamenstelling, weergegeven in de eerste as van de PCA (Figuur 3.2, 3.3), wordt ook weerspiegeld in de totale dichtheid en vooral in de som van log-getransformeerde dichtheid van de soorten, die behalve dichtheid ook diversiteit weergeeft (Figuur 3.4). Helaas is het niet gelukt om de gehele Nederlandse kust tijdens één enkel seizoen te bemonsteren. De monsters die in 2018 voor Schiermonnikoog zijn genomen wijken sterk af van de andere monsters uit 2017. Daardoor is het de vraag of deze verschillen het gevolg zijn van verschillen in de ruimte, de tijd of beide.

De bemonstering heeft, zowel in 2017 als in 2018, plaatsgevonden in de vroege zomer. In 2017 is gemonsterd tussen 13 juni en 5 juli, in 2018 tussen 18 juni en 27 juni. Verschillen tussen beide jaren komen niet voort uit het feit dat in 2018 verder in het seizoen is gemonsterd dan in 2017. Wel is het mogelijk dat in het warme jaar 2018 het seizoen in juni al verder gevorderd was dan op dezelfde tijd in 2017, zodat misschien de piek van rekrutering van *Ensis* net is meegenomen in 2018, terwijl die in 2017 net na de bemonstering kan hebben plaatsgevonden. Meer waarschijnlijk is echter dat 2018 een uitzonderlijk succesvolle rekrutering van *Ensis* heeft gekend over de gehele kust. Perdon *et al.* (2019) rapporteren in hun jaarlijkse overzicht van schelpdierpopulaties in de Nederlandse kustzone dat het totaal aantal mesheften in de Nederlandse kustzone in 2019 fors is toegenomen ten opzichte van 2018, en sinds 1995 nog nooit zo hoog is geweest. Deze toename wordt verklaard door juveniele mesheften als gevolg van een uitzonderlijk sterke broedval van mesheften in 2018. Die broedval concentreert zich vooral bij de kust van de Waddeneilanden. De kaarten van *Ensis* aantallen in 2019 (Perdon *et al.* 2019) tonen dat de broedval van 2018 bij Ameland zelfs sterker is geweest dan bij Schiermonnikoog. Het verschil in onze dataset tussen Schiermonnikoog en Ameland moet dan ook niet als een ruimtelijk, maar als een temporeel verschil worden gezien. Het is een voorbeeld van de sterke jaar-tot-jaar verschillen in fauna van de kustzone.

Deze interpretatie wordt verder bevestigd door de gegevens uit het programma 'Ecologisch gericht suppleren' (EGS; Holzhauer *et al.*, 2009) over de verspreiding van de soorten (*Ensis*, *Lagis koreni*, *Owenia borealis*) die in 2018 opvallend talrijker waren dan in de andere zones in 2017. In de EGS I dataset heeft *Ensis* eerder een lagere dichtheid in Schiermonnikoog dan in Ameland, en hetzelfde geldt voor *Lagis koreni* (Figuur 3.7). *Owenia borealis* is niet gevonden in deze campagnes. De verschillen zijn echter klein, en vergelijking wordt bemoeilijkt doordat de transecten bij Schiermonnikoog maar tot ongeveer 8 m diepte reiken, terwijl ze in Ameland dieper gaan. Het is vooral op grotere diepte dat de rijkste fauna van schelpdieren is bemonsterd. Toch bevestigen deze resultaten nogmaals dat het in 2017-2018 om een temporeel effect gaat van een broedval die uitzonderlijk hoog was. Waarom de twee soorten Polychaeten in hetzelfde jaar ook opvallend talrijker waren dan elders, en of dat samenhangt met de sterke broedval van *Ensis*, is niet duidelijk.



Figuur 3.7 Respons van de dichtheid (na log transformatie) op diepte in de dataset van Ameland en Schiermonnikoog uit EGS I. Alle gegevens uit verschillende jaren zijn samengenomen en in tien decielassen van diepte opgedeeld. Per klasse is de gemiddelde dichtheid geplot met standaardfout. De Gaussiaanse responscurve is door deze gemiddelden gefit. Merk op dat de dieptegradiënt in Ameland langer is dan in Schiermonnikoog. De schalen verschillen per soort maar zijn binnen de soort voor beide eilanden gelijk.

De correlatie van diepte, korrelgrootte van het sediment en hun interactie met de samenstelling van de bodemdiergemeenschap, zoals getoond in Figuur 3.4, is een belangrijk resultaat van deze analyse. Hoewel we langs de hele kust over het algemeen observeren dat de gemeenschap diverser wordt met de diepte, en met de diepte ook meer soorten bevat die gevoelig zijn voor verstoring, wat zich vertaalt in het PCA-beeld van Figuur 3.2, blijken er op het niveau van individuele dieptetransecten toch uitzonderingen op dit algemene beeld voor te komen. In Figuur 3.2 zien we transecten, bijvoorbeeld bij Texel, waarvan het diepste punt (punt 7) een lage score op de eerste as van de PCA heeft. In sommige van deze transecten is er eerst een toename van de scores met de diepte, en dan een teruggang. Verder kunnen we in Figuur 3.2 observeren dat de overgang van lage naar hoge scores op de eerste as niet

bij alle transecten op dezelfde diepte gebeurt. De 'overgangspunten' in de transecten (punten 4 en 5) clusteren soms met de diepe punten, en soms met de ondiepe. Uit Figuur 3.4 kunnen we opmaken dat deze verschillen heel vaak te maken hebben met de korrelgrootte van het sediment. We vinden hoge scores op de eerste as vooral bij een combinatie van relatief fijne mediaan (<200-300 µm) en relatief grotere diepte (>4 m). In grovere sedimenten vinden we zelfs bij grotere diepte een fauna die uit weinig zeer stressbestendige soorten bestaat en vergelijkbaar is met de fauna van de brandingszone. Het is onduidelijk uit deze gegevens of de korrelgrootte van het sediment een directe causale factor is, verantwoordelijk voor de verschillen in de fauna, of een factor die samen met de fauna covarieert met sterkere fysische blootstelling. We verwachten immers grover sediment op meer blootgestelde plaatsen, waar we eveneens een andere faunasamenstelling verwachten. Uit deze dataset is de causaliteit niet af te leiden.

In de literatuur zijn vele verwijzingen naar de correlatie tussen korrelgrootte van het sediment en de samenstelling van de fauna, en het mogelijke belang daarvan voor het effect van suppleties (McLachlan 1996, Speybroeck *et al.* 2006, Colosio *et al.* 2007). Er zijn echter maar heel weinig gegevens die toelaten de rechtstreekse invloed van veranderingen in korrelgrootte als factor geïsoleerd te bestuderen. McLachlan (1996) is daarin geslaagd door de veranderingen in fauna te bestuderen van een deel van een strand dat door dumping veel grover was geworden. Hij toont aan dat er een duidelijke correlatie is tussen deze vergroving en verandering van de fauna, maar dat die correlatie wordt bewerkstelligd enerzijds door rechtstreeks effect van het sediment op de fauna, anderzijds doordat de morfologie en morfodynamica van het strand zich aanpast aan de korrelgrootte, waardoor ook de fysische stress op het strand wordt veranderd. Fysische krachten, morfologie, morfodynamiek en sedimentsamenstelling zijn een samenhangend complex, waartoe ook de samenstelling van de bodemdiergemeenschap kan worden gerekend.

3.5 Conclusie

De bodemdierbemonstering van Natuurlijk Veilig heeft een quasi-synoptisch beeld gegeven van de bodemdiergemeenschappen in de vooroever langs verschillende delen van de Nederlandse kust. Eén set monsters, in Schiermonnikoog, is niet in hetzelfde jaar bemonsterd als de andere. Deze set toont grote verschillen, die verklaard kunnen worden door de uitzonderlijk sterke broedval van *Ensis leei* in 2018, toen deze monsters zijn genomen.

Hydrodynamische stress, die afneemt met de diepte vanaf de brandingszone naar de vooroever, is de belangrijkste factor die de samenstelling van de gemeenschappen bepaalt. Op alle bemonsterde plaatsen neemt de totale dichtheid en de diversiteit van de fauna toe met de diepte. De overgang van relatief arme gemeenschap in de branding naar de relatief rijkere gemeenschap in dieper water gebeurt niet overal bij dezelfde diepte. In transecten met grof sediment blijft de gemeenschap armer tot op grotere diepte. De interactie tussen diepte en korrelgrootte bepaalt de samenstelling en de diversiteit van de gemeenschap.

4 Relatie tussen fysische stress, korrelgrootteverdeling en bodemdieren

4.1 Inleiding

De analyse van de veldgegevens in 2017 en 2018 in hoofdstuk 3 toont aan dat de samenstelling van de bodemdiergemeenschap vooral bepaald wordt door de sterkte van de fysische stress op het sediment. Over het algemeen wordt met toenemende diepte, waarbij de fysische stress afneemt met de diepte, een steeds rijkere bodemdiergemeenschap gevonden. Die overgang is er echter minder of niet in transecten waar het sediment een grove korrelgrootte heeft. Als er sprake is van grovere korrelgrootte op diepe locaties (10-15 meter diepte) kan er toch een soortenarme fauna met een lage dichtheid worden gevonden die vergelijkbaar is met de relatief arme fauna in de brandingszone.

Een beperking bij het bestuderen van het effect van verschillende factoren, bijvoorbeeld bodemschuifspanning door golven, bodemschuifspanning door getijstroming en korrelgrootte van het sediment, is dat deze factoren in de ondiepe kust tamelijk sterk met elkaar gecorreleerd zijn, en het vrijwel onmogelijk is de effecten van die verschillende factoren op de bodemgemeenschap uit elkaar te halen. Zeker binnen een beperkt gebied is er een relatie tussen diepte en korrelgrootte van het sediment (zie hoofdstuk 2). Door vergelijking van verschillende gebieden wordt deze correlatie min of meer doorbroken, wat gunstig is om de effecten van korrelgrootte en fysische stress uit elkaar te halen. Voor de studie van het effect van suppleties op de kustfauna speelt echter nog een tweede correlatie een rol. Suppleties worden vooral uitgevoerd op plaatsen waar de kust erosief is. Op die plaatsen verwacht men ook relatief grof sediment, omdat fijnere korrels gemakkelijker eroderen dan grove. Men verwacht dus een correlatie tussen intensiteit van suppleties en korrelgrootte van het sediment, ook als suppleties zelf geen causale invloed hebben op de korrelgrootte. Als suppleties via een andere weg dan korrelgrootte een negatieve invloed hebben op de fauna, zou dat effect ten onrechte als een korrelgrootte-effect kunnen worden beschreven. In dit hoofdstuk maken we gebruik van de database van bodemfauna langs de Nederlandse kust, die we uit historisch beschikbare bronnen hebben samengesteld. Niet alle data in de database konden worden gebruikt, omdat in een aantal gevallen de informatie over korrelgrootte niet meer was te achterhalen. Toch hebben wij uit de bemonsteringen van EGSI, de Zandmotor, de Hollandse kust door Gerard Jansen (zie Bijlage B2) en de nieuwe monsters van Natuurlijk Veilig, in totaal bijna duizend monsters kunnen verzamelen, van bodemdiersamenstelling, korrelgrootte en diepte in de dieptezone 0-12 m NAP. Die dataset wordt in dit hoofdstuk nader geanalyseerd. We beginnen met de analyse van de data van de Zandmotor. Daarna voegen we data uit de andere datasets toe als validatie van de patronen die in de Zandmotor zijn gevonden.

4.2 Analyse van de data van de Zandmotor

4.2.1 Samenvatting van eerdere analyses

In een analyse van de benthosgegevens van de Zandmotor (Herman *et al.* 2021) zijn de volgende conclusies getrokken over de relatie tussen bodemdieren en hun omgeving, die door de aanleg van de Zandmotor was veranderd:

- De relaties tussen de soortensamenstelling en de omgeving zijn niet wezenlijk veranderd. De samenstelling van de gemeenschap in de jaren na aanleg van de Zandmotor kan zeer

goed worden voorspeld met de omgevingsvariabelen en relaties tussen gemeenschaps-samenstelling en omgeving die zijn vastgesteld vóór de aanleg van de Zandmotor.

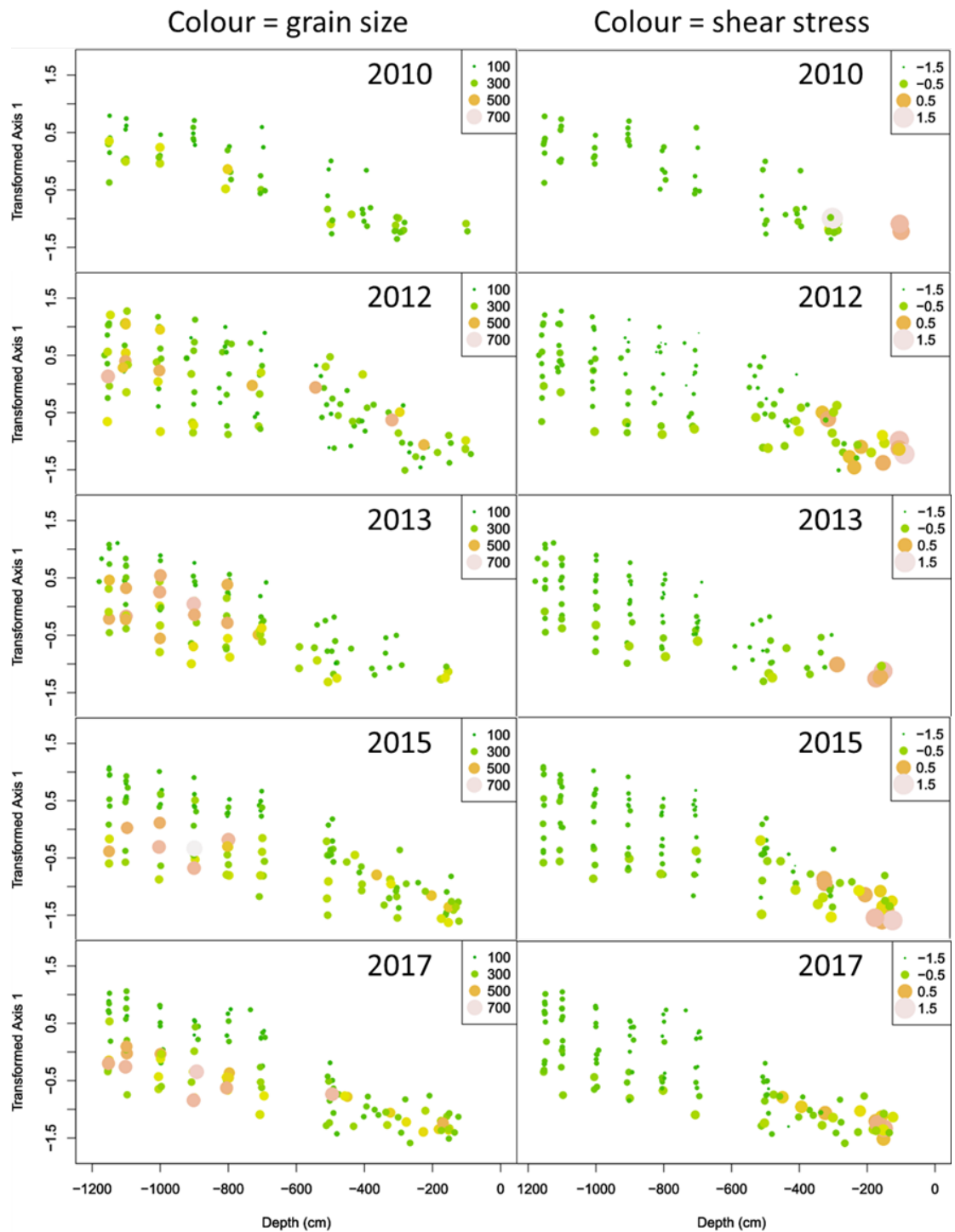
- Hoewel het aantal soorten dat is gevonden na aanleg van de Zandmotor hoger is dan het aantal soorten gevonden in de T0 monsters vóór aanleg, is dit verschil geheel te verklaren door het hoger aantal monsters in de jaren na aanleg. De aanleg van de Zandmotor heeft niet aantoonbaar geleid tot het verschijnen van soorten die voordien afwezig waren. Daarbij moet uitzondering worden gemaakt voor de slibrijke 'lagune', waar wel nieuwe soorten, van voorheen totaal afwezig slibhabitat, zijn gekomen.
- Het gemiddeld aantal soorten per monster is ongeveer gelijk gebleven na aanleg, ten opzichte van de waarde in T0. Lokale soortendiversiteit lijkt niet veel veranderd.
- Er is een groot verschil gevonden in de 'species-accumulatiecurve' tussen T0 en de periode na aanleg. Deze curve geeft het verwachte totaal aantal soorten als een aantal toevallig gekozen monsters worden samengenomen. Dit grote verschil, terwijl het aantal soorten per monster niet is veranderd, duidt er op dat het verschil tussen de monsters is toegenomen. Dit is hoogstwaarschijnlijk een gevolg van de toegenomen habitatdiversiteit. Door de aanleg van de Zandmotor zijn allerlei bijzondere combinaties van diepte, korrelgrootte, stroomsnelheid en golfaanval ontstaan, die normaal niet worden gevonden langs een lineaire kust. Lokaal past de fauna zich hieraan aan, en omdat de verschillen tussen stations groter zijn dan voorheen, zien we ook meer verschillende gemeenschappen in de monsters.

Door de aanleg van de zandmotor is de gebruikelijke correlatiestructuur tussen diepte, stroomsnelheid, golfimpact, korrelgrootteverdeling en samenstelling van de fauna doorbroken. Er komen nu diepe locaties met hoge stroomsnelheden voor, er zijn rustige locaties met relatief grove korrel, en meer ongebruikelijke combinaties. Dit biedt de kans om beter de relatieve bijdrage van die omgevingsvariabelen, onafhankelijk van elkaar, te kunnen inschatten.

Figuur 4.1 vat de relatie tussen diepte, bodemschuifspanning, korrelgrootteverdeling en samenstelling van de fauna samen voor meerdere jaren vóór (2010) en na aanleg van de Zandmotor. In de linkerkolom van Figuur 4.1 wordt, in één grafiek per monsterjaar, de relatie getoond tussen de scores op de eerste PCA-as (een maat voor de samenstelling van de bodemdiergemeenschap) en de diepte. De kleur en de grootte van de punten geeft, in de linker kolom, de mediane korrelgrootte van het sediment weer. Het valt op dat de relatie tussen de score op de PCA-as en de diepte in 2010 relatief sterk was, maar dat in de volgende jaren, na aanleg van de Zandmotor, er meer variatie in de gemeenschap is voor de meeste dieptes. In 2012 was deze variatie maximaal. In 2010 was de range in korrelgrootte (uitgedrukt in kleur) van het sediment kleiner dan in de daaropvolgende jaren. De maximale waarde was rond 400 µm, terwijl later waardes tot 700 µm werden gevonden. In 2010 lagen de punten met relatief hoge mediane korrelgrootte aan de onderkant van de puntenwolk: voor eenzelfde diepte was de score op de eerste as lager in grof sediment dan in fijner sediment. In 2012-2013 is dat patroon niet aanwezig. Punten met grof sediment liggen in het midden van de puntenwolk. In latere jaren schuiven ze echter terug naar de onderkant van de puntenwolk en lijkt de relatie die oorspronkelijk bestond weer hersteld. Herman et al. (2021) tonen aan dat de scores op de eerste as vooral worden verklaard door de interactie tussen diepte en bodemschuifspanning, maar dat daarnaast een significante bijdrage bestaat van mediane korrelgrootte. Na compensatie voor diepte*bodemschuifspanning, is de correlatiecoëfficiënt tussen de PCA-scores en de korrelgrootte 0.28 in 2010. In 2017 is deze correlatiecoëfficiënt 0.32, maar in 2012 en 2013 is er geen significante correlatie aanwezig tussen PCA-scores en mediane korrelgrootte.

In de rechterkolom van Figuur 4.1 worden dezelfde punten getoond als in de linkerkolom, maar met een andere kleurcodering. Kleur en grootte van de symbolen is hier bepaald door de bodemschuifspanning. Het is duidelijk dat de grootste bodemschuifspanningen voorkomen in de ondiepste stations, die ook de laagste scores op de eerste PCA-as hebben. Verder kan worden gezien dat binnen één diepte, de punten met een hogere

bodemschuifspanning altijd onderaan de puntenwolk voorkomen. In tegenstelling tot wat werd geobserveerd in de linker kolom m.b.t. korrelgrootte, is dit patroon niet veranderd voor en na de aanleg van de zandmotor. Wel is, per diepteklasse, de range in bodemschuifspanningen groter na aanleg van de zandmotor dan in 2010. Voor de diepere punten (> 8m) was die range maximaal in 2012 doordat zowel punten met een hogere, als punten met een lagere bodemschuifspanning werden gevonden in vergelijking met de range in 2010. De range is tussen 2012 en 2017 verder verkleind, doordat vooral de punten met de allerlaagste bodemschuifspanning zijn verdwenen. De initiële vorm van de Zandmotor creëerde zones die luwer waren dan gebruikelijk langs deze kust, maar door de morfologische aanpassingen in het gebied zijn deze zones minder uitgesproken luw en minder uitgebreid geworden. De fauna in deze zeer luwe zones heeft relatief hoge scores op de eerste as.



Figuur 4.1. Scores van de monsterpunten op as 1 (getransformeerd, y-as) versus diepte vóór (2010) en na constructie van de zandmotor. De figuren in de linker en rechterkolommen tonen dezelfde punten, maar links is de kleurcodering en grootte van de punten evenredig met de mediane korrelgrootte, rechts met de (log-getransformeerde) bodemschuifspanning. Zie tekst voor verdere uitleg

4.2.2

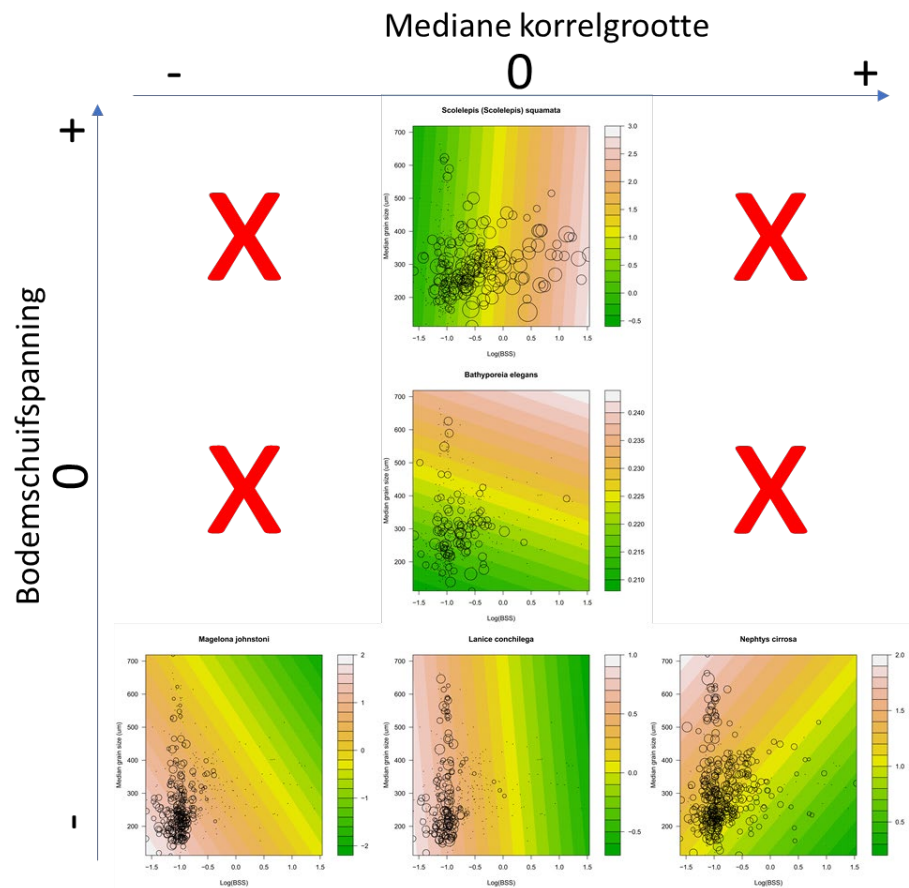
Respons van soorten op variaties in korrelgrootte, bodemschuifspanning en diepte

De basis van iedere verandering in soortensamenstelling als functie van omgevingsvariabelen, ligt in de respons van de soorten op die variabelen. Wij hebben daarom voor de meest voorkomende soorten in de Zandmotor een analyse uitgevoerd van

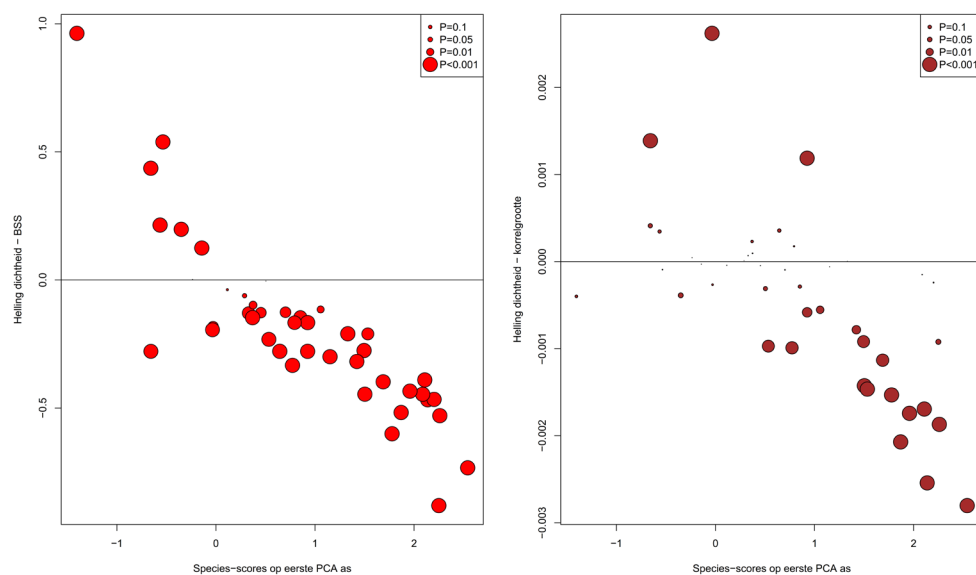
de mate waarin die soorten in hun dichtheid reageren op veranderingen in korrelgrootte en bodemschuifspanning. Dit is gebeurd door een lineaire regressie van de dichtheid op deze beide variabelen. Een lineaire regressie geeft vaak niet de precieze vorm van de respons weer, maar over het algemeen wel of er een respons voorkomt en zo ja, in welke richting die respons loopt. De analyse is afzonderlijk uitgevoerd voor alle soorten die in meer dan 10% van de monsters zijn gevonden. Enkele typerende voorbeelden van de responsen worden getoond in Figuur 4.2. In die figuur zien we soorten die positief, negatief of neutraal op beide variabelen reageren. Niet alle combinaties kwamen daarbij voor. Een duidelijke respons op mediane korrelgrootte (zowel negatief als positief) werd alleen gevonden bij soorten die negatief reageerden op bodemschuifspanning. Soorten die neutraal of positief reageerden op schuifspanning vertoonden geen onafhankelijke reactie op korrelgrootte. In Figuur 4.2 is het voorbeeld van de laatste groep de gemshoornworm *Scolelepis (Scolelepis) squamata*. Dit is de meest verbreide soort op het lagere strand en in de brandingszone langs de Nederlandse kust. Ze wordt gevonden in bijna alle monsters van plekken die aan sterke fysische stress onderhevig zijn, maar is vaak afwezig in monsters van de diepere, rustigere vooroever. De soort komt voor in de volledige range van korrelgroottes die rond de Zandmotor zijn bemonsterd, tussen 150 en 650 μm .

Bij de groep van soorten die geen lineaire respons op bodemschuifspanning en korrelgrootte vertonen, met als voorbeeld in Figuur 4.2 het kniksprietkreeftje *Bathyporeia elegans*, wordt de kanttekening gemaakt dat dit veroorzaakt kan zijn door het zoeken naar een lineaire relatie. De soort komt vaker voor op geringe diepte (rond 2 m diepte) dan zowel ondieper als dieper in de vooroever. Daarom is er geen lineaire relatie met bodemschuifspanning, hoewel er een (relatief zwakke) niet-lineaire respons in de vorm van een optimumcurve is gevonden. Op korrelgrootte heeft de soort helemaal geen respons.

Bij de soorten die een voorkeur hebben voor een relatief lagere bodemschuifspanning, heeft een aantal geen voorkeur voor bepaalde korrelgroottes. In Figuur 4.2 is als voorbeeld de schelpkokerworm *Lanice conchilega* getoond. De soort is afwezig op plaatsen met een sterke bodemschuifspanning. Typisch wordt ze vooral in de troggen tussen de banken gevonden. Ze toont daarbij geen voorkeur voor bepaalde sedimenttypes en bestreek rond de Zandmotor het volledige spectrum van mediane korrelgrootte. De filtrerende borstelworm *Magelona johnstoni*, een veel voorkomende soort langs de Nederlandse kust, heeft een voorkeur voor locaties met fijn sediment, al is de verspreiding langs de as van mediane korrelgroottes niet zeer nauw. Aan de andere kant heeft *Nephtys cirrosa*, een dominante soort van matig fysisch verstoorde ondiepe zanden, een vrij brede verspreiding over de korrelgroottes, maar de soort is vaker afwezig in fijne sedimenten (< 200 μm) dan in grovere.



Figuur 4.2 Zandmotor dataset. Voorbeelden van respons van organismen op variatie in bodemschuifspanning (x-as) en mediane korrelgrootte (y-as). De verschillende voorbeelden illustreren een positieve, neutrale of negatieve respons op de beide omgevingsvariabelen. Waar een rood kruis staat zijn geen voorbeelden te vinden van soorten die op deze manier reageren.



Figuur 4.3 Zandmotor dataset. Relatie tussen de respons van soorten op bodemschuifspanning (links) en mediane korrelgrootte (rechts), en de score van de soort op de eerste as van de PCA (x-as in beide grafieken). De respons is uitgedrukt als de regressiecoëfficiënt op de factor in een multipel lineair regressiemodel. De grootte van de symbolen drukt de significantie van de regressiecoëfficiënt uit.

Voor alle soorten is de helling van de regressie op bodemschuifspanning en mediane korrelgrootte uitgezet tegenover de score van de soort op de eerste PCA-as. De grootte van het symbool stelt de significantie van de regressie voor – kleine symbolen moeten dus genegeerd worden (Figuur 4.3).

Het eerste wat opvalt in Figuur 4.3 is de zeer sterke correlatie tussen de scores van de soorten op de eerste PCA-as met de sterkte van hun respons op bodemschuifspanning. Soorten die talrijker worden naarmate de bodemschuifspanning afneemt hebben een hoge positieve score op deze PCA-as. Soorten die talrijker worden naarmate de bodemschuifspanning toeneemt zijn specialisten van de brandingszone, die een negatieve score op de PCA-as hebben. De sterkte van de correlatie is opvallend – respons op bodemschuifspanning is hét organiserende element te zijn in deze gemeenschap. Dat komt overeen met de interpretatie van Herman et al. (2021).

De eerste as van de PCA correleert in mindere mate met de respons van de soorten op mediane korrelgrootte, maar de correlatie is aanwezig. Voor grofweg de helft van de soorten wordt een onafhankelijke respons op korrelgrootte, boven op de respons op bodemschuifspanning, teruggevonden. Dit is bijna uitsluitend het geval aan de positieve kant van de PCA-as: dus bij soorten die een voorkeur hebben voor relatief luwe omstandigheden (lage bodemschuifspanning). Deze soorten zijn ook selectief voor korrelgrootte en kunnen niet verwacht worden waar de korrelgrootte grover is. Positieve responsen op korrelgrootte zijn slechts bij drie soorten teruggevonden. Twee van die soorten zijn specialisten van grove sedimenten, die afhankelijk zijn van de (grote) interstitiële ruimtes tussen de grove zandkorrels. Deze soorten worden normaal niet in de vooroever aangetroffen, maar zijn in de zone van de Zandmotor aanwezig in de patches met heel grof sediment.

4.2.3 Conclusies uit de Zandmotor-dataset

De dataset van de Zandmotor heeft het voordeel dat de normale correlaties tussen fysische krachten, korrelgrootte van het sediment en samenstelling van de fauna worden doorbroken. Dat biedt meer mogelijkheden om de factoren onafhankelijk te onderzoeken.

Bodemschuifspanning is de belangrijkste factor om de samenstelling van de bodemdierfauna te begrijpen. Daarnaast speelt ook sedimentsamenstelling een rol, maar niet alle soorten hebben een significante respons op korrelgrootte. Zoals hierboven opgemerkt, zijn het de soorten met een duidelijke voorkeur voor luwe condities, die samen de rijkste gemeenschappen vormen (in termen van dichtheid, biomassa en diversiteit), die meestal ook een significante voorkeur voor fijne korrelgrootte hebben.

In de brandingszone of op plaatsen waar de bodemschuifspanning hoog is komen soorten voor die meestal geen duidelijke voorkeur voor korrelgrootte hebben. Als door menselijk ingrijpen de korrelgrootte in deze zones verandert, zal dat weinig effect hebben op de fauna. Dieper op de vooroever en op meer beschutte plaatsen is dat anders. De fauna die daar voorkomt is wel gevoelig voor korrelgrootte, waardoor vergroving door menselijk ingrijpen in deze zones wel tot een verarming van de fauna kan leiden.

4.3 Validatie met historische en recente datasets

4.3.1 Gebruikte gegevens

De analyse van respons van de soorten op basis van de gegevens van de monitoring van de Zandmotor is gevalideerd door andere data binnen dezelfde grafieken te plotten en de resultaten te vergelijken met de resultaten van de Zandmotor. Daartoe zijn de historische gegevens (bijlage B) gebruikt die daarvoor geschikt zijn, d.w.z. verzameld in de 0-12 m dieptezone en met informatie over de mediane korrelgrootte. De volgende datasets kwamen in aanmerking: EGSI dataset bij Ameland en Schiermonnikoog (ongeveer 1/3 van de monsters heeft korrelgrootte-informatie); historische data van Gerard Jansen bij Egmond en Callantsoog; data verzameld voor Natuurlijk Veilig in 2017 en 2018. In totaal zijn bijna duizend monsters in de dataset opgenomen.

Verschillende datasets van Jan van Dalfsen (o.m. Terschelling en Hollandse kust; Bijlage B) ontbreken in dit overzicht, omdat de informatie over mediane korrelgrootte niet kon worden teruggevonden. Een beperkte dataset bij Texel die kort voor en kort na een suppletie was genomen, maar in een heel ander seizoen, is niet in het overzicht opgenomen omdat de soortenrespons sterk bepaald wordt door de begraving tijdens de suppletie – de gemeenschappen hadden nog niet de tijd gehad zich te herstellen.

Buiten de Zandmotor beschikken we voor geen enkele dataset over schattingen van de bodemschuifspanning. Modelberekeningen met het kuststrookmodel zijn niet geschikt om de bodemschuifspanning te berekenen voor punten in de brandingszone. Daarom hebben we gebruik gemaakt van de diepte als een proxy voor de bodemschuifspanning. Deze benadering laat toe te controleren of er een vast patroon is over de verschillende datasets.

4.3.2 **Diepte als proxy voor bodemschuifspanning**

We presenteren eerst de gegevens van de Zandmotor, met diepte in plaats van bodemschuifspanning op de x-as van de figuren (Figuur 4.4). Ook de relatie van de regressiecoëfficiënten met de scores op de eerste as worden getoond voor deze analyse. Het is duidelijk dat het algemene beeld van de resultaten zeer gelijkend is met de voorgaande analyse (Figuur 4.2, 4.3) uitgaande van bodemschuifspanning. In detail zijn er verschuivingen. Het lijkt er op dat voor een aantal bodemdiersoorten korrelgrootte in deze analyse wel, en in de analyse in §4.2.2 niet significant was. In de analyse speelt wellicht een rol dat korrelgrootte correleert met diepte terwijl dat niet of minder het geval is voor bodemschuifspanning. Toch bevestigt deze analyse dat diepte een bruikbare proxy is voor bodemschuifspanning binnen de dataset van de Zandmotor.

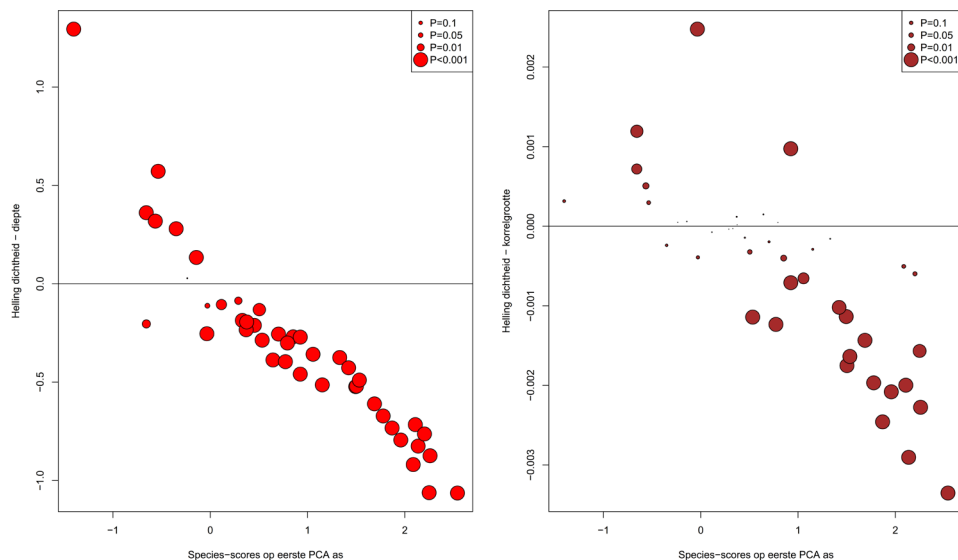
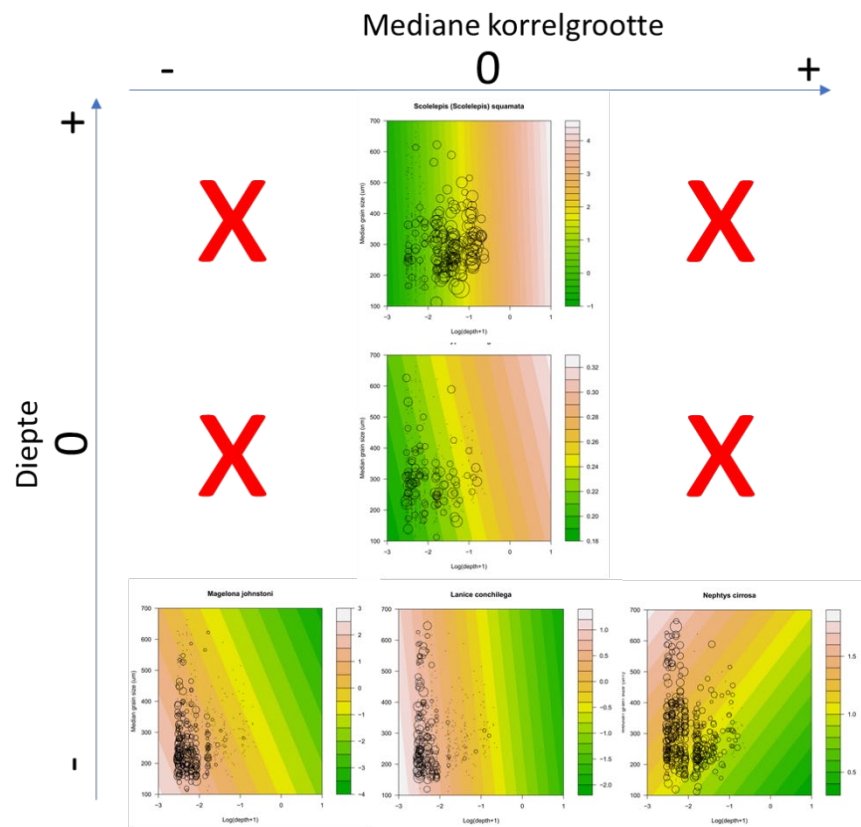
Voor onze verdere analyse nemen we aan dat dit ook het geval is bij het vergelijken van meerdere datasets. De relatie tussen diepte en bodemschuifspanning kan van locatie tot locatie verschillen. Dat zou met name het geval zijn als het golfklimaat sterk zou verschillen tussen locaties, want golven zijn de dominante bron van fysische stress op het sediment. Hoewel dit tot op zekere hoogte wel het geval zal zijn, zeker als we Hollandse Kust en Waddenkust met elkaar combineren, kan toch worden aangenomen dat het golfklimaat langs de Nederlandse kust voldoende homogeen is om de verdere analyse op basis van diepte te verantwoorden.

4.3.3 **Analyse van de gecombineerde dataset**

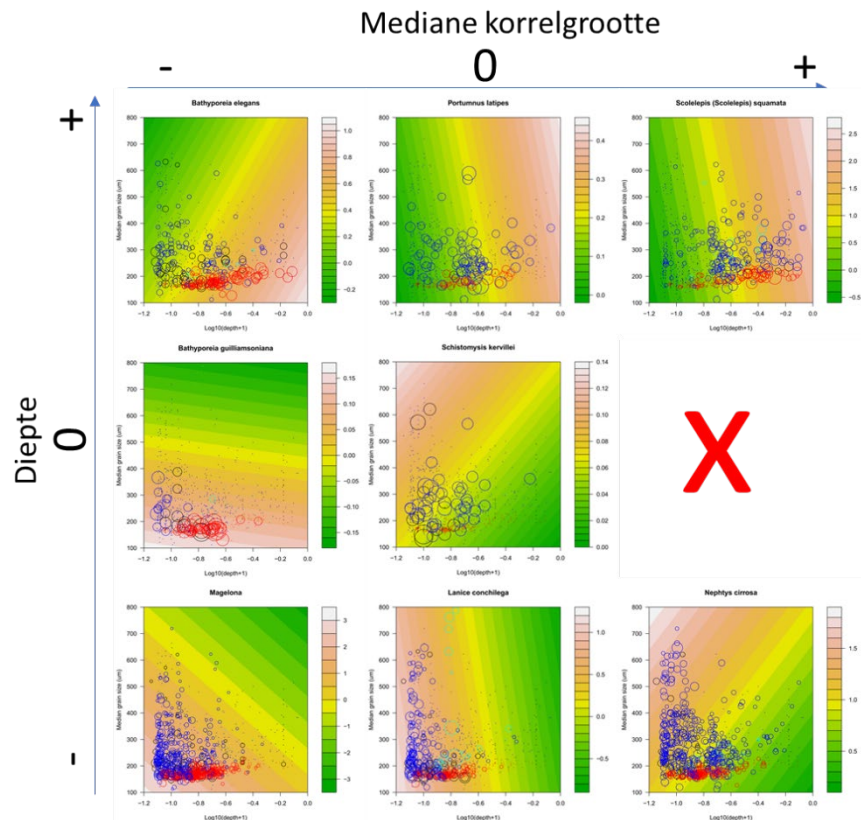
In de gecombineerde dataset zijn meer monsters voorhanden en is de range van omstandigheden breder dan in de dataset van de Zandmotor. Daardoor komen meer combinaties van responsen voor en kon het overzicht in Figuur 4.5 completer gemaakt worden. Er is slechts één combinatie die ontbreekt: we vonden geen soorten die neutraal reageren op diepte en positief op korrelgrootte. De grootste groep van soorten is te vinden in de “-” respons: de soorten die talrijker worden in dieper water en in fijnere sedimenten. In het diepte-korrelgrootte diagram overlappen de verschillende datasets gedeeltelijk, maar niet volledig. In die zin zijn de datasets complementair met elkaar. De dataset van Ameland/Schiermonnikoog heeft fijnere sedimenten op dezelfde dieptes dan de andere sets. De Natuurlijk Veilig dataset is klein maar bestrijkt het grootste deel van de parameter ruimte. De data van Gerard Jansen vertonen enkele zeer hoge waarden van mediane korrelgrootte op intermediaire diepte. Deze data zijn sterk gelinkt aan het voorkomen van de schelpkokerworm *Lañice conchilega*. Het is mogelijk dat het hier gaat om een biologisch effect door de kokers van de worm. De korrelgrootteverdeling van korrels in de kokers is ongeveer een factor twee grover dan die van het omringende sediment (Callaway 2003).

Ten opzichte van de analyse van de Zandmotor zijn de individuele soorten soms een beetje opgeschoven in het diagram van coëfficiënten versus scores op de eerste as (Figuur 4.4), maar het beeld is consistent. We zien ook hier een sterkere correlatie van de eerste as met

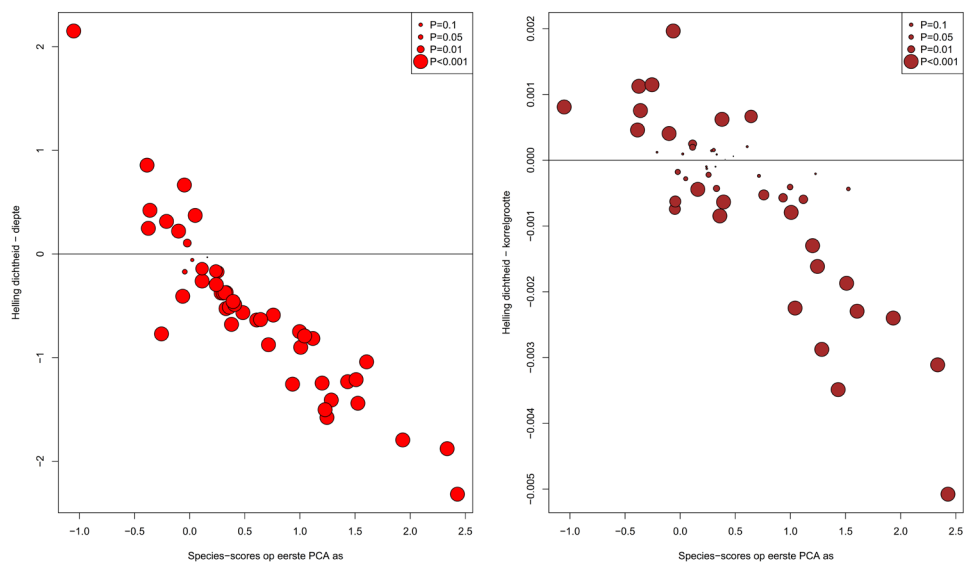
de respons op diepte dan met de respons op korrelgrootte. Ondanks de grotere dataset is de respons op korrelgrootte bij een heel aantal soorten zwak en niet significant.



Figuur 4.4 Analyse als in Figuren 4.2 en 4.3 voor de Zandmotor dataset, maar met gebruik van (loggetransformeerde) diepte als proxy voor bodemschuifspanning. De diepte is negatief gemaakt, zodat de x-as vergelijkbaar is met die uit de figuur met bodemschuifspanning, met de diepste locaties links en de ondiepste rechts.



Figuur 4.5 Respons van de soorten in de gecombineerde dataset, bestaande uit Zandmotor (donkerblauw), Ameland/Schiermonnikoog (rood), Natuurlijk Veilig 2018 (zwart) en Gerard Janssen (cyaan). Opbouw van de figuur als in Figuur 4.2. Negatieve log-getransformeerde diepte is gebruikt als proxy voor bodemschuifspanning.



Figuur 4.6. Relatie tussen de respons op de omgeving en de scores van de soorten op de eerste as van de PCA. Links respons op (getransformeerde) diepte als proxy voor bodemschuifspanning, rechts respons op mediane korrelgrootte. De punten geven de waarde van de regressiecoëfficiënt op de y-as. Grootte van de symbolen is evenredig met de significantie van de coëfficiënt.

Voor de meeste soorten geldt dat hun dichtheid toeneemt met toenemende diepte, en afneemt met toenemende mediane korrelgrootte. Er zijn meer soorten met een voorkeur voor diepe fijnzandige stations, dan voor andere combinaties van diepte en korrelgrootte. Monsters uit diepe fijnzandige stations hebben ook de hoogste soortendiversiteit. De borstelworm *Magelona* is een voorbeeld uit die groep van soorten (zie Figuur 4.3 links onderaan). In Ameland/Schiermonnikoog, waar het sediment fijner is dan elders, wordt de soort op geringere diepte gevonden dan in de andere datasets. Dat wijst op een interactie tussen diepte en korrelgrootte, die in Hoofdstuk 3 al was gezien in de Natuurlijk Veilig dataset (Figuur 3.4).

4.4 Hoe sterk kan een verandering van sediment de fauna veranderen?

De lineaire regressies uit de bovenstaande analyses laten toe het relatieve belang van bodemschuifspanning (via de proxy diepte) en van sedimentsamenstelling voor de dichtheid van de verschillende soorten kwalitatief te analyseren. Om na te gaan hoeveel verandering er kan voorkomen in de dichtheid of de kans van voorkomen van een soort bij een verandering van de sedimentsamenstelling, hebben we responscurves gefit die beter rekening houden met de niet-lineaire aard van de relaties. Hiervoor hebben we de kans van voorkomen van de verschillende soorten uitgedrukt als functie van de diepte en de mediane korrelgrootte in een logistische regressie. Aan- en afwezigheid van soorten is een maat die beter vergelijkbaar is tussen datasets dan numerieke dichtheid, omdat ze minder afhankelijk is van jaareffecten, seizoen van bemonstering en andere details die tussen datasets verschillen. De maat is gevoelig voor de grootte van de bemonsteringsapparatuur, maar die is in de verschillende datasets die hier zijn gebruikt ongeveer gelijk, omdat alle data gebaseerd zijn op monsters met een oppervlak van ongeveer 0,1 m².

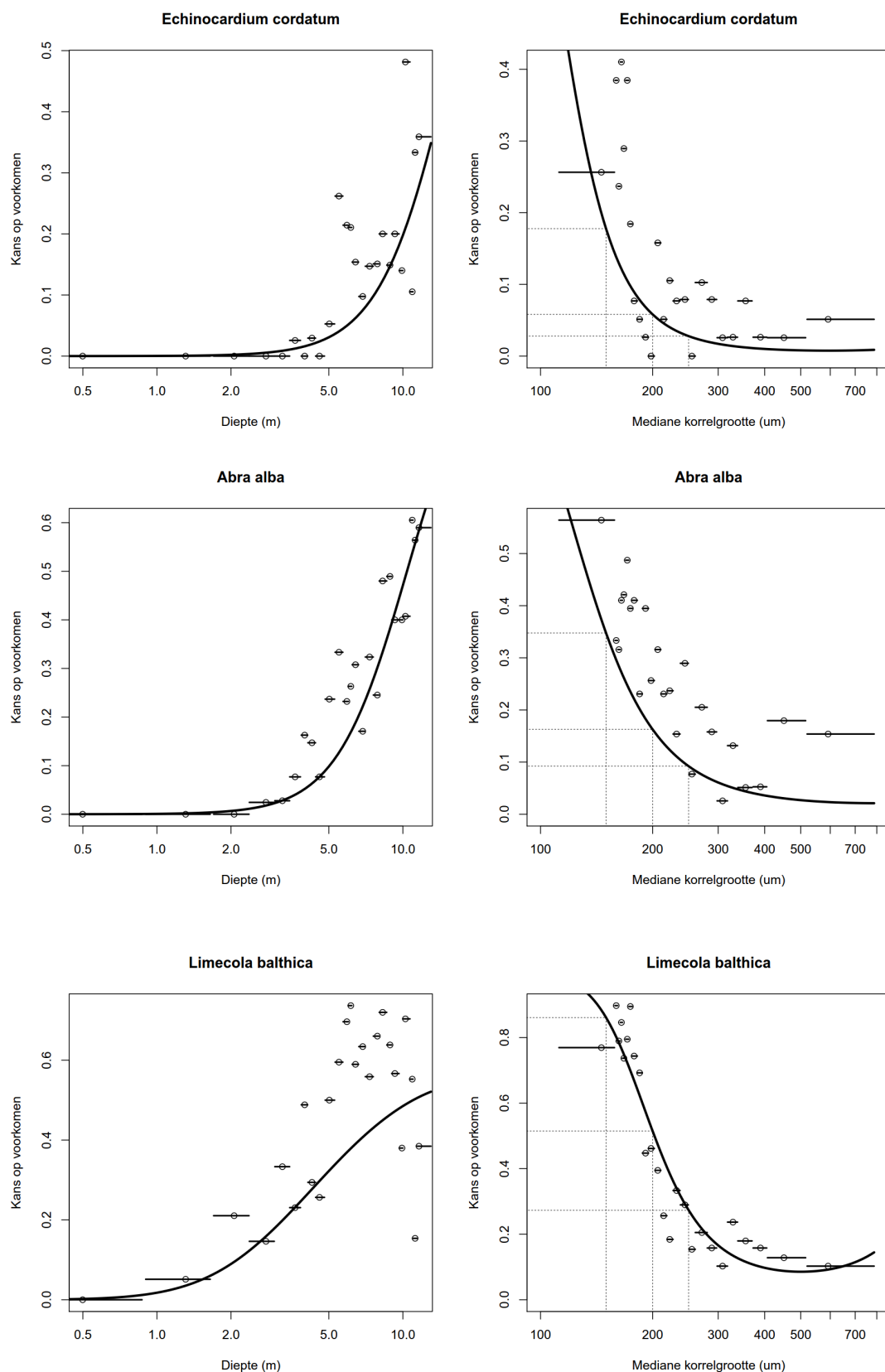
De logistische regressies gebruiken log-getransformeerde diepte en mediane korrelgrootte als onafhankelijke variabelen. Zowel lineaire als kwadratische termen zijn gebruikt, maar interactietermen zijn niet gebruikt. Het optimale model is gekozen op basis van de minimale AIC waarde.

Overeenkomend met de lineaire analyse, zijn er grote verschillen in de mate waarin de kans op voorkomen van de soorten afhangt van de sedimentsamenstelling. Van de 49 soorten waren er 7 waarin sediment geen enkele significante bijdrage leverde aan de verklaring van de variantie. Bij ongeveer de helft van de overblijvende soorten was de invloed beperkt. Sterke invloed was ongeveer gelijk verdeeld in een tiental soorten met een sterke voorkeur voor fijn sediment, en ongeveer tien soorten met een voorkeur voor intermediair (300-400 µm) of relatief grof (> 400 µm) zand.

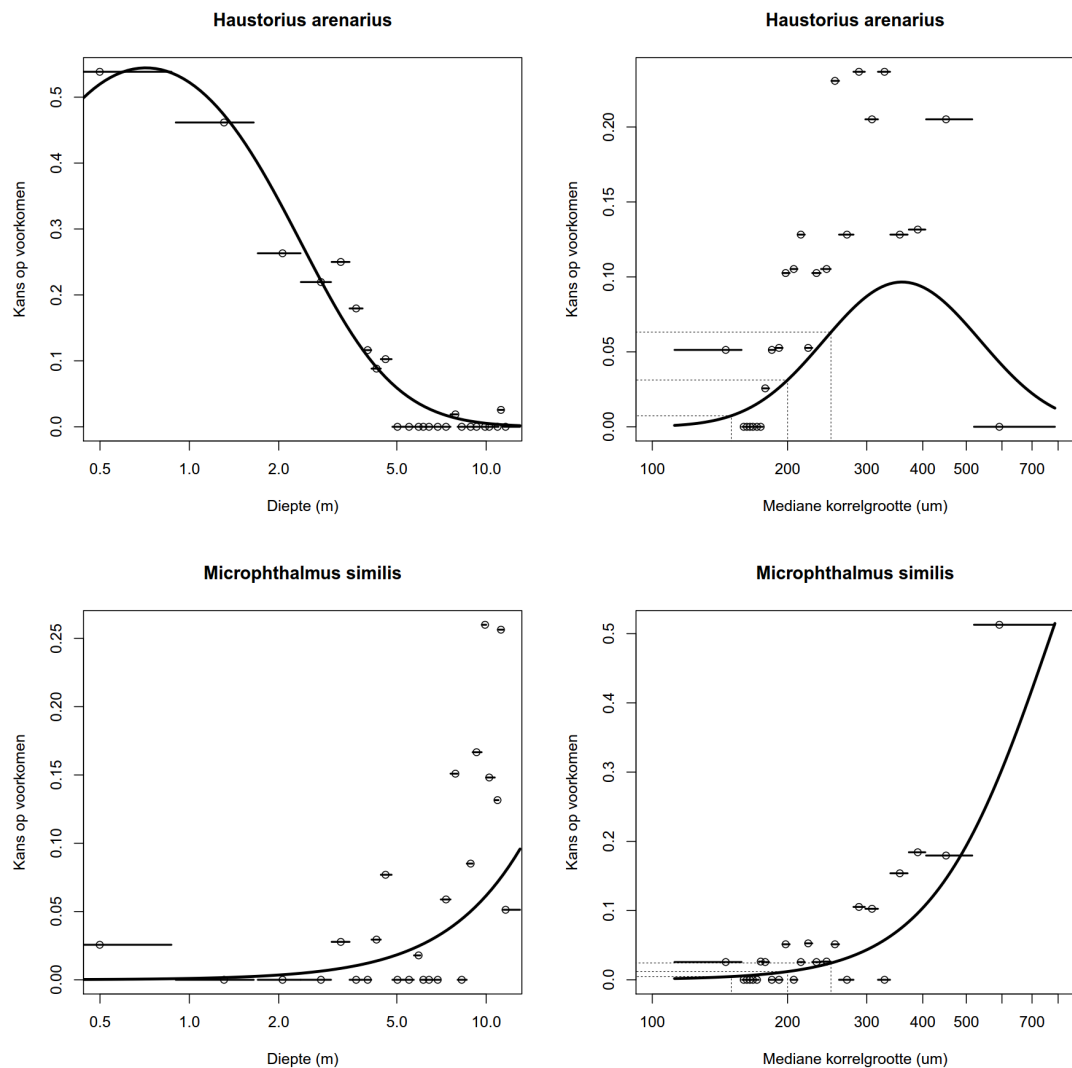
De zeeklit *Echinocardium cordatum*, witte dunschaal *Abra alba* en nonnetje *Limecola balthica* zijn voorbeelden van soorten met een sterke voorkeur voor fijn sediment (Figuur 4.7). De lijnen in de figuren bij 150, 200 en 250 µm mediane korrelgrootte tonen dat de verwachte kans op voorkomen van de soorten over deze range van mediane korrelgrootte kan afnemen met een factor 4 tot 6. Het grensgebied rond 200 µm was ook naar voren gekomen bij de analyse van de Natuurlijk Veilig campagnes (Figuur 3.4). Bij deze korrelgrootte zou een vergroving van enkele µm per jaar, als die over meerdere decennia gestaag zou worden volgehouden, merkbare effecten kunnen hebben op een aantal kernsoorten van tamelijk stabiele, relatief diepe en rustige habitats met fijn sediment. Zo'n verschuiving is overigens veel groter dan het effect van suppleties dat verwacht wordt volgens de ordegrrootte schattingen in §2.3.3. Bij grovere korrelgroottes, vanaf ongeveer 250 µm mediane korrelgrootte (wat nog steeds als relatief fijn zand geldt), heeft een verdere vergroving naar verwachting heel weinig effect op deze soorten met een voorkeur voor fijn zand.

Bij de soorten met een voorkeur voor intermediaire of grove korrelgrootte, komen twee types voor. De soorten die typisch zijn voor de brandingszone, bijvoorbeeld het vlokreeftje *Haustorius arenarius*, vertonen gewoonlijk een optimumcurve als respons op korrelgrootte (Figuur 4.8). Dit kan een gevolg zijn van het feit dat de grofste sedimenten (> 500 µm) meestal op grotere diepte zijn gevonden waar deze soorten niet voorkomen, waardoor het in

de responscurves ten onrechte als een negatieve respons op korrelgrootte kan voorkomen. De stijging van de kans op voorkomen vanaf een korrelgrootte van 200 μm is echter een robuust kenmerk van de respons van deze soorten uit de brandingszone. Slechts weinig soorten hebben een voorkeur voor grotere diepte en tegelijk voor grof sediment. De borstelworm *Microphthalmus similis* is het meest uitgesproken voorbeeld (Figuur 4.8). Bij deze soort is de respons op korrelgrootte meer uitgesproken dan de respons op diepte. Dit is een kleine wormensoort die *interstitieel* leeft, d.i. in de ruimte tussen de zandkorrels. De interstitiële ruimtes zijn sterk afhankelijk van de korrelgrootte, wat verklaart waarom de respons van deze soort op korrelgrootte zo sterk is. *Microphthalmus similis* is vaak geassocieerd met een rijke fauna aan meiobenthische interstitiële soorten (Ashley & Marshall 2007), maar het aantal macrobenthische soorten in deze gemeenschappen is beperkt.



Figuur 4.7. Logistische regressie van aan-/afwezigheid van *Echinocardium cordatum*, *Abra alba* en *Limecola balthica* tegen diepte (links) en mediane korrelgrootte (rechts).



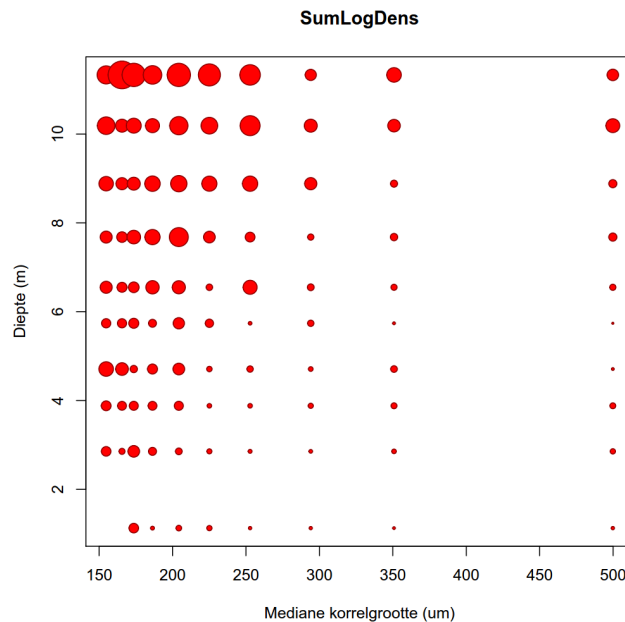
Figuur 4.8. Logistische regressie van aan-/afwezigheid van *Haustorius arenarius* en *Microphthalmus similis* tegen diepte (links) en mediane korrelgrootte (rechts).

4.5 Gemeenschapsrespons

In Figuur 3.4 werd, voor de campagnes van Natuurlijk Veilig, de som van log-getransformeerde dichtheden weergegeven als een functie van mediane korrelgrootte en diepte. Daarbij werd geconstateerd dat bij geringe diepte een scherpe overgang tussen rijke en arme stations wordt gevonden bij ongeveer 200 μm mediane korrelgrootte. Bij grotere diepte (8-12 m) lijkt die overgang te verschuiven naar grovere korrelgrootte (250-300 μm). Deze conclusie wordt bevestigd door de plot van de gehele dataset (Figuur 4.7). Binnen een klasse van mediane korrelgrootte (de horizontale as) neemt de diversiteit en dichtheid van bodemdieren (uitgedrukt in de gemiddelde som van log-getransformeerde dichtheden 'SumLogDens') toe met de diepte (verticale as), maar die toename is sterker bij de grove sedimenten (rechter kolommen) dan bij de fijne (linker kolommen). Omgekeerd, binnen iedere diepteklasse (verticale as) neemt de ecologische rijkdom af met toenemende mediane korrelgrootte, maar dat effect is vooral belangrijk bij de ondiepe stations (onderste rijen in de grafiek) en neemt af bij grotere diepte (bovenste rijen). Op grotere diepte kunnen gespecialiseerde gemeenschappen voorkomen voor grof zand, die niet in de brandingszone

worden gevonden. Daarom kan in die dieptezone de diversiteit ook in grovere sedimenten relatief hoog blijven.

Op geringere diepte, tot ongeveer 6 m, zien we een drastische afname van dichtheden (uitgedrukt in SumLogDens), wanneer de mediane korrelgrootte toeneemt met slechts enkele tientallen micrometers, in de range 210-250 μm . Bij grotere diepte, tussen 6 en 10m, komt die omslag bij iets grovere korrel te liggen, ongeveer 250-300 μm . In de diepste stations van de dataset (>10 m) is er een vermindering van de SumLogDens met korrelgrootte groter dan ongeveer 250 μm , maar die vermindering is gradueel en minder uitgesproken dan de vermindering bij geringere diepte.



Figuur 4.9. Gemiddelde som van log-getransformeerde dichtheden ("SumLogDens"), een maat voor diversiteit en dichtheid van de fauna, per diepte- en korrelgrootteklasse. De totale dataset is opgedeeld in 10 diepteklassen en 10 korrelgrootteklassen, waarbij ieder van de 10 klassen 1/10 van de waarnemingen telt. De observaties zijn geplotted tegenover de gemiddelde korrelgrootte (horizontale as) en gemiddelde diepte (verticale as) van de respectievelijke klassen. De grootte van de symbolen geeft de som van log-getransformeerde dichtheden weer op een relatieve schaal (grotere symbolen = hogere SumLogDens).

5 Slotbeschouwing

Dit rapport gaat in op belangrijke openstaande vragen over de cumulatieve effecten van suppleties op de vooroever, met de nadruk op de middellange en lange termijn (jaren tot decennia). Die vragen betreffen fysische en ecologische processen, waarover bij de aanvang van Natuurlijk Veilig vragen zijn geformuleerd: (i) over de koppeling tussen fysische omgevingsfactoren (o.a. korrelgrootte) en benthos en vis, (ii) over de langetermijneffecten van suppleties op het sorteringsmechanisme van sediment en de bankendynamiek. Daarnaast waren er bij aanvang van Natuurlijk Veilig vragen geformuleerd over ecologische processen, zoals over voedselwebinteracties en het belang van de vooroever voor vis (Herman *et al.* 2016).

Dit rapport besteedt vooral aandacht aan de ondiepe kustzone vanaf het strand tot een diepte van ca. 10 m. De analyses zijn grotendeels gebaseerd op resultaten van fysische modellen en meetgegevens van sediment en bodemdieren. Als aanvulling op de data uit vroegere meetcampagnes waren er twee meetcampagnes die in het kader van Natuurlijk Veilig zijn uitgevoerd in 2017 en 2018. De resultaten geven meer inzicht in de relaties tussen de gradiënten in fysische parameters in de vooroever en het effect daarvan op de bodemdiergemeenschap.

Helaas ontbreekt het aan betrouwbare lange tijdseries (over een periode van meerdere decennia) van de ontwikkeling van sedimentsamenstelling en bodemdieren in de ondiepe kustzone. Zulke tijdseries zouden beter inzicht kunnen geven in opgetreden veranderingen sinds het begin van het grootschalige suppletieprogramma. Aanbevolen wordt om in ieder geval de sedimentsamenstelling in de vooroever op regelmatige basis te gaan monitoren, omdat die data de grootste lacune vertonen.

Sedimentsamenstelling kustzone

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van processen die de sedimentsamenstelling in de ondiepe kustzone beïnvloeden. De Delflandse kust is hierbij als voorbeeld gebruikt, omdat er relatief veel kennis is over dit deel van de Hollandse kust en het een aaneengesloten kust is die vrij uniform is in kustlangse richting. Het blijkt dat een langetermijnverandering van de bodemsamenstelling niet kan worden vastgesteld met de beschikbare data. Door verschillen in de meetmethode zijn sedimentgegevens van TNO van vóór 1990 niet vergelijkbaar met de gegevens van latere jaren. Ruwe (ordegrootte) schattingen doen verwachten dat de toevoer van zand middels suppleties op lange termijn (tientallen jaren) enigszins zou kunnen bijdragen aan een verandering van de sedimentsamenstelling. Als er stelselmatig en langdurig gesuppleerd wordt met zand dat grover van samenstelling is dan het gemiddelde zand in de ondiepe kustzone kan dat op termijn van decennia tot enige (maar niet heel grote) vergroving van het sediment leiden. Het werkelijke effect zal natuurlijk sterk afhangen van de uitvoering van suppleties gedurende die decennia. Deze vergroving is te beperken door de korrelgrootte van het suppletiezand niet te veel te laten afwijken van het natuurlijke sediment in die zone.

Samenstelling bodemdiergemeenschap

Er is een analyse gedaan van zowel bestaande, oudere, datasets als twee jaar recente bemonsteringen van bodemdieren (van Natuurlijk Veilig). Doel is inzicht te krijgen in de mate waarin omgevingsfactoren als diepte, bodemschuifspanning door golven en stroming en korrelgrootte van het sediment de samenstelling van de bodemdiergemeenschap beïnvloeden. Deze analyse is lastig omdat die omgevingsfactoren met elkaar samenhangen, waardoor de afzonderlijke bijdrage moeilijk te onderscheiden is.

Zowel binnen de individuele datasets als in de samengestelde dataset voor de Nederlandse kust, is hydrodynamische stress, die sterk gekoppeld is aan diepte in het profiel van de

vooroever, de belangrijkste factor die de samenstelling van de bodemdierfauna bepaalt. Dat blijkt uit de analyse van de individuele datasets (Hoofdstuk 3; Holzhauer *et al.* (2009), Holzhauer *et al.* (2019); Herman *et al.* (2021); Janssen & Mulder (2005)) maar ook uit de analyse van de gecombineerde dataset. Het is opvallend dat in de gecombineerde dataset de hydrodynamische stress, en niet het onderscheid tussen de verschillende datasets waaruit de combinatie is opgebouwd, dominant was in de ordinatie-analyse. Dit wijst er op dat fysische gradiënten, bijvoorbeeld in hydrodynamische stress of sedimentsamenstelling, belangrijker waren dan geografische verschillen tussen datasets in het verklaren van de samenstelling van de bodemdierfauna.

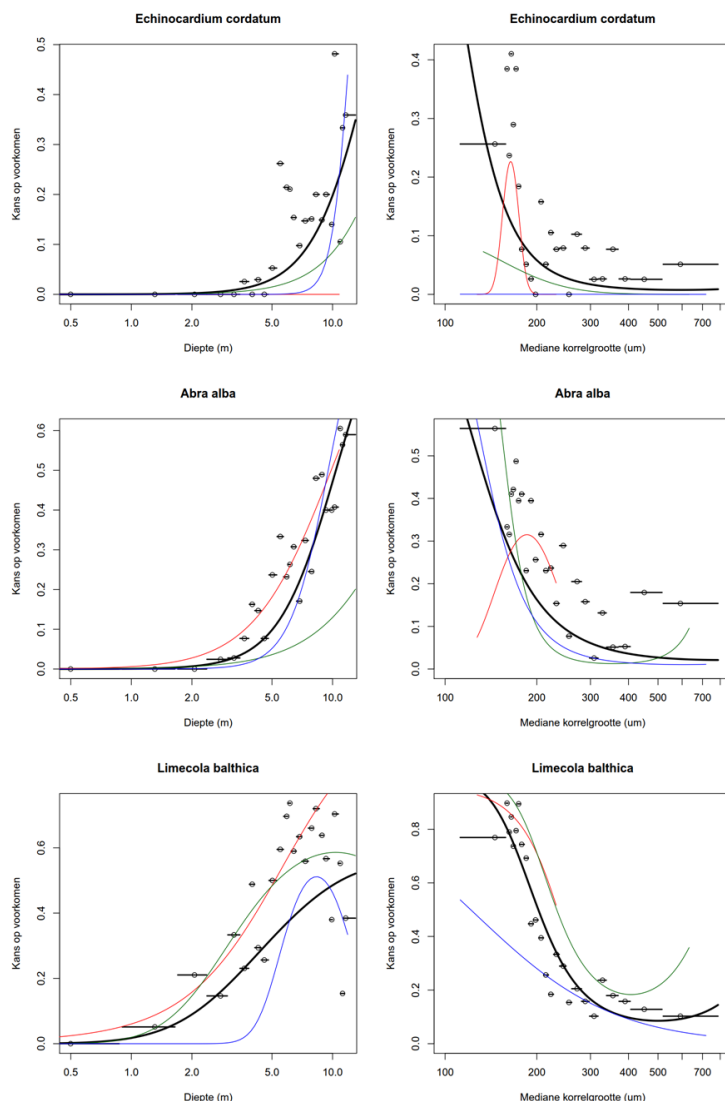
De grafieken per soort zoals die in Figuur 4.5 zijn gebruikt, tonen aan dat de verschillende datasets complementair zijn: ze bezetten andere deelgebieden van het korrelgrootte/diepte vlak. De responsen van de soorten zijn gelijkaardig tussen de verschillende datasets, wat betekent dat de conclusies over de relaties tussen omgevingsfactoren en bodemdieren robuust zijn.

Het is bijna onmogelijk om de identiteit van de datasets (herkomst van de data) op te nemen als een verklarende factor in het statistische model. Dat is voornamelijk te wijten aan het verschil tussen de verschillende regio's voor wat betreft de range aan mediane korrelgroottes en (waarschijnlijk, maar niet gekwantificeerd) de range aan fysische omstandigheden. Bovendien zijn de monsters in verschillende jaren genomen, wat eveneens aanleiding kan geven tot verschillen in het voorkomen van de soorten (zie Hoofdstuk 3). Als de identiteit van de dataset in het statistische model zou worden opgenomen als een verklarende factor, zou een onontwarbare vermenging ontstaan van deze factor met de hier onderzochte factoren diepte en korrelgrootte.

Om toch een idee te vormen van de verschillen tussen de datasets zijn in Figuur 5.1 de afzonderlijke responscurves per dataset opgenomen voor de drie soorten die zijn geanalyseerd in Figuur 4.5. Deze soorten, die allemaal relatief diep voorkomen, waren niet vertegenwoordigd in de dataset van Gerard Janssen (Bijlage B), waardoor die dataset in het overzicht ontbreekt. De respons op diepte komt over het algemeen goed overeen tussen de datasets. Voor korrelgrootte was de range in de EGS dataset van Ameland/Schiermonnikoog zeer beperkt, wat aanleiding gaf tot een afwijkende vorm van de curves, hoewel het niveau in deze dataset goed overeenkomt met wat kan worden verwacht op basis van de andere datasets. Hoewel in de precieze kwantitatieve uitwerking variabel, is de gerapporteerde respons van de bodemdiergemeenschap op bodemschuifspanning en korrelgrootte robuust voor de verschillen tussen datasets. Ook op gemeenschapsniveau (Figuur 4.7) is het patroon in de gezamenlijke dataset consistent en komt het goed overeen met het beeld binnen de afzonderlijke datasets.

Effecten bodemschuifspanning en korrelgrootte

De respons van de fauna op bodemschuifspanning, vooral veroorzaakt door golven, is goed bekend uit studies van de fauna van de vooroever van Noordzeekusten (Janssen & Mulder 2005, Speybroeck *et al.* 2006, Dalfsen 2007, Markert *et al.* 2015, Kröncke *et al.* 2018, Holzhauer *et al.* 2019). In de meeste studies die zich concentreren op een enkel gebied is de relatie met korrelgrootte veel moeilijker te bepalen. Vaak is de range aan korrelgroottes beperkt. Bovendien correleert de mediane korrelgrootte binnen een gebied sterk met de fysische verstoring. Langs een dieptegradiënt worden grovere korrels gevonden in de brandingszone en op de toppen van de brekerbanken (Holzhauer *et al.* 2020). Het voordeel van de gecombineerde dataset is dat een bredere range aan omstandigheden is gevonden, die minder sterk met de diepte is gecorreleerd. Of er in de gecombineerde dataset wel een correlatie is met bodemschuifspanning is helaas niet na te gaan, omdat geen precieze schattingen van bodemschuifspanning voor de gebieden konden worden afgeleid.



Figuur 5.1. Responscurves per dataset voor de soorten die zijn geanalyseerd in Figuur 4.5. Kleurcodering: rood: EGSi, blauw: zandmotor, groen: EGSII.

Belang van korrelgrootte

De relatie tussen korrelgrootte en samenstelling van de fauna is complex en moeilijk te achterhalen. Korrelgrootte heeft op minstens twee verschillende manieren een relatie met de fauna. Enerzijds kan er een directe relatie bestaan omdat de korrelgrootte van het sediment direct ingrijpt op de levenswijze van de dieren. De borstelworm *Microphthalmus similis* is daarvan een voorbeeld. Deze soort heeft grove sedimenten nodig omwille van zijn interstitiële levenswijze. Anderzijds worden soorten beïnvloed door fysische krachten op het sediment, omdat deze bepalen hoe mobiel de korrels zijn, hoe hoog de stroomribbels worden en hoe stabiel gangen kunnen blijven. Die fysische krachten zijn zelf weer gecorreleerd met de samenstelling van het sediment. Grove sedimenten worden niet gevonden op plaatsen met lage fysische krachten, omdat daar fijne korrels accumuleren en niet opgewerveld worden. Dit kan leiden tot een correlatie tussen fauna en sedimentsamenstelling die causaal verloopt via de fysische krachten die op de bodem worden uitgeoefend. De situatie wordt nog verder gecompliceerd omdat mobiliteit van de korrels, voor een vaste bodemschuifspanning, ook afhankelijk is van de korrelgrootte. Er zijn sterkere krachten nodig om grovere korrels te mobiliseren. Dit complex van causale relaties is moeilijk te onderscheiden.

Er is een uitgebreid onderzoek naar de relatie tussen korrelgrootte en voorkomen van fauna in estuariene condities uitgevoerd door Cozzoli *et al.* (2013). Hij maakte een vergelijking tussen Oosterschelde en Westerschelde. In de slibrijke Westerschelde hebben de meeste soorten hun optimum bij een lagere mediane korrelgrootte dan in de slibarme Oosterschelde. Wellicht is het slibgehalte van het sediment in de Westerschelde hoger bij een zelfde bodemschuifspanning dan in de Oosterschelde. Sommige soorten (bv. de wadpier *Arenicola marina*) blijken hetzelfde optimum in beide wateren te hebben, omdat de fysische eigenschappen van het sediment zelf (in het geval van *Arenicola marina* de doorlatendheid van het sediment voor waterstroming) dominant is over de indirecte afhankelijkheid via bodemschuifspanning. Door bodemschuifspanning (in het geval van de Zandmotor) of diepte als de proxy daarvan, tezamen op te nemen in een multivariaat regressiemodel, heeft deze studie (Hoofdstuk 4) aangetoond dat korrelgrootte van het sediment voor veel (maar niet alle) soorten een onafhankelijke bijdrage heeft in het verklaren van het voorkomen van de soort.

Mogelijke effecten suppleties

De onderliggende vraag voor deze studie was of veranderingen in korrelgrootte als gevolg van suppleties gevolgen hebben voor de bodemdiergemeenschap. De resultaten geven hier geen definitief antwoord op. Er lijkt wel een relatie te zijn, maar deze relatie is niet eenduidig langs de dieptegradiënt van de vooroever.

In de brandingszone zijn de meeste soorten niet sterk afhankelijk van de korrelgrootte van het sediment voor hun voorkomen. Deze soorten zijn gespecialiseerd in het omgaan met de sterke verstoring door de branding en hebben vaak een sterk vermogen te ontsnappen naar de waterkolom, of zich zeer snel in te graven na verstoring van het sediment. Het vlokreeftje *Haustorius arenarius* (Figuur 4.6) is daarvan een voorbeeld. We vonden een zwakke of geen afhankelijkheid van de korrelgrootte bij alle soorten van de ondiepe vooroever. Toch blijkt uit Figuur 4.7 dat ook voor de ondiepe zones de diversiteit en totale dichtheid afnemen met toenemende korrelgrootte. Wellicht is deze gemeenschapsrespons te wijten aan een correlatie tussen korrelgrootte en de sterkte van de fysische verstoring, waarbij locaties met sterkere verstoring een grovere sedimentsamenstelling en een armere fauna hebben. Suppleties kunnen wellicht de korrelgrootte van het sediment veranderen, als zand wordt gebruikt met een afwijkende korrelgrootte. Ze veranderen echter weinig aan de fysische stress op het sediment. Het is dan ook niet te verwachten dat een artificiële vergroving van het sediment als gevolg van suppleties aanleiding zal geven tot een sterke verarming van de fauna in de ondiepe vooroever. De soorten die in de ondiepe vooroever voorkomen zijn immers ongevoelig voor korrelgrootte. Er zou, theoretisch gesproken, wel een effect kunnen zijn als een vergroving van het sediment aanleiding geeft tot een versteiling van het profiel en daardoor tot een toename van de bodemschuifspanning, maar dit zou een tweede-orde effect zijn.

In het diepere (> 6m) deel van de vooroever vertonen de meeste soorten een negatieve respons op vergroving van het sediment, maar er zijn uitzonderingen omdat er ook gespecialiseerde soorten van grover sediment voorkomen. Ook hier wordt een afname van de diversiteit en dichtheid geobserveerd in grovere sedimenten. Waar het sediment relatief grof is, ontbreken soorten uit de *Abra alba* (witte dunschaal) en *Limecola balthica* (nonnetje) gemeenschappen. Zij worden deels vervangen door soorten als de borstelworm *Nephtys cirrosa*, spionide polychaeten, krabben, aasgarnalen en gespecialiseerde interstitiële soorten. Dit zijn over het algemeen gemeenschappen met een lagere dichtheid en diversiteit. Door het ontbreken van de grotere schelpdieren zijn deze ook armer in biomassa. Omdat deze respons duidelijk samenhangt met de respons van de individuele soorten, is het waarschijnlijk dat artificiële vergroving van het sediment ook aanleiding zal geven tot verschuivingen in de fauna. Dat kan ecologische gevolgen hebben voor de rest van het voedselweb, maar informatie daarover kan uit deze studie niet worden afgeleid.

De responscurves van de soorten suggereren dat een vergroving van het sediment vrij sterke effecten kan hebben op de samenstelling van de gemeenschap als deze vertrekt van een relatief fijne korrelgrootte in de orde van 200 μm . Waar het sediment reeds grover is dan een mediane korrelgrootte van 300-350 μm , worden slechts weinig gevolgen verwacht van een verdere vergroving. Bij een mediane korrelgrootte van 200 μm heeft een vergroving in de orde van 50 μm waarschijnlijk significant effect op de gemeenschap.

Samenvattend wordt geconcludeerd dat vergroving van het sediment vooral gevolgen kan hebben voor de fauna van de vooroever als het optreedt in het diepere deel van de vooroever (> 6m) en bij een uitgangssituatie van relatief fijn zand (ordegrootte 200 μm). Er worden geen sterke effecten van vergroving verwacht in de brandingszone (<6 m diep), of op vooroeverprofielen die reeds een mediane korrelgrootte >300 μm hebben.

Op een iets ruimere geografische schaal dan de exacte locatie waar de suppletie plaatsvindt, zal een suppletie de korrelgroottesamenstelling weinig veranderen. Er is immers een verdunningseffect met de grote massa aanwezig sediment. Suppleties zullen daar op de korte termijn geen groot effect hebben op de bodemdiergemeenschap door veranderingen van korrelgrootte.

Wat de mogelijke relaties zijn tussen de samenstelling van de bodemdiergemeenschap en de visgemeenschap in de vooroever wordt de komende tijd verder uitgewerkt door de resultaten uit dit onderzoek te combineren met het onderzoek aan de visgemeenschap dat door Wageningen Marine Research is uitgevoerd (Van Hal et al., 2021) in een afsluitend synthesesrapport.

- Ashley, M. & C. Marshall (2007). *Hesionura elongata* and *Microphthalmus similis* with other interstitial polychaetes in infralittoral mobile coarse sand. In: Tyler-Walters H. & Hiscock K. (eds), Marine Life Information Network: Biology and Sensitivity Key Information Reviews, [on-line]. Plymouth, Marine Biological Association of the United Kingdom.
- De Bakker & B.J.A. Huisman (2019). Invloed suppleties op bodemsamenstelling. Modelleren van verandering in korrelgrootte. Deltares rapport 1201431-001-ZKS-0018.
- Callaway, R. (2003). Ecological studies of the tube-building polychaete *Lanice conchilega*. PhD thesis, Swansea University.
- Colosio, F., M. Abbiati & L. Airoidi (2007). Effects of beach nourishment on sediments and benthic assemblages. Marine Pollution Bulletin 54: 1197-1206.
- Cozzoli, F., T.J. Bouma, T. Ysebaert & P.M.J. Herman (2013). Application of non-linear quantile regression to macrozoobenthic species distribution modelling: comparing two contrasting basins. Marine Ecology Progress Series 475: 119-133.
- Dalfsen, J.A. van (2007). Inventarisatie brandingszone. IMARES, Den Helder. Rapport C138/07, 55 pp.
- De Groen, F., V. van Zelst, L. van der Valk & B. Arens (2019). Natuurlijk Veilig door Kust- en Zeereepbeheer. Delft, Deltares, rapport nr. 11203683-002-ZKS-0014, 73 pp.
- Eisma, D. (1968). Composition, origin and distribution of Dutch coastal sands between Hoek van Holland and the Island of Vlieland. Netherlands Journal of Sea Research 4:123-267.
- Folmer, E.O., A. Dekinga, S. Holthuisen, J. Van der Meer, D. Mosk, T. Piersma & H. Van der Veer (2017). Species Distribution Models of Intertidal Benthos - Tools for Assessing the Impact of Physical and Morphological Drivers on Benthos and Birds in the Wadden Sea. Texel, NIOZ Royal Netherlands Institute for Sea Research, 114 pp.
- Gibson, R. N. & L. Robb (1992). The relationship between body size, sediment grain size and the burying ability of juvenile plaice, *Pleuronectes platessa*. Journal of Fish Biology 40: 771-778.
- Guillén, J. & P. Hoekstra (1996). The "equilibrium" distribution of grain size fractions and its implications for cross-shore sediment transport: A conceptual model. Marine Geology 135: 15-33.
- Herman, P.M.J., H. Meijer-Holzhauer, S.A. Vergouwen, J. Wijsman and M. Baptist (2016). Ecologische effecten van kustsuppleties. Systeembeschrijving (deel A), onderzoeksprioriteiten (deel B) en ontwerp uitvoeringsplan (deel C). Deltares.
- Herman, P.M.J., J.J.S. Moons, J.W.M. Wijsman, A.P. Lujendijk & T. Ysebaert (2021). A Mega-Nourishment (Sand Motor) Affects Landscape Diversity of Subtidal Benthic Fauna. Frontiers in Marine Science 8: 605.
- Holland, K.T. & P.A. Elmore (2008). A review of heterogeneous sediments in coastal environments. Earth-Science Reviews 89: 116-134.
- Holzhauer, H., B. van der Valk, J. van Dalfsen, M.J. Baptist & G. Janssen (2009). Ecologisch gericht suppleren, nu en in de toekomst. Het ontwerp meerjarenplan voor monitoring en (toepassingsgericht) onderzoek Delft, Deltares, 1200689-000-ZKS-0009, 67 pp.

- Holzhauser, H., B.W. Borsje, J.A. van Dalfsen, K.M. Wijnberg, S.J.M.H. Hulscher & P.M.J. Herman (2020). Benthic Species Distribution Linked to Morphological Features of a Barred Coast. *Journal of Marine Science and Engineering* 8: 16.
- Huisman, B. J. A., M.A. de Schipper & B.G. Ruessink (2016). Sediment sorting at the sand motor at storm and annual time scales. *Marine Geology* 381: 209–226.
- Huisman, B. J. A., B.G. Ruessink, M.A. de Schipper, A.P. Luijendijk & M.J.F. Stive (2018a). Modelling of bed sediment composition changes at the lower shoreface of the Sand Motor. *Coastal Engineering* 132: 33–49.
- Huisman, B.J.A., E. Quataert & J.A.A. Antolinez (2018b). Sedimentbalans Delflandse kust. Analyse van morfologische verandering en sedimenttransport rond de Zandmotor in de periode 2011 tot 2018. Deltares rapport 11201431-001-ZKS-0008.
- Inman, D. L. (1953). Areal and seasonal variations in beach and nearshore sediments at La Jolla, California. Technical report, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Technical Memorandum 39.
- Janssen, G. & S. Mulder (2005). Zonation of macrofauna across sandy beaches and surf zones along the Dutch coast. *Oceanologia* 47: 265-282.
- Katoh, K. & S. Yanagishima (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*, pages 639–650, Gdansk, Poland. Am. Soc. of Civ. Eng.
- Knaapen, M.A.F., H. Holzhauser, S.J.M.H. Hulscher, M.J. Baptist, M.B. de Vries & M. van Ledden (2003). On the modelling of biological effects on morphology. *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Barcelona: 773–783.
- Kohsiek, L. (1985). De korrelgrootte karakteristiek van de zeereep (stuifdijk) langs de Nederlandse kust. Nota WWKZ-84G.007, Rijkswaterstaat.
- Kröncke, I., L.R. Becker, T.H. Badewien, A. Bartholomä, A.-C. Schulz & O. Zielinski (2018). Near- and Offshore Macrofauna Communities and Their Physical Environment in a South-Eastern North Sea Sandy Beach System. *Frontiers in Marine Science* 5: 497.
- Markert, E., I. Kröncke & A. Kubicki (2015). Small scale morphodynamics of shoreface-connected ridges and their impact on benthic macrofauna. *Journal of Sea Research* 99: 47-55.
- McLachlan, A. (1996). Physical factors in benthic ecology: Effects of changing sand particle size on beach fauna. *Marine Ecology Progress Series* 131:205–217.
- Moutzouris, C. I., N.C. Kraus, K.J. Gingerich & D.L. Kriebel (1991). Beach profiles versus cross-shore distributions of sediment grain sizes. *Advances in Coastal Modeling*, pages 860–874. American Society of Civil Engineers, New York, NY.
- Ojeda, E., B.G. Ruessink & J. Guillen (2008). Morphodynamic response of a two barred beach to a shoreface nourishment. *Coastal Engineering* 55: 1185–1196.
- Perdon, K.J., K. Troost, J. van Zwol, M. van Asch & J. van der Pool (2019). Schelpdierbestanden in de Nederlandse kustzone in 2019. Stichting Wageningen Research, Centrum voor Visserijonderzoek (CVO), IJmuiden, CVO rapport nr. CVO rapport: 19.010, 50 pp.
- Projectgroep MER Loswal Noord (1995). Een nieuwe Loswal Noord voor het lossen van baggerspecie in zee? Milieueffectrapport Verkeer en Waterstaat Zuid-Holland & Gemeentelijk Havenbedrijf.

- R Core Team (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing.
- Richmond, B. M. & A.H.J. Sallenger (1984). Cross-shore transport of bimodal sands. Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering, 2: 1997-2008.
- Rijkswaterstaat (2018). Bemonstering van macrozoöbenthos en sediment in het litoraal en sublitoraal in mariene wateren. Methode: Reineck boxcorer, Van Veen happer, Hamon happer, Vacuüm steekbuis, Steekbuis Den Haag, Rijkswaterstaat. 913.00.B200, versie 7
- Rijkswaterstaat (2019). De JAaRijks KUSTmetingen JARKUS.
- Speybroeck, J., D. Bonte, W. Courtens, T. Gheschiere, P. Grootaert, J.-P. Maelfait, M. Mathys, S. Provoost, K. Sabbe, E.W.M. Stienen, V.V. Lancker, M. Vincx & S. Degraer (2006). Beach nourishment: an ecologically sound coastal defence alternative? A review. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 16: 419-435.
- Stauble, D. K. & M.A. Cialone (1996). Sediment dynamics and profile interactions: Duck94. Coastal Engineering 4: 3921–3934.
- Terwindt, J.H.J. (1962). Study of grain size variations at the coast of Katwijk 1962 (in Dutch). Report K-324, Rijkswaterstaat, The Hague, The Netherlands.
- Van Alphen (1987a). Morfologie en lithologie van brandingszone tussen Ter Heijde en Egmond. Rapportage Rijkswaterstaat Directie Noordzee.
- Van Alphen (1987b). Slibvoorkomens op het Nederlands en Belgisch deel van het Continentaal Plat. Kaart van het zuidelijke deel van de Nederlandse Noordzee.
- Van den Brunt, J.D. (2000). Metingen op Loswal Noord van momentane stroom, reststroom en troebelheid. WL | Delft Hydraulics rapport B0472.
- Van Duin, M.J.P., N.R. Wiersma, D.J.R. Walstra, L.C. van Rijn & M.J.F. Stive. Nourishing the shoreface: Observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands. Coastal Engineering 51: 813–837.
- van Hal, R., B. Couperus, A. Dijkman-Dulkes & M. Baptist (2017). Reisverslag kustsurvey EGSII. Wageningen Marine Research. Den Helder, rapport nr. C075.17, 25 pp.
- Van Hal, R. & A. Dijkman Dulkes (2018). Reisverslag kustsurvey EGSII : Juni 2018. Wageningen Marine Research, Den Helder, rapport nr. C076.18, 21 pp.
- van Hal, R., J. Volwater, F. Soudijn & I. Tulp (2021). Visecologie in de vooroever. Wageningen Marine Research, IJmuiden, WMR rapport C077/21, 133 pp.
- van Rijn, L. C. (1997). Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland. Coastal Engineering, 32: 61–90.
- 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.
- Wijsman, J.W.M., R. van Hal, R. & R.H. Jongbloed (2015). Monitoring en Evaluatie Pilot Zandmotor - Fase 2 Evaluatie benthos, vis, vogels en zeezoogdieren 2010 – 2014. IMARES rapport C125/15.

A Kaart met voorkomen slib (Van Alphen, 1987b)



B Data studies

B.1 Sediment-data

Terschelling 1993-1997

NOURTEC shoreface nourishment

Suppletie 2.1 miljoen m³, 4.4 km lang, 700 tot 1000 meter van de waterlijn.

Biegel, E.J. and Spanhoff, R., 1996. Effectivity of a shoreface nourishment, Terschelling, The Netherlands. National Institute for Coastal and Marine Management (RIKZ) and SEPRA bv.
Hoekstra et al, 1997 - Morphological development of the Terschelling shoreface nourishment in response to hydr and sed transport.

Guillen, Hoekstra, 1996 - Sediment Distribution in the Nearshore Zone, Grain Size Evolution in response to shoreface nourishment

Guillen, Hoekstra, 1996 - The equilibrium distribution of grain size fractions and its implications for cross-shore sediment transport, a conceptual model

Grunnet & Ruessink (2005)

Grunnet, Ruessink & Walstra (2005)

RIACON - Ecological effect of shoreface nourishment

Essink 1997, Van Dalfsen & Essink 1997) Beschikbaar via IHM

Noordwijk 1998

Suppletie 1.7 miljoen m³, 3 km lang, ongeveer 800 meter van de waterlijn.

B.2 Bodemdier-data

In 2016 is een inventarisatie gemaakt van potentieel beschikbare langetermijndata van benthos langs de Nederlandse kust. Ook zijn toen afspraken vastgelegd over de locatie van de data (opslag bij de bron) en de te gebruiken formats en standaarden (AQUO standaard volgens IMWA metingen).

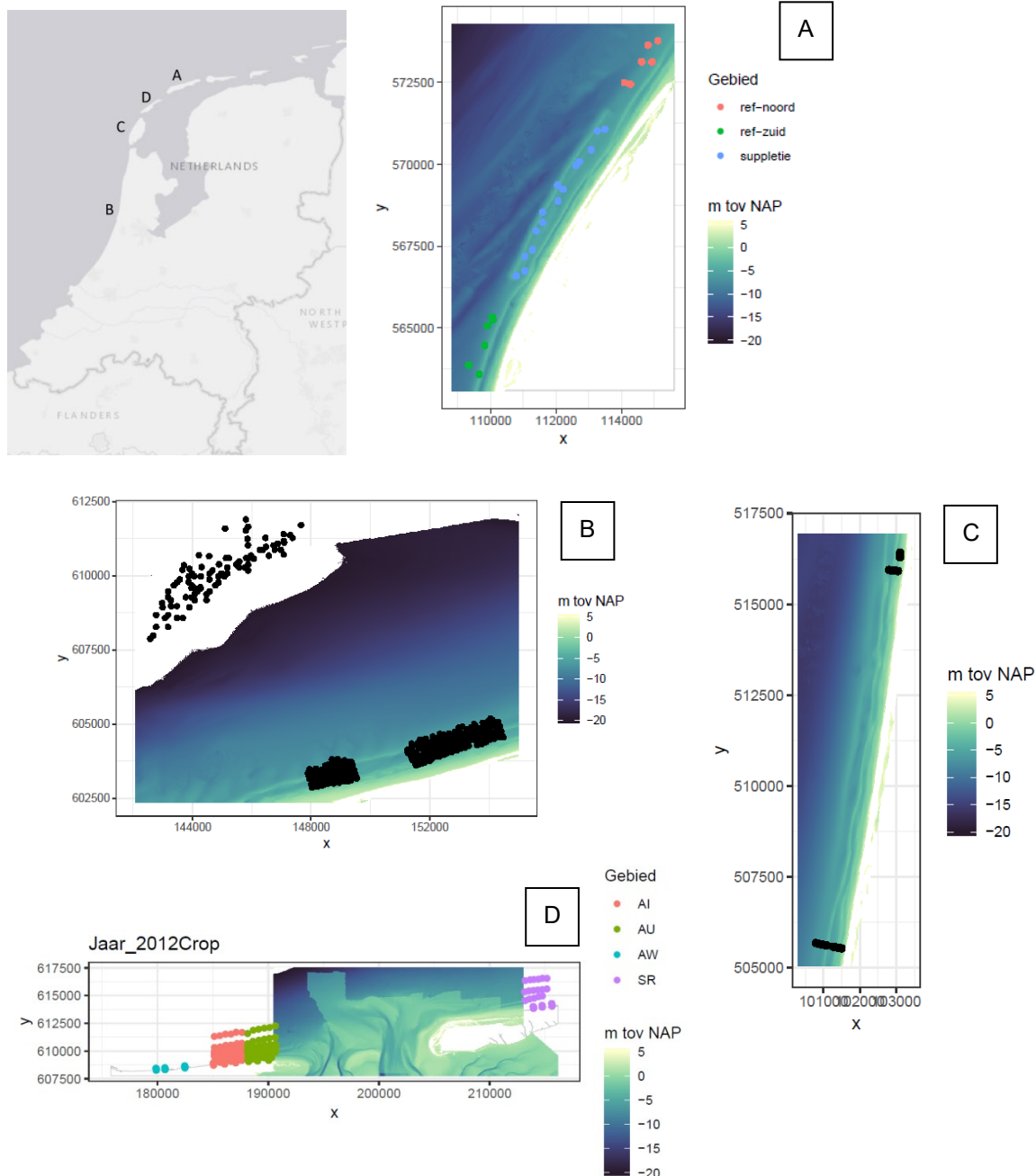
Vervolgens is in 2017-2018 gewerkt aan het beschikbaar krijgen van de data en het opwerken van de data naar het standaard format. Er is een gestandaardiseerde werkwijze ontwikkeld om een kwaliteitscontrole uit te voeren op de data.

Aanpak data controle en opwerking

Van de data die gelokaliseerd en toegankelijk waren, hadden sommige data nog een opwerkingsslag nodig. Daarnaast moesten de data gecontroleerd worden op consistentie en zijn er overzichten gemaakt van wat er in de datasets aanwezig is.

Er is gestart met de volgende datasets (nummer tussen haakjes correspondeert met dataoverzicht ANNEX B2-1):

- A. RIACON dataset (7) – Jan Van Dalfsen
- B. Castricum/Egmond dataset (11) – Gerard Janssen
- C. Texel dataset (12) – Mardik Leopold
- D. Ameland & Schiermonnikoog dataset (17) – EGSI



Figuur B1. Overzicht van monsterpunten per dataset met de ligging van de verschillende datasets: A) RIACON dataset (1993, 1995, 1997), B) Castricum/Egmond dataset (2002), C) Texel dataset (2002, 2003), D) Ameland dataset (2012 selectie)

Daarna is gewerkt aan de volgende datasets:

- E. PMR dataset (14) Van deze dataset is een versie beschikbaar via het IHM.
- F. Zandmotor dataset (18). Deze set is gecorrigeerd op fouten in lengte- en breedtegraden.
- G. De Milzon dataset (6) is opgewerkt naar de AQUO-standaard.

Voor bovenstaande zijn de volgende stappen ondernomen:

1. Data zijn omgezet indien nodig volgens AQUO standaard naar IMWA metingen. Daarnaast zijn bij datasets soorten en verduidelijkingen opgevraagd bij de bron wanneer dit nodig was.
2. Opgewerkte data zijn, indien nog niet beschikbaar op IHM op de Deltares repository beschikbaar gemaakt.
3. In R is een beschrijving en overzicht gemaakt van de verschillende datasets m.b.t. parameters in de datasets en locaties. Eventuele opmerkelijke dingen in de datasets zijn onderzocht en benoemd. Opgewerkte data zijn vervolgens opgeslagen om een vervolg aan te geven. Kolommen zonder data zijn verwijderd en er zijn kolommen met jaar toegevoegd. Deze aanpak is nu gestandaardiseerd voor elke dataset aan de hand van scripts. De uitwerking van deze stappen per dataset is weergegeven in ANNEX B.

Vervolgens is nog een verdere controle uitgevoerd na opwerking van bovengenoemde datasets, door een eerste analyse van de vergelijkbaarheid van soorten in de verschillende datasets. Zo is vergeleken of er in de verschillende datasets met verschillende soortnamen gewerkt wordt, en of er bijvoorbeeld kenmerkende soorten missen.

In het kader van het project PMR-NCV is een algemene soortenlijst ontwikkeld, die rekening houdt met opgetreden veranderingen in naamgeving en problemen bij determinatie en onderscheid van soorten. Daarmee is een meer robuuste lijst van soorten ontwikkeld, die waar van toepassing ook gebruikt wordt in Natuurlijk Veilig voor de data uit andere projecten. Een volledig overzicht van de historische datasets is opgenomen in Tabel B1.

Tabel B1 – overzicht historische datasets en beschikbaarheid

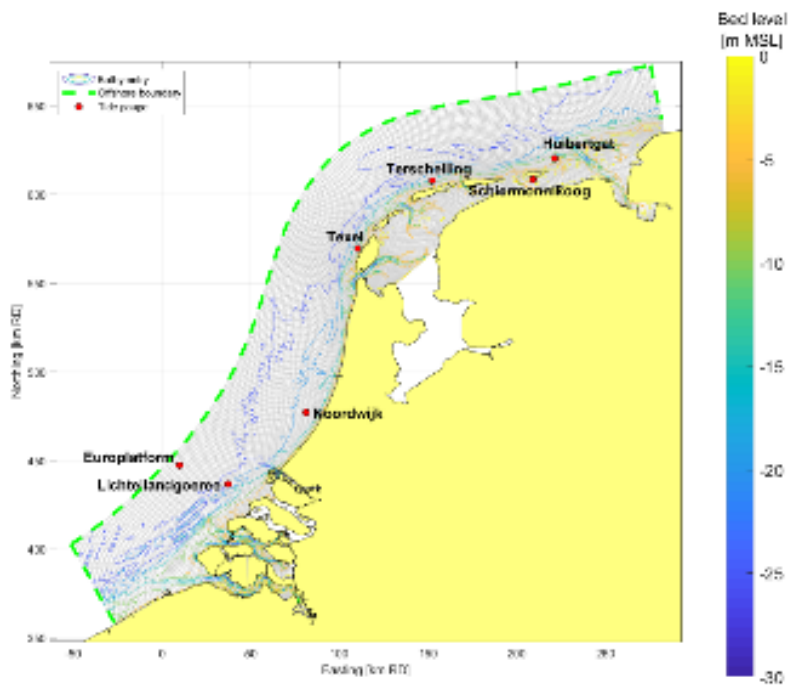
Nr	Year of monitoring	Topic	Location	Reference	Data digitaal?*
1	1970-present	Demersal Fish Survey	Dutch coast	Wageningen Marine Research	Ja bij WMR in Frisbee
2	1974-1985	RIVO fish surveys	Shallow Dutch coast	(Teal & Van Keeken, 2011)	Ja bij WMR in Frisbee
3	1980-1981	Ecological effect of beach nourishment	Ameland & Texel (Wadden coast)	(Dankers et al. 1983)	Nee. Rapport bevat grafieken van abundantie <i>Scolecopsis</i> . Data zijn niet meer terug te vinden (pers.med. Dankers/Meijboom)
4	1985	BISONS (Biologisch Sedimentologisch Onderzoek van het Nederlandse Strand)	Dutch coast	(Bos & Stolk, 1985)	Bij NIOZ?
5	1986-present	MWTL benthos monitoring	North Sea, Wadden Sea and the Delta Estuary	Rijkswaterstaat	Bij RWS. Beschikbaar via IHM
6	1988-1989	MILZON (milieuzonering)	Dutch coast	(Van Scheppingen & Groenewold 1990)	Bij RWS Data beschikbaar in Access database
7	1993-1997	RIACON - Ecological effect of shoreface nourishment	Terschelling (Wadden coast)	(Essink 1997, Van Dalfsen & Essink 1997)	Beschikbaar via IHM
8	1995-present	WOT-shellfish monitoring	Dutch coastal waters, usually deeper than 6 m	Wageningen Marine Research	Ja, bij WMR in benthos database Yerseke; Beschikbaar via IHM

Nr	Year of monitoring	Topic	Location	Reference	Data digitaal?*
9	2001	Long-term effects on the benthos of a sand extraction site – PUNAISE onderzoek	Coastal zone near Heemskerk (Holland coast)	(Van Dalfsen, 1998).	Nee , maar data kunnen handmatig uit de rapportage van 2001 overgeschreven worden.
				(Van Dalfsen & Lewis 2001)	
10	2001	<i>Spisula</i> survey	Noordzeekustzone Waddeneilanden	Leopold unpublished	Beschikbaar via IHM
11	2002	Ecology of the Dutch sandy coast	Nine locations of the Dutch coastal zone	(Janssen & Mulder 2004, Janssen & Mulder 2005)	Gedeeltelijk AQUO (benthos en epibenthos Castricum en Egmond). Strand en fysische data nog niet, wel op repository beschikbaar.
12	2002-2003	Ecological effect of shoreface nourishment (T0, T1, T2)	North Sea coastal zone at the west coast of Texel (Wadden coast)	(Leopold 2002a) (Leopold 2002b) (Leopold 2003)	Beschikbaar via IHM
13	2004	Macrobenthos in- and outside harbour	In and near harbour IJmuiden (Holland coast)	(Kaag 2004)	Ja, in BEAST. RWS-Pier IJmuiden 2004
					In opmerkingen staat "2 ^e bemonstering"
14	2004-2013	PMR Monitoring Natuurcompensatie	Voordelta		Ja, in PMR database
15	2005	Sediment characteristics and macrofauna of surf zone	Schiermonnikoog (Wadden coast); and Egmond (Holland coast)	(Van Dalfsen 2006)	Ja, in BEAST. RIKZ Zandige Kust 2005
16	2007	Benthos at nourishment sites	Four locations of the Dutch coastal zone (Holland coast): Petten; Bloemendaal; Zandvoort; and Den Helder/Julianadorp	(Van der Wal & Van Dalfsen 2008)	Ja, in BEAST. Monitoring Suppletiegebieden 2007
17	2009-2014	Benthos – en visbemonstering voor EGSI	Ameland / Schiermonnikoog		Beschikbaar via IHM
18	2010, 2011, 2012, 2013, 2015	Benthos- en visbemonstering Zandmotor	Ter Heijde (Zandmotor)		Op repository bij 3TU. Nog niet opgewerkt
19		Fish larvae MEP aanleg 2 ^e maasvlakte			
20		Aanleg tweede maasvlakte benthosbemonstering	voordelta en Hollandse kust		in database Deltares, service beschikbaar

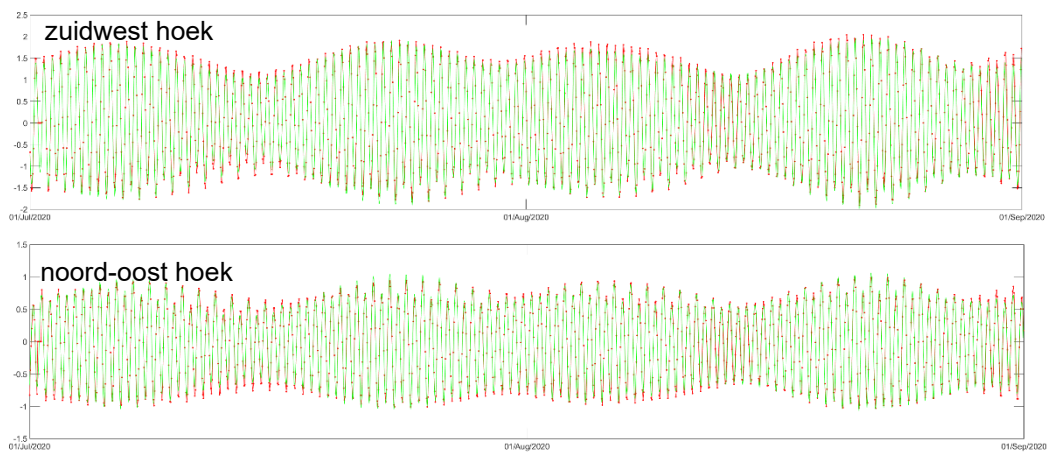
C Berekening bodemschuifspanning en verandering korreldiameter

Om ondersteunende informatie te verkrijgen voor de analyses in §2.2.1 is gebruik gemaakt van een numeriek model ('kuststrook') dat voor deze gelegenheid is aangepast met een grotere gebiedsdekking van het rekenrooster en nauwkeuriger golf- en getijrandvoorwaarden (Figuur B-1). Het modeldomein beslaat het gebied van de Belgisch-Franse grens tot aan Noord-Friesland in Duitsland. Opgemerkt wordt dat een relatief grofmazig rekenrooster wordt gebruikt om te zorgen dat ook simulaties van 10 tot 20 jaar kunnen worden uitgevoerd. Voor de toepassing op de vooroever zou dit geen probleem moeten zijn, maar voor de brandingszone (laatste paar honderd meter tot aan de kustlijn waarin de meeste golven breken) is het model niet geschikt. De randvoorwaarden van het model zijn opgelegd op basis van astronomische waterstanduitvoer van het gevalideerde DCSM v6 model. Daarvoor zijn de berekende waterstandvelden voor 2 periodes uit Matroos gehaald. Dit betrof de periodes juli tot en met augustus 2020, Mei tot en met December 2014. De verschillen tussen de randvoorwaarden van het aangepaste kuststrook-fijn model en de DCSM-v6 uitvoer zijn klein (Figuur B-2). Dit is overigens geen validatie van het model, maar een consistentie check van de simulatie. Verondersteld wordt dat dit voldoende is om te zorgen dat de grootte van de getijforcering overeenkomt met de werkelijke situatie. Een periode van 5 jaar wordt doorgerekend. Voor de golven wordt een tijdserie van gemeten golfcondities bij het Europlatform gebruikt.

De mediane korrelgrootte (D_{50}) in het model is 250 μm voor het hele domein. Het model berekent de transporten voor vijf korrelgrootte fracties (tussen 63 en 1180 μm), waardoor de korreldiameter van het bodemmateriaal zich door de tijd heen kan aanpassen aan de hydrodynamische forcering. Het model past de TRANSPOR2004 formulering toe (Van Rijn, 2007a/b) met een algemene kalibratiefactor van 0.5 voor het zowel het suspensief als bodemtransport, en een factor van 0.2 voor het suspensief en bodemtransport door golven (met name kustdwars). Het model past een morfologische factor toe van 4, waardoor de effectieve periode van bodemverandering ~20 jaar is.



Figuur C1. Modelgrid van het aangepaste kuststrook model.



Figuur C2. Verificatie van modelinvoer van waterstanden op de modelrand van het domein tegen het DCSM v6 model (onder).

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

Deltares

www.deltares.nl