

Ecologie in relatie tot bodemsediment

Kennisinventarisatie in het kader van het Zandmotor project



Ecologie in relatie tot bodemsediment

Kennisinventarisatie in het kader van het Zandmotor project

Auteur(s)

Harriete Holzhauer

Peter Herman

Bas Huisman

Ecologie in relatie tot bodemsediment

Kennisinventarisatie in het kader van het Zandmotor project

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	mevrouw C. van Gelder-Maas
Referenties	
Trefwoorden	Bodemdieren, Sediment, Bodemschuifspanning, Stroomsnelheid, Zandmotor

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	30-09-2021
Projectnummer	11201431-001
Document ID	11201431-001-ZKS-0024
Pagina's	32
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Harriete Holzhauser	
	Peter Herman	
	Bas Huisman	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Harriete Holzhauser	Theo Prins	Toon Segeren	
	Peter Herman			
	Bas Huisman			

Samenvatting

In deze studie wordt de kennis geïnventariseerd over bodemdieren in de Nederlandse en Belgische Noordzeekust én de omgevingscondities waarin deze bodemdieren leven (onder andere sediment en hydrodynamiek). Doel is om de relaties tussen de bepalende omstandigheden en het voorkomen van bodemdieren te verduidelijken.

Op verschillende ruimtelijke schalen is deze beschouwing uitgevoerd, op grote schaal van de Noordzee tot aan lokale veranderingen in ondiep water bij de Zandmotor. De analyse van de gegevens over bodemdieren op de Nederlandse en Belgische Noordzeekust geeft aan dat er sterke ruimtelijke verschillen bestaan in de diversiteit en dichtheid van soorten. De diversiteit van de bodemdiergemeenschappen in diep water is groter in de noordelijke Noordzee dan voor de Zuidelijke Noordzee, en kan gerelateerd worden aan de lokale temperatuur, saliniteit, stroomsnelheden en diepte. In de ondiepe kustzone (tot 10 km uit de kust) is de biomassa van de bodemdieren echter nog aanzienlijk groter dan in dieper water. Alleen in zeer ondiep water (minder dan 4m waterdiepte) neemt dit weer snel af. In gebieden met fijner zand en slib lijkt een groter aantal bodemdieren aanwezig te zijn, wat ook bij de Zandmotor duidelijk naar voren komt. Zowel bodemsediment, morfologie als bodemschuifspanning kunnen worden gecorreleerd aan de bodemdiergemeenschappen in de ondiepe kustzone. Dit verschilt echter per soort. Er is per soort vaak een duidelijke voorkeur te onderscheiden voor de dieptezone en bodemschuifspanning of sediment.

Ondanks de beschikbare kennis over het voorkomen van bodemleven én de invloed van omgevingscondities, is het een grote uitdaging om de impact op het ecosysteem vast te stellen voor zandsuppleties en andere ingrepen in het kustsysteem. Het doen van voorspellingen over toekomstige ontwikkelingen of over de effecten van mitigerende maatregelen is moeilijk. Oorzaken hiervoor zijn met name de 1) beperkte kennis van de specifieke eigenschappen en omgevingseisen van de soortengemeenschappen, 2) de sterke onderlinge samenhang tussen de omgevingsfactoren als bodemschuifspanning, sediment en diepte die het moeilijk maken de invloed per aspect te onderzoeken, en 3) het niet altijd beschikbaar zijn van aanvullende abiotische data bij metingen. In deze studie worden aanbevelingen gedaan voor het verzamelen van (veld)gegevens en nadere analyses die inzicht verschaffen in de relatie tussen bodemdieren en omgevingscondities.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	6
2	Gegevens over bodemdieren en sediment	7
2.1	Belang van bodemdieren	7
2.2	Verschillen tussen de zuidelijke en noordelijke Noordzee	7
2.3	Regionale variaties in de Nederlandse Noordzee (NCP)	8
2.4	Regionale variaties in de Belgische Noordzee (BCP)	11
2.5	Sediment, bodemdieren en vissen in de ondiepe kustzone	12
2.6	Lokale variatie bij de Zandmotor	14
3	Invloed omgevingscondities op bodemdieren	17
3.1	Belang van sediment voor bodemdieren en vissen	17
3.2	Belang van morfologie voor bodemdieren	18
3.3	Gecombineerde invloed van bodemschuifspanning, diepte en korrelgrootte	19
3.4	Terugkoppeling van bodemdieren op sediment	24
4	Conclusies en aanbevelingen	25
	Referenties	28

1 Introductie

Bodemdieren zijn van belang voor het ecosysteem van een zandige kust. Ze vormen het voedsel voor vogels en vissen en vormen daarmee de link tussen primaire productie (algen) en vogels en vissen. De geschiktheid van de kust voor bodemdieren en bodemvissen wordt voor een aanzienlijk deel bepaald door de wisselwerking tussen abiotische parameters zoals de hydrodynamische condities, morfologische dynamiek (i.e. hoeveelheid zandverplaatsing) en sediment-samenstelling van de kust.

Het meeste onderzoek naar bodemleven in relatie tot de omstandigheden heeft zich gericht op de diepe kustzone (>12 meter waterdiepte). Pas in de afgelopen jaren is er ook onderzoek gedaan naar bodemdieren in de ondiepe kustzone, zoals bij de grootschalige suppletie 'de Zandmotor' (Wijsman et al, 2015) en voor de kust van Ameland (Vergouwen & Holzhauer, 2016). Ook is er bij Terschelling informatie ingewonnen bij een kleinere suppletie (Van Dalftsen & Essink, 1993; Van Dalftsen 1999) en voor de Hollandse kust (Janssen & Mulder 2005; van Dalftsen 2009). De beschikbare kennis van de habitats voor bodemdieren in de ondiepe kustzone is echter nog steeds veel kleiner dan van het diepere deel van de kust. De reden hiervoor is dat de natuurlijke dynamiek van de ondiepe kustzone complexer is dan van de diepe vooroever. De onregelmatige golfforcering is bepalend in ondiep water, terwijl de meer regelmatige stromingscondities met name van belang zijn op dieper water. Als gevolg van de sterke variatie in de hydrodynamische forcering in ondiep water kan sterke erosie of sedimentatie optreden, en ook kan de samenstelling van de bodem veranderen (o.a. Broekema et al., 2016; Terwindt, 1962; Van Straaten, 1965). Ook is de ondiepe kustzone het gebied waarin zandsuppleties worden uitgevoerd voor het versterken van de kust, als gevolg waarvan er lokaal bedekking kan plaatsvinden van de bodemdieren. Bij grootschalige suppleties kan er zelfs op enige afstand van de maatregel een effect zijn op zowel de bodemschuifspanning als de sedimentsamenstelling van de bodem (Huisman et al., 2016; Huisman et al., 2018). Het is onduidelijk hoe ernstig deze verstoringen zijn voor de ecologie. Eerst zal onderzocht moeten worden in hoeverre het bodemsediment daadwerkelijk bijdraagt aan de habitat voor bodemdieren en vissen.

Doel van deze memo is om informatie te verschaffen over de relevantie van sediment voor dieren die in of nabij de bodem leven in het deel van de kustzone waar zandsuppleties worden uitgevoerd. Hiervoor zijn eerst gegevens verzameld over verspreiding van bodemdieren in de Noordzee en de ondiepe kustzone in relatie tot bodemsediment, om zo inzicht te krijgen in de beschikbare gegevens over bodemdieren en sediment. Vervolgens is een beschouwing gedaan van de invloed van de verschillende omgevingsfactoren (sediment, lokale morfologie en bodemschuifspanning) op het voorkomen van bodemdieren en vissen. In het laatste hoofdstuk worden conclusies gegeven en de mogelijke richtingen voor verder onderzoek aangemerkt.

2 Gegevens over bodemdieren en sediment

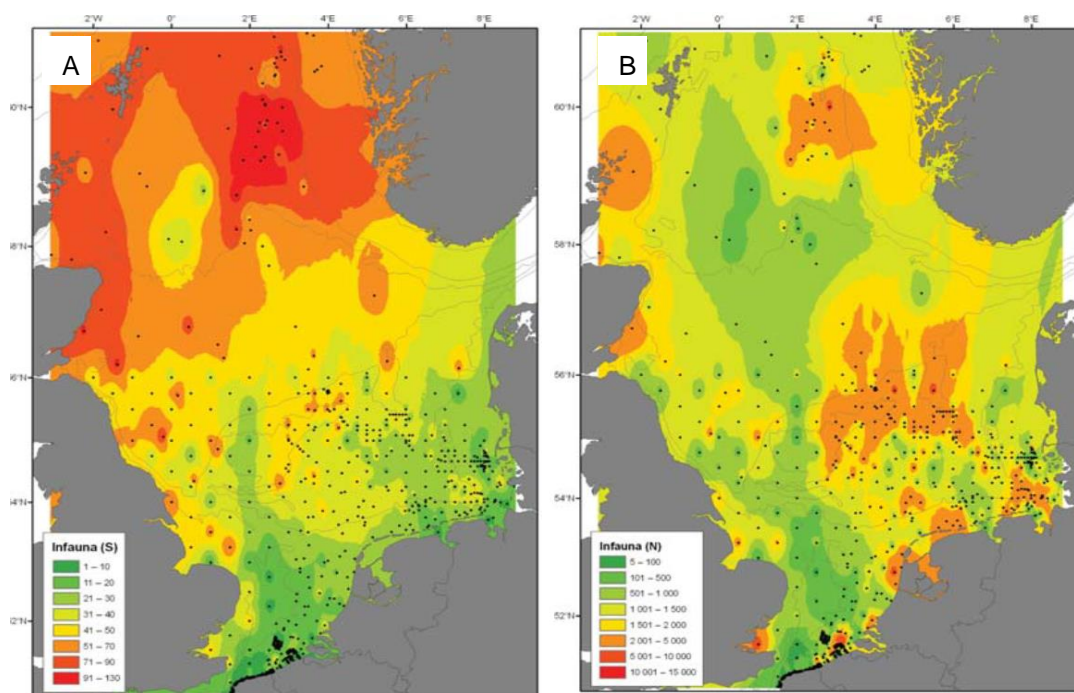
2.1 Belang van bodemdieren

Er zijn verschillende delen van de kustzone waarvoor onderzoek is uitgevoerd, waarmee een beeld geschetst kan worden van de beschikbare gegevens en afhankelijkheden van de omgevingscondities die hier gevonden zijn. Achtereenvolgens wordt gekeken naar de verschillen over de Noordzee, de regionale variatie in het Nederlandse en Belgische deel van de Noordzee en het voorkomen van bodemdieren in de (ondiepe) kustzone en bij de Zandmotor. De vraag die in dit hoofdstuk besproken wordt is :

“Wat is er bekend over de bodemdieren en sediment op de Nederlandse en Belgische kust?”

2.2 Verschillen tussen de zuidelijke en noordelijke Noordzee

Gegevens van bodemdieren in de gehele Noordzee (1999-2002) laten zien dat de grootste aantallen soorten worden gevonden in de noordelijke Noordzee (Figuur 2.1A). Daarentegen worden de hoogste dichtheden gevonden in de kustgebieden van de zuidelijke Noordzee (Figuur 2.1B). Het geeft aan dat de Nederlandse Noordzee (ruwweg van het midden van de geplote Noordzeegebied naar het zuiden) niet het deel van de Noordzee is met de meeste diversiteit maar wel een gebied dat een hoge productie kent en daarmee een belangrijke rol vervult in de voedselketen en het ecosysteem van de Noordzee.

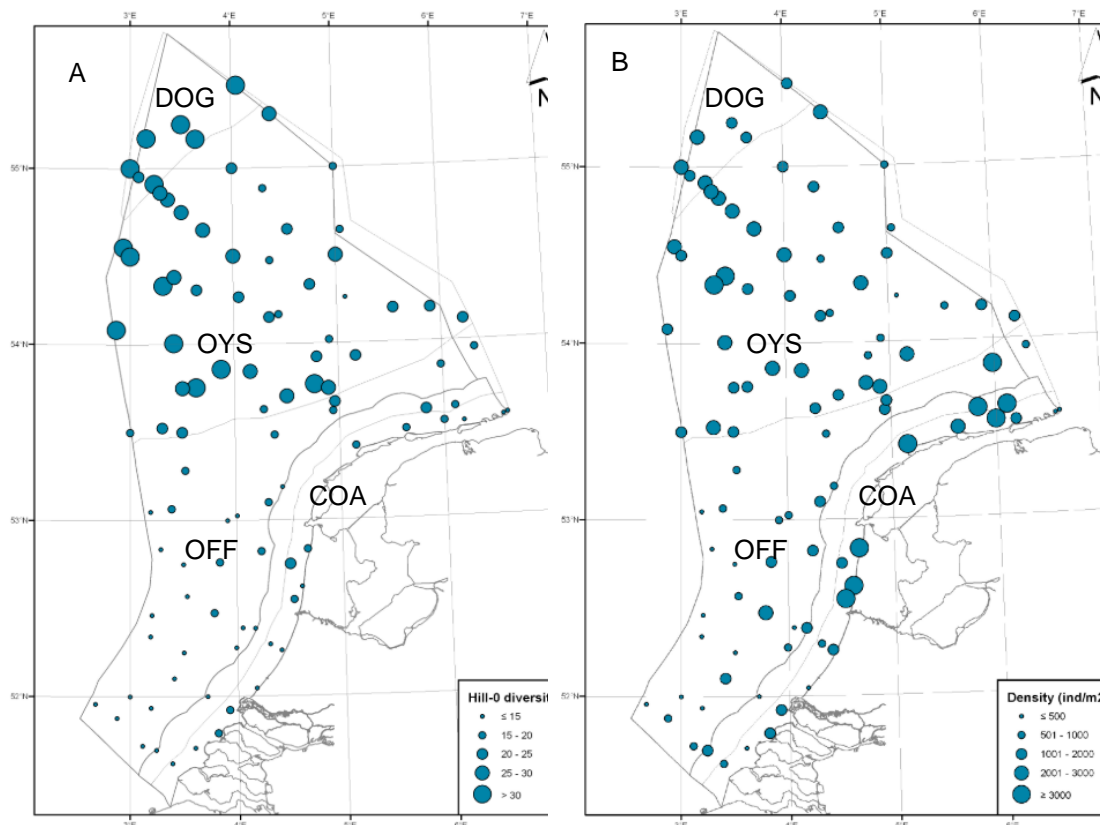


Figuur 2.1: Aantal soorten (A) en dichtheid (B) aan bodemdieren per locatie voor de Noordzee (Reiss et al., 2010)

Reiss et al., (2010) heeft op schaal van de Noordzee gekeken naar fysieke omgevingsvariabelen, zoals diepte, percentage slib, zandfractie, gravelfractie, gemiddelde watertemperatuur, zoutgehalte (zomer en winter), stratificatie, chlorofyl in de waterkolom, getij en golfinvloed in relatie met het gemiddeld aantal soorten en dichtheid van bodemdieren. Hieruit blijkt dat de parameters zoals watertemperatuur, zoutgehalte en diepte de beste correlatie laten zien met het gemiddeld aantal soorten bodemdieren. Voor de dichtheid aan bodemdieren worden door Reiss et al., (2010) de beste correlaties gevonden met getijstromingen en stratificatie. Er is geen onderzoek gedaan naar de invloed van de gemiddelde korreldiameter op de bodemdieren.

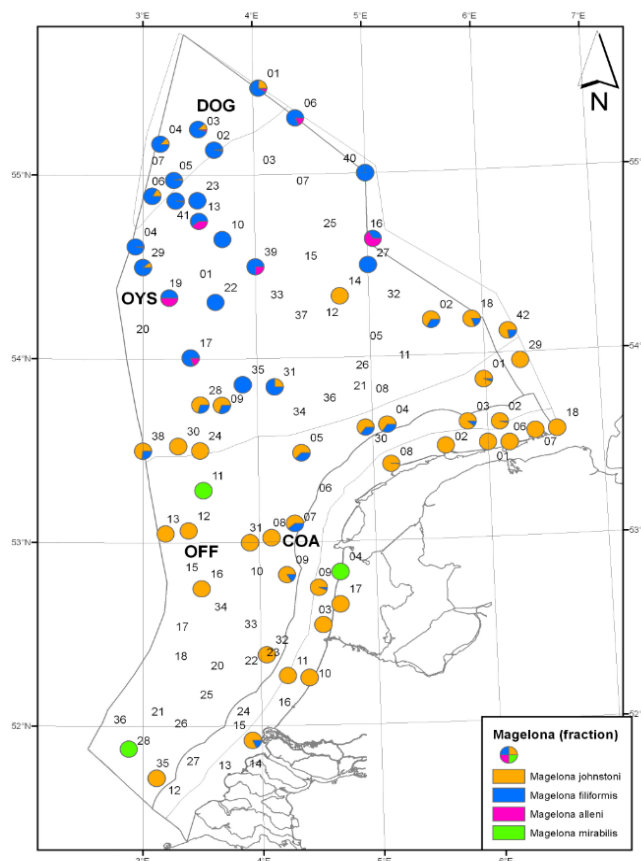
2.3 Regionale variaties in de Nederlandse Noordzee (NCP)

In het Nederlandse deel van de Noordzee worden jaarlijks, in het kader van de 'Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands' (MWTL), bemonsteringen uitgevoerd naar bodemdieren en sedimentsamenstelling van de bodem. Deze gegevens worden geanalyseerd in vier gebieden, namelijk de Doggersbank (DOG), Oestergronden (OYS), Offshore (OFF) en de kustzone (COA). Gelijk aan het beeld voor de hele Noordzee wordt op de Doggersbank (i.e. in het noordelijk deel van het Nederlands Continentaal Plat, afgekort als NCP) het hoogste gemiddeld aantal soorten per monster gevonden (gem 32 per monster in 2010) en in de Offshore zone en langs de kust het laagste gemiddeld aantal soorten per monster (gem 13 soorten per monster in 2010) (zie ook Figuur 2.2A).



Figuur 2.2: Diversiteit (A) en dichtheid (B) aan bodemdieren in 2010 op basis van de MWTL bemonstering

Opvallend is dat het aantal verschillende soorten aanwezig in een gebied sterk verschilt. Langs de kust worden de minste soorten waargenomen (in totaal 71 soorten in 2010). Op de Oestergronden wordt het hoogste aantal verschillende soorten gevonden, in 2010 waren dit er 158. In vergelijking met voorgaande jaren (1995-2010) is er sprake van een jaarvariatie in het aantal gevonden soorten per locatie. Echter de verhouding tussen de gebieden, waarbij de Doggerbank en de Oestergronden de hogere aantallen soorten per locatie hebben ten opzichte van de Offshore zone en de kustzone, verandert niet over de jaren (Verduin, Templeman, & van Moorsel, 2012). De gemiddelde dichtheid aan individuen per vierkante meter is vrij gelijkwaardig voor alle gebieden. In 2010 ligt de gemiddelde dichtheid per gebied tussen de 1200 ind/m² (OFF) en de 2040 ind/m² (DOG) (zie ook Figuur 2.2B). Ook in de dichtheden is er sprake van jaarvariatie. Echter over een langere periode beschouwd (1995-2010) zijn de gevonden jaarlijkse dichtheden vergelijkbaar met voorgaande jaren (Verduin et al., 2012). De gemiddelde biomassa per gebied laat echter wel grotere verschillen zien. In 2010 varieert de biomassa tussen de 0,34 g/m² (DOG) en de 2,39 g/m² (COA). De ontwikkeling van biomassa tussen 1995 en 2010 laat voor de Doggersbank, Oestergronden en de Offshore zone een jaarlijkse variatie zien maar zonder grote veranderingen in de overall trend. Echter voor de kustzone is er een piek in de biomassa tussen 2002 en 2007. De biomassa in deze periode ligt beduidend hoger dan in de periode daarvoor en daarna. Deze ontwikkeling wordt gekoppeld aan de aanwezigheid van de Amerikaanse zwaardschede (Verduin et al., 2012).



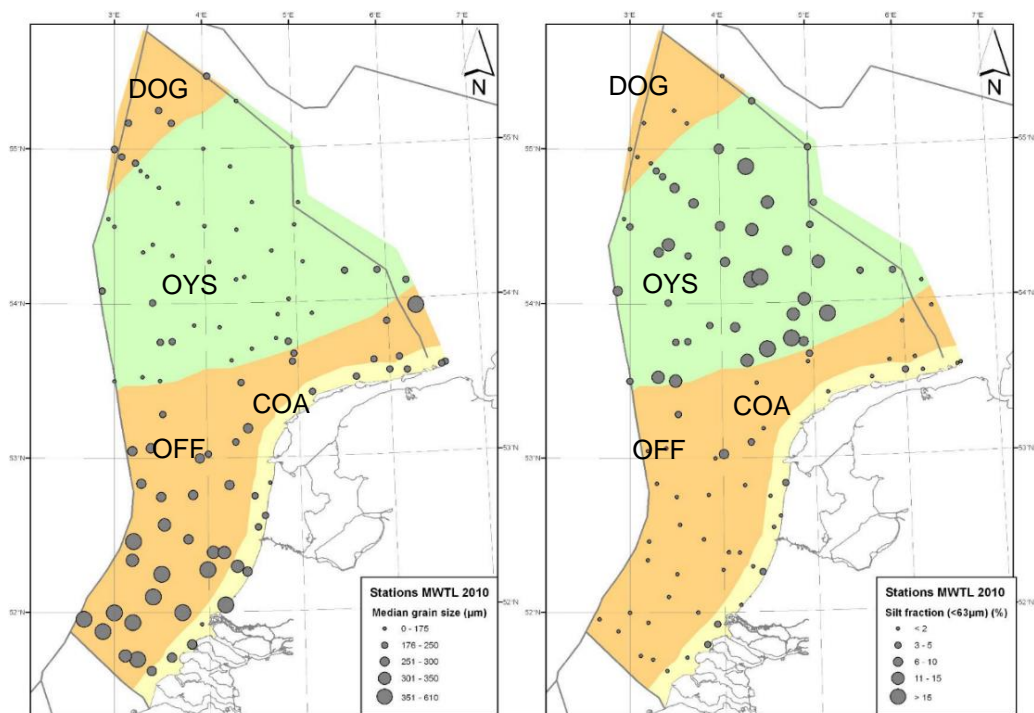
Figuur 2.3: *Magelona* soorten verspreiding over het NCP op basis van MWTL gegevens uit 2010

Qua soorten zien we in 2010 dat de kustzone de hoogste dichtheid aan schelpdieren heeft (gemiddeld 520 ind/m² versus een gemiddelde van 314 ind/m² voor het hele NCP). En tevens komen er in de kustzone meer borstelwormen voor dan in de andere deelgebieden (gemiddeld 1185 ind/m² versus een gemiddelde van 745 ind/m² voor het hele NCP). Er zijn overigens veel verschillende soorten binnen een groep van schelpdieren of borstelwormen die allemaal hun

eigen voorkeuren hebben. Zelfs binnen een familie zijn er verschillende ondersoorten die elk een eigen voorkeur hebben. Ter illustratie onderstaande figuur (Figuur 2.3) met de verdeling van het genus *Magelona* over het NCP.

Wat betreft de sedimentsamenstelling zien we dat de Oestergronden bestaan uit zeer fijn zand met slib ($D_{50} \sim 144 \mu\text{m}$, met 3 tot 15% slib), de Doggersbank en de kustzone uit fijn zand (respectievelijk een D_{50} van 201 μm en 241 μm) met voor de meeste locaties minder dan 2% slib. Alleen heel dichtbij de kust is de slibconcentratie in COA tussen de 2 en 5%. De offshore zone bestaat uit gemiddeld grof zand met weinig slib (circa 315 μm). De hoogste slibconcentraties worden dus gevonden op de Oestergronden (Figuur 2.4). Vergelijkingen met vorige jaren laat zien dat de verdeling van de sedimentsamenstelling op het NCP niet sterk aan verandering onderhevig is (Verduin et al., 2012). In algemene zin valt uit Figuur 2.3 en 2.5 op te maken dat er een minder grote diversiteit en dichtheid van de bodemdieren is voor OFF, wat een gebied is met medium grof zand en een relatief laag gehalte slib. Voor de andere gebieden is er geen onderscheid te maken op basis van het sediment (mediane korreldiameter en slibgehalte).

In het Nederlandse deel van de Noordzee lijkt er dus een relatie te zijn tussen de korreldiameter van het bodemsediment en de diversiteit en dichtheid van de soorten bodemdieren, waarbij er een grotere diversiteit is als de sedimentsamenstelling fijner is. In mindere mate is er echter ook sprake van een correlatie met het slibgehalte in de bodem. Overigens moet opgemerkt worden dat de hydrodynamische condities ook aanzienlijk kunnen verschillen voor deze deelgebieden. De getijstrooming is bijvoorbeeld asymmetrisch en netto noordwaarts gericht in OFF en COA, wat veel minder het geval is in DOG en OYS. Verder hebben golfcondities een groter effect in het ondiepere water van COA.



Figuur 2.4: Mediane korreldiameter (A) en slibfractie (B) in 2010 op het NCP op basis van de MWTL bemonstering

Regionale variaties in de Belgische Noordzee (BCP)

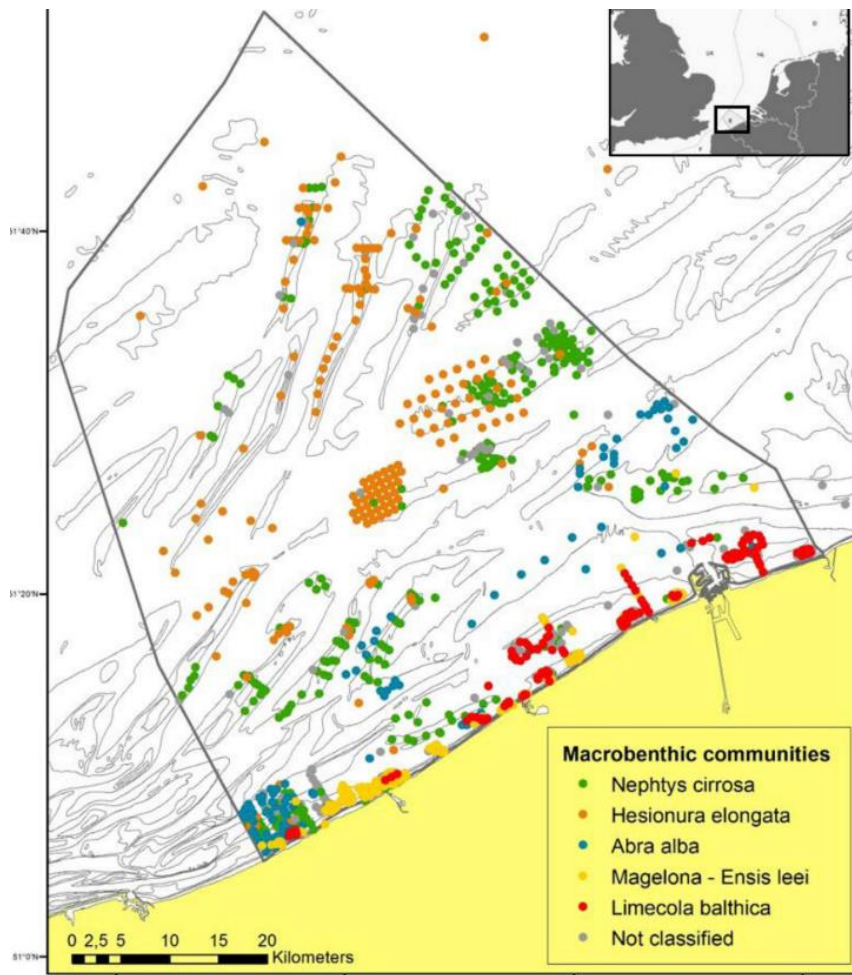
Voor de het Belgische deel van de Noordzee zijn over een periode van 1994 tot 2012 in het kader van verschillende projecten bodemdiergegevens en sedimentgegevens verzameld (Breine et al., 2018; Van Hoey, Degraer, & Vincx, 2004). Aan de hand van deze gegevens zijn de bodemdieren van de Belgische Noordzee opgedeeld in vijf gemeenschappen: *L. balthica* (=Nonnetje een schelpdier), *Magelona - E. leei* (=borstelworm - Amerikaanse zwaardschede een schelpdier), *A. alba* (=Witte dunschaal een schelpdier), *N. cirrossa* (=borstelworm) en *H. elongata* (=borstelworm). De gebieden worden getypeerd aan de hand van sedimenteigenschappen en de meest voorkomende bodemdiergemeenschap (Tabel 2.1). Naast deze typerende soorten komen er nog een groot aantal andere soorten voor. De gemeenschap wordt hier verder geduid op basis van hun leefomgeving (i.e. in gangen of zelf gemaakte kokers), de mogelijkheid tot verplaatsen (i.e. mobiel of juist sessiel) en de vorm van voedsel vergaren. Verschil kan gemaakt worden tussen soorten die voornamelijk materiaal eten dat op de bodem is gevallen (depositie) of soorten die actief de waterkolom filteren (suspensie).

Tabel 2.1: Eigenschappen per gemeenschap weergegeven langs de gradiënt van fijn zand met slib naar medium zand.

Type sediment	Fijn zand (184 µm) met veel slib (45%)	Fijn zand (211 µm) met weinig slib (12%)	Fijn zand (199 µm) met weinig slib (7%)	Medium zand (297 µm) met zeer weinig slib (0.4%)	Medium zand (387 µm) met zeer weinig slib (0.9%)
Gemeenschap	Limecola balthica	Abra alba	Magelona – Ensis leei	Nephtys cirrossa	Hesionura elongata
Levend in:	gangen	kokers, gangen en vrij	gangen	vrij	vrij
Verplaatsing	sessiel	sessiel	sessiel	graven	sessiel & graven
Voedselvergaring:	depositie	allerlei vormen	suspensie	allerlei vormen	depositie

De gebieden voor *L. balthica* worden gekarakteriseerd als zandig slibrijk sediment en hebben een lagere dichtheid aan individuen vergeleken met de andere gemeenschappen. De *Magelona – E. leei* gemeenschap komt voor in gebieden met matig fijn zand en een klein slib gehalte. Gemiddeld gezien zijn in deze gebieden de dichtheden en biomassa per locatie hoog maar is het aantal soorten laag. De *A. alba*-gemeenschap komt voor in gebieden met fijn zand en slib. Deze gemeenschap wordt gezien als het meest divers en met de hoogste biomassa en hoogste dichtheid aan individuen. De overige twee gemeenschappen *N. cirrossa* en *H. elongata* worden verder van de kust waargenomen in gebieden met medium zand zonder of met heel weinig slib. Dichtheden, biomassa en diversiteit aan soorten zijn relatief laag in de gebieden met de *N. cirrossa* gemeenschap en hoger in de *H. elongata* gemeenschap (Breine et al., 2018). Deze lagere dichtheid, biomassa en diversiteit in het Belgische offshore deel van de Noordzeekust komen overeen met de situatie in het offshore gebied (OFF) van de Nederlandse Noordzee (Figuur 2.3) waar ook een kleiner aantal soorten en lagere dichtheid te vinden is.

De dominante populaties bodemdieren voor de Belgische kust lijken samen te hangen met de sedimentsamenstelling, waarbij zowel zand als slib van belang zijn (S. Degraer et al., 2008; Reise, 2002; van Colen et al., n.d.; Vanaverbeke, Merckx, Degraer, & Vincx, 2011).



Figuur 2.5: Monsterlocaties op het BPNS met toekenning van gemeenschappen (Degraer et al., 2008)

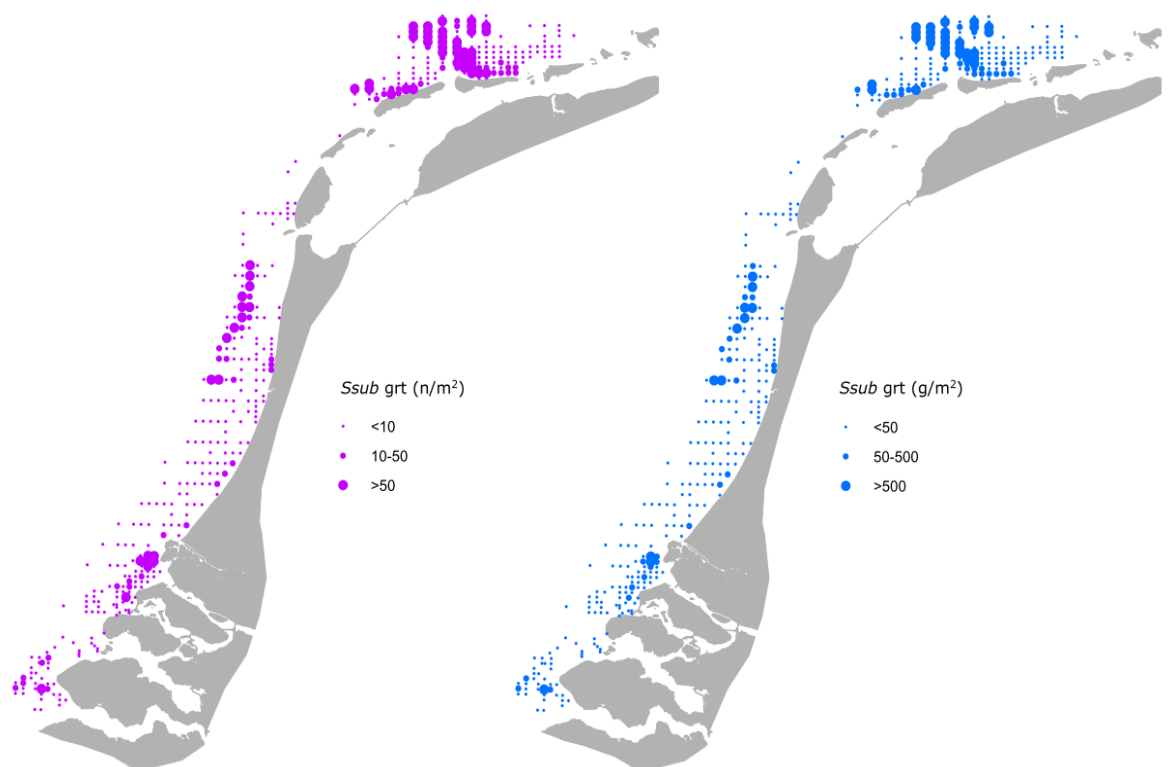
2.5 Sediment, bodemdieren en vissen in de ondiepe kustzone

Voor verschillende projecten langs de Nederlandse kust worden gegevens verzameld van de bodemdieren, waarvoor meestal een box-corer of van veenhapper wordt gebruikt. In deze jaarlijkse schelpdieropnames wordt een overzicht gemaakt van de ontwikkeling van met name de commerciële schelpdieren (o.a. Amerikaanse zwaardschede en Halfgeknotte strandschelp). Daarnaast worden alle andere aangetroffen schelpdieren geregisterd. In de rapportage van 2018 zijn bijvoorbeeld ook de otterschelp (*Lutraria lutraria*), de venusschelp (*Chamelea striatula*) en het zaagje (*Donax vittatus*) opgenomen (Perdon et al., 2018).

Langs de Nederlandse kust worden 100 tot 150 soorten waargenomen, waarbij gemiddeld rond de 10 soorten per locatie wordt gevonden (Beyst, Hostens, & Mees, 2001; Holzhauer et al., 2020; Janssen, Kleef, Mulder, & Tydeman, 2008; Kröncke et al., 2018; Wijsman, Ende, & Brummelhuis, 2018). Dit is vergelijkbaar met de ~13 soorten die gemiddeld gevonden worden in de MWTL metingen van de kustzone. De meest voorkomende soorten zijn borstelwormen die goed in staat zijn gangen te graven of kokers van zand te maken. Daarnaast worden ook veel krabben en kleine kreeftachtigen en schelpdieren zoals mesheften, zaagjes en nonnetjes waargenomen.

Kustlangs zijn er verschillen in het meer of minder voorkomen van bepaalde bodemdieren. Tijdens de jaarlijkse schelpdieropnames worden geen sedimentgegevens verzameld. Er kan daarom helaas geen directe koppeling met het sediment gemaakt worden. Toch wordt verondersteld dat de ruimtelijke verschillen in het voorkomen van soorten samenhangen met de sedimentsamenstelling (organisch materiaal en korrelverdeling) en morfologie van de kust. Dit is goed te zien wanneer we bijvoorbeeld naar de verdeling van *Spisula* (half geknotte strandschelp) langs de Nederlandse kust kijken (Perdon, Troost, Van Zwol, Van Asch, & Pool, 2018). Deze soort is met name sterk vertegenwoordigd in de buitendelta van het Haringvliet en op de Waddenkust bij Terschelling en Ameland. Dit zijn plekken langs de Nederlandse kust die worden gekenmerkt door fijner dan gemiddeld sediment.

In het algemeen zien we langs de ondiepe Nederlandse kust (tot ~20 km uit de kust) dat de mediane korrelgrootte over een kustdwarsprofiel het hoogst is in de brandingszone, en afneemt richting duinen en richting de diepere vooroever (o.a. Eisma, 1986; Inman, 1953). Sorteringsprocessen door golven zorgen voor een evenwichtsverdeling van korrelgroottefracties dwars op de kust met grovere korrels in het hoogenenergetische ondiepe deel (Guillén & Hoekstra, 1996). Kustlangs is de korrelgrootte op de stranden van de Hollandse kust gemiddeld gezien wat grover (mediane korreldiameter D_{50} van 200 tot 400 μm) dan voor de Waddenkust (korreldiameter van 150 tot 300 μm ; Eisma, 1968). Als gevolg hiervan is de kust bij de Waddeneilanden gemiddeld gezien ook minder steil dan langs de Hollandse kust. Ook bij oude erosieve geologische afzettingen (o.a. Oude Rijn delta bij Katwijk en Noordwijk; Terwindt, 1962 of kust van Texel) worden grovere afzettingen gevonden.



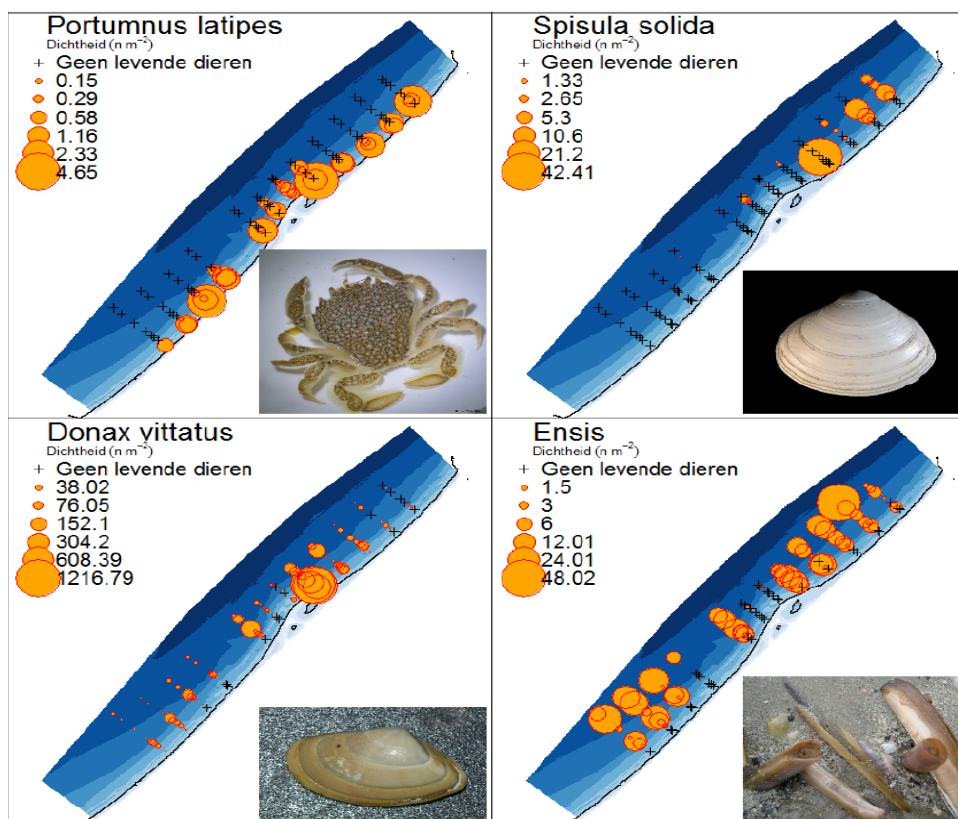
Figuur 2.6: Verdeling van *Spisula* groter dan 19mm langs de Nederlandse kust voor 2018 op basis van bemonstering met de bodemschaaf. Links is het aantal per m^2 en rechts de biomassa (vers gewicht) per m^2 .

Lokale variatie bij de Zandmotor

In recente onderzoeken is gebleken dat grootschalige zandsuppleties kunnen bijdragen aan een kustlangse én kustdwarse verandering in de bodemsamenstelling (D_{50} verandering tot $\sim 200 \mu\text{m}$), zoals gevonden bij de Zandmotor (21 miljoen m^3 zand) aan de Delflandse kust (Huisman et al., 2016). Bij vooroeversuppleties is een kleine invloed op de mediane korreldeur van het sediment vastgesteld van $\sim 50 \mu\text{m}$ (De Bakker & Huisman, 2019). Het ligt voor de hand dat kustversterkingsmaatregelen die de stromingen en het sediment beïnvloeden ook een invloed kunnen hebben op het bodemleven en de vissen.

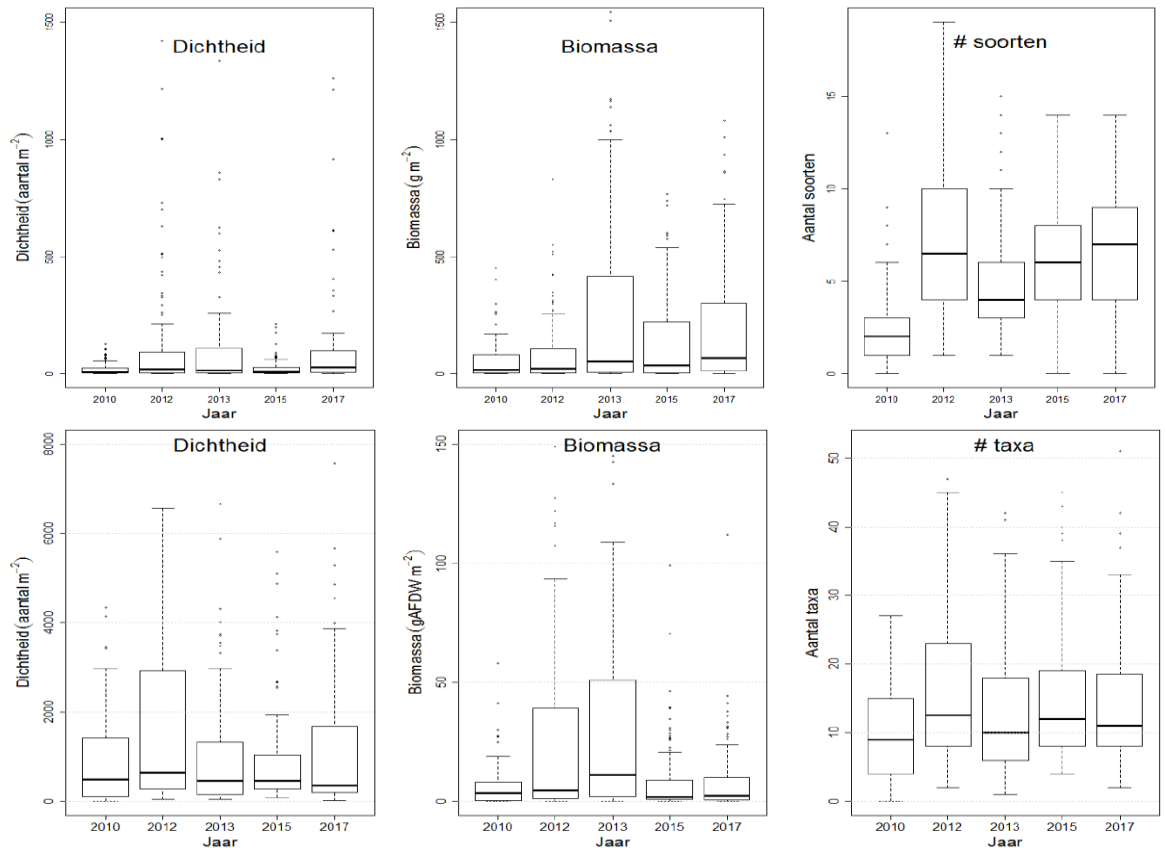
Bij de Zandmotor zijn in de periode 2010 tot 2019 bodemmonsters genomen door Wageningen Marine Research (WMR). Waarvoor de biomassa van de bodemdieren en het aantal soorten is bepaald. Er is hierbij gebruik gemaakt van een bodemschaaf en van een Van Veen happer. In totaal zijn er ieder jaar ongeveer 120 locaties op de vooroever bemonsterd met zowel de bodemschaaf als de Van Veen happer. Twaalf kustdwarse transecten zijn bemonsterd (Figuur 2.7), waarbij de exacte ligging op het transect ieder jaar is bepaald aan de hand van een recente dieptekaart.

Op basis van de metingen met de bodemschaaf en Van Veen happer zijn door Wijsman et al. (2018) overzichten gemaakt van de verspreiding van bodemdieren. Figuur 2.7: laat de resultaten voor een paar soorten zien van de bodemschaafbemonstering in 2017. Uit de analyse komen logische clusters van bodemdieren naar voren, die bijvoorbeeld beter gedijen in energetische condities, grof sediment of diep water. Hierin valt te zien dat bepaalde soorten de voorkeur geven aan de ondiepe kustzone (krabbetjes), het gebied met fijn sediment net noordelijk van de Zandmotor (o.a. Donax en Spisula) of juist de omliggende kust. De soortensamenstelling in de ondiepe kust langs de Zandmotor is overigens niet sterk veranderd (Van Egmond et al., 2018).



Figuur 2.7: Overzicht van verspreiding van dichtheden van de soorten *Portumnus latipes*, *Spisula solida*, *Donax vittatus* en *Ensis* spp. in 2017 op basis van de bodemschaaf (Wijsman et al., 2018)

De invloed van de Zandmotor op de ecologie in de nabije omgeving lijkt te bestaan uit een diversificatie van de bodemdieren. Uit de analyses komt naar voren dat de biomassa en de aantallen bodemdieren in de jaren na aanleg van de Zandmotor zijn toegenomen ten opzichte van het referentiejaar 2010, terwijl er op langere termijn vooral een verbreding van het aantal soorten heeft plaats gevonden (Wijsman et al., 2018; Herman et al. (2021); Figuur 2.8:). De soorten-accumulatiecurve per sample laat voor alle jaren na aanleg een duidelijk groter aantal gevonden soorten zien, wat betekent dat er meer diversiteit is in de benthische gemeenschap. Verondersteld wordt dat dit komt omdat de abiotische omgeving van waaruit de samples gehaald worden veel diverser is geworden na aanleg van de Zandmotor dan in 2010. Dit sluit aan bij de gevonden ruimtelijke verspreiding van soorten in Figuur 2.7: waarbij ook te zien is dat soorten voorkeur hebben voor bepaalde gebieden. In algemene kan gesteld worden dat de ruimtelijke verspreiding van bodemdiersoorten gecorreleerd is aan de omstandigheden in deelgebieden rond de Zandmotor die samenhangen met de sedimentsamenstelling.



Figuur 2.8: Boxplots van de metingen met de bodemschaaf (boven) en Van Veen happer (onder) met de dichtheid, biomassa en aantal soorten per locatie voor de jaren 2010 tot 2017 (Wijsman et al., 2018).

Daadwerkelijke vaststelling van de invloed van omgevingsfactoren op specifieke soorten is niet eenvoudig te geven omdat er grote jaar tot jaar variaties zijn in de populaties van bodemgemeenschappen welke niet per se verklaarbaar zijn vanuit de omgevingsfactoren (Wijsman et al., 2015). Opvallend is bijvoorbeeld dat het mesheft (*Ensis spp.*) in de periode 2010 tot 2013 de belangrijkste soort was wat betreft aantallen en biomassa. Echter vanaf 2015 waren andere soorten dominant. Een oorzakelijk verband met de Zandmotor kan niet worden gevonden, alhoewel wel verondersteld wordt dat veranderde stromingspatronen mogelijk invloed hadden op de ontwikkeling van jonge *Ensis spp.* Mogelijk zijn waargenomen veranderingen voor een deel het gevolg van stochastische processen zoals broedval en weerscondities. Ook andere veranderingen in de omgeving zullen invloed hebben gehad op

de omstandigheden, zoals de aanleg van Maasvlakte 2. En door de doorgaande suppleties zijn er ook meer banken voor op de Delflandse kust dan in het verleden (Radermacher et al., 2018), waardoor de omstandigheden voor soorten zijn veranderd.

Voor de effecten van ingrepen in het kuststelsel, zoals zandwinning en zandsuppleties of aanleg van infrastructuur, geldt dat dit relatief recente activiteiten zijn waar informatie slechts over een beperkt aantal jaren beschikbaar is. Juist in gebieden waar maatregelen worden uitgevoerd is het daarom van belang om nieuwe kennis te ontwikkelen en metingen uit te voeren, omdat de meetreeks daar nog kort is.

3 Invloed omgevingscondities op bodemdieren

Het voorkomen van bodemdieren wordt gerelateerd aan verschillende abiotische parameters zoals de morfologie (of waterdiepte), hydrodynamische belasting op de bodem (bodemschuifspanning) of sedimentsamenstelling. Hier wordt een beschrijving gegeven van 1) de aanwijzingen die gevonden zijn over de invloed van deze omgevingsfactoren en 2) fysische aspecten die een rol kunnen spelen daarbij. De vraag die in dit hoofdstuk besproken wordt is :

“Op welke wijze hebben omgevingscondities invloed op bodemdieren en vissen?”

3.1 Belang van sediment voor bodemdieren en vissen

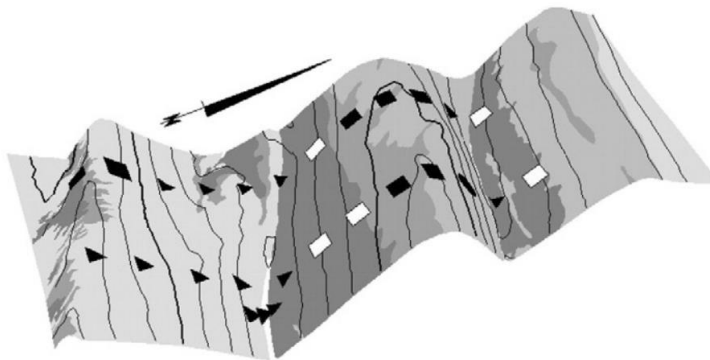
Zowel voor het Nederlands deel van de Noordzee, de Belgische Noordzee als de Zandmotor lijkt de diversiteit en dichtheid van de soorten samen te hangen met het bodemsediment. Vaak wordt daarbij echter alleen de mediane korreldiameter (D_{50}) gerapporteerd. In sommige gevallen kan ook de verdeling van de verschillende fracties van het sediment van belang zijn. Dit geldt met name als er grotere hoeveelheden slib aanwezig zijn. Slib in het sediment heeft dan invloed op de permeabiliteit (i.e. ruimte tussen korrels) en de erosiebestendigheid van het bodemmateriaal. Naarmate er een grotere hoeveelheid fijn materiaal in de bodem aanwezig is zal de permeabiliteit lager worden. Dit heeft invloed op het gemak waarmee bodemdieren zich in het zand kunnen bewegen én de mate waarin gangen intact blijven (Gray & Elliott, 2009; Shepherd, 1989). Ook beïnvloedt het slibgehalte de mogelijkheden voor schelpdieren om voedsel te filteren. Als het slibgehalte te hoog wordt kan het schelpdier het voedsel niet meer efficiënt tot zich nemen, omdat het teveel sediment moeten verwerken. De slibfractie kan overigens ook gezien worden als een indicator voor de geldende hydrodynamica die wel van belang kan zijn voor het bodemleven (Groenewold & Dankers, 2002). Bij zandige bodems speelt slib een minder grote rol. Er worden dan veelal dezelfde soorten gevonden bij een ruime range aan slibgehalten. De voorspellende waarde (causale verband) voor ecologische effecten is bij veranderingen in het slibgehalte van zandig sediment vaak gering (Groenewold & Dankers, 2002).

Vanwege de mobiliteit van vissen is het lastig te bepalen wat de specifieke karakteristieken zijn waarom een soort ergens wel of niet voorkomt. Echter ook voor vissen zijn er aanwijzingen dat er voorkeuren zijn voor bepaald sediment. Voor Tong wordt een relatie gevonden met fijne (slibberige) sedimenten (Teal & Van Keeken, 2011). Jonge schol lijkt een voorkeur te hebben voor fijn sediment om in te schuilen (Post, Blom, Chen, Bolle, & Baptist, 2017). Zandspiering geeft de voorkeur aan zandige sedimenten met weinig tot geen slib (Tien et al., 2017; van den Bogaart et al., 2019). Naast een relatie met het sediment wordt de temperatuur van het water ook als belangrijke factor genoemd. Dit zou een reden kunnen zijn waarom schol steeds eerder richting dieper water gaat (Teal & Van Keeken, 2011; Tulp, van Hal, & Rijnsdorp, 2006).

De meeste kennis over de invloed van de sedimentsamenstelling op bodemdieren (en bij de bodemlevende soorten) is echter kwalitatief van aard. In feite is er nog een te beperkte kennis van de eigenschappen van de soortengemeenschappen zelf (o.a. over vestiging en overleving van organismen, interacties tussen organismen of tussen organismen en hun omgeving en functies van specifieke soorten en soortgroepen). De voorkeuren die soorten bodemdieren en vissen hebben voor de omgevingscondities zouden in gecontroleerde (laboratorium) omstandigheden kunnen worden onderzocht zoals bij de hier benoemde onderzoeken naar de voorkeuren van Jonge Schol. Opgemerkt moet dan wel worden dat dit slechts mogelijk zal zijn voor een selectie van soorten, omdat het ondoenlijk is om laboratorium onderzoek te doen voor alle soorten.

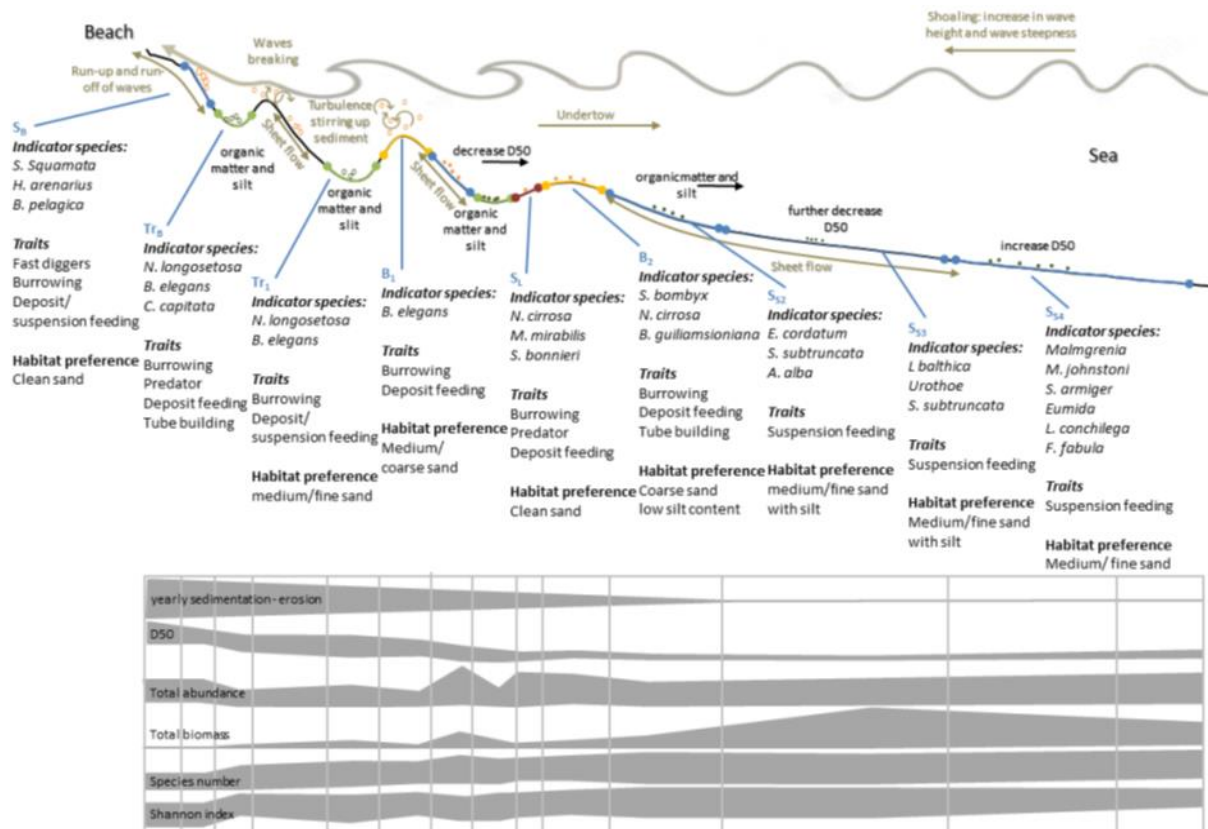
De kust van Nederland is een dynamisch gebied waar golven, wind en zand vrij spel hebben. Onder de waterlijn zijn verschillende zones te onderscheiden met door golven beïnvloede zones bij de waterlijn, brekerbanken in ondiep water, meer rustige/vlakke zones op middeldiep of diep water en gebieden met grootschalige zandgolven in dieper water. Naast de hydrodynamische condities (golven en stromingen) is ook het sediment verschillend voor deze zones. Aan de landwaartse zijde van de brekerbanken is vaak grover sediment aanwezig dan in de diepere geulen (bijv. Moutzouris, Kraus, Gingerich, & Kriebel, 1991; Van Straaten, 1965). In de kustzone is het grover in ondiep water en in dieper water varieert het sterker en is vaak meer slib aanwezig.

Elk van de verschillende zones die worden onderscheiden op de ondiepe kust heeft een eigen leefomgeving (habitat) die geschikt is voor bepaalde soorten (Baptist, van Dalen, Weber, Passchier, & van Heteren, 2006; Holzhauer et al., 2020; Rachor et al., 2003). De verschillen in bodemdieren op grote schaal, bijvoorbeeld tussen zandgolfggebieden of bankencomplexen zijn groter dan op kleine schaal van zandgolven of banken zelf (Baptist et al., 2006). Zandgolven hebben een golflengte van 100 tot 1000 meter, een hoogte hoger dan 1 meter en migreren rond de 10 meter per jaar (o.a. Damen, van Dijk, & Hulscher, 2018; Dorst, 2009). Voor gebieden met zandgolven zijn significante verschillen in sediment en bodemdiersamenstelling tussen de toppen en troggen waargenomen (Baptist et al., 2006; Damveld et al., 2018). Richting het strand op ongeveer 20 meter diepte liggen banken die zeer langzaam migreren met een hoogte tot ongeveer 6 meter, een breedte tot 1 km en een lengte tot 30 km (Markert, Kröncke, & Kubicki, 2015; Van de Meene & Van Rijn, 2000). Voor een bankencomplex nabij Spiekeroog (Duitsland) zijn voor de toppen, troggen en flanken van de bank duidelijke gemeenschappen waargenomen (Figuur 3.1). De verschillen in sediment voor deze zones worden als belangrijkste sturende parameter aangemerkt (Markert et al., 2015).



Figuur 3.1: Verspreiding van gemeenschappen van bodemdieren (□, ▲, ■, ●) op de bathymetrie van een shore-face-connected ridge nabij Spiekeroog en de sedimentsamenstelling (van donker naar licht grijs is grof zand, medium zand en fijn sand) (Markert et al., 2015).

Dicht langs de kust, op een waterdiepte tussen de 5 en 8 meter liggen de brekerbanken. Dit is ook de zone waar onderwatersuppleties worden aangebracht aan de voet van de buitenste brekerbank. De brekerbanken zijn zeer dynamisch, ze worden gevormd langs de kust en migreren binnen enkele jaren in zeevaartse richting waarna ze verdwijnen (Walstra, Reniers, Ranasinghe, Roelvink, & Ruessink, 2012). Dit proces van ontstaan, migreren en verdwijnen kan worden beïnvloed door suppleties (Radermacher et al., 2018). Ondanks de dynamische omstandigheden waarbij golven en stroming er dagelijks voor zorgen dat het sediment in beweging is, worden er op de toppen, troggen en flanken van de brekerbanken verschillende gemeenschappen waargenomen (Figuur 3.2) (Holzhauer et al., 2020; Janssen et al., 2008; van Dalen, 2009; van Dalen & Oosterbaan, 1996).



Figuur 3.2: Schematische weergave van bodemdieren langs een kustprofiel met zandbanken voor de kust van Ameland en Schiermonnikoog (Holzhauer et al., 2019 in prep)

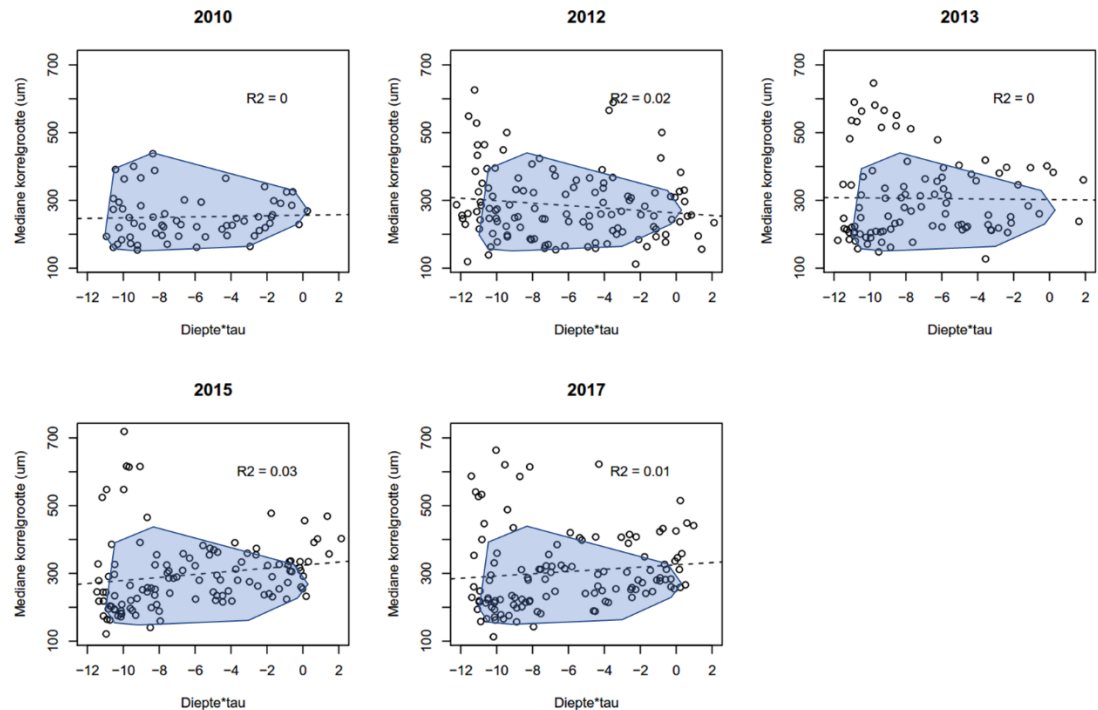
3.3 Gecombineerde invloed van bodemschuifspanning, diepte en korrelgrootte

Recent onderzoek bij de Zandmotor (Herman et al., 2021) laat zien dat er een gecombineerde invloed is van zowel de bodemschuifspanning, diepte als de korrelgrootte op de benthische fauna, waarbij het sediment een groot deel van de variatie verklaart die overblijft als het effect van de waterdiepte en bodemschuifspanning al is meegenomen. In het project 'Natuurlijk Veilig' werd een groter gebied van de Nederlandse vooroever beschouwd, waarbij gevonden werd dat het voorkomen van specifieke bodemdieren gerelateerd is aan zowel de diepte als de mediane korreldiameter.

De Zandmotor

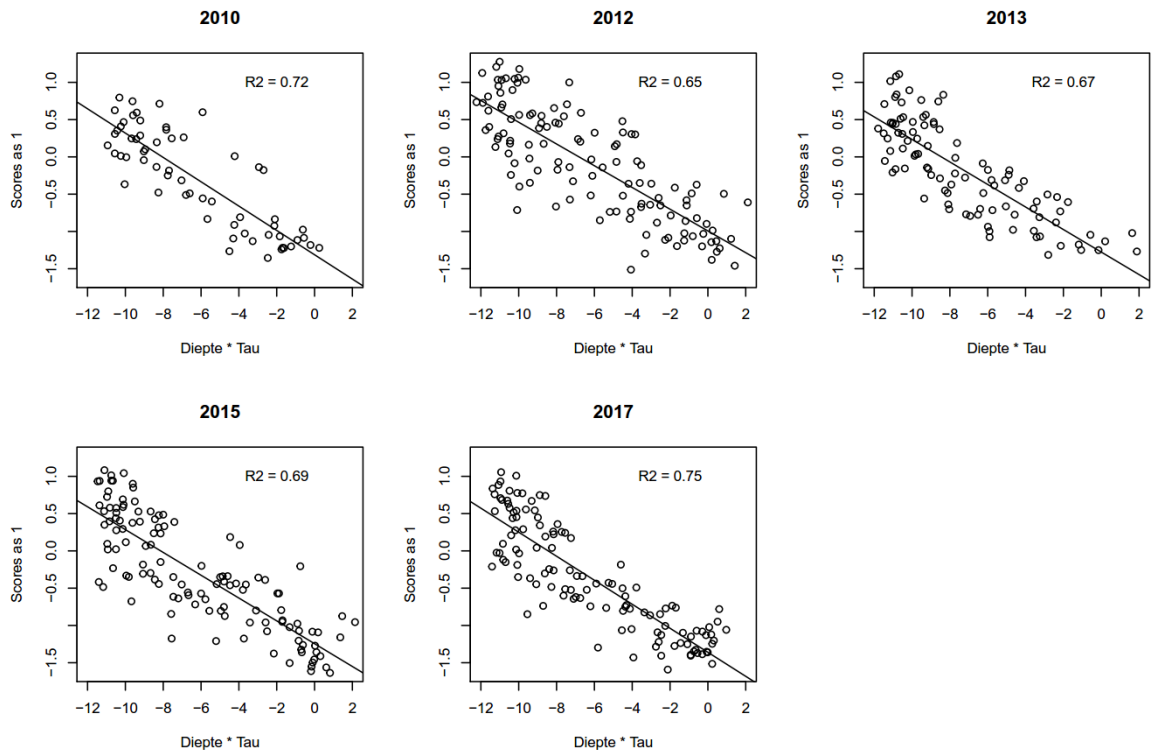
De zandmotor is een interessante case om de relatie tussen bodemschuifspanning, diepte, sedimentsamenstelling en samenstelling van de bodemdiergemeenschap te bestuderen. Door de aanleg van de zandmotor is de range van korrelgroottes bijna verdubbeld. Ook de range van bodemschuifspanning door stroming is veel groter geworden. Het gebied wordt nu gekenmerkt door luwe gebieden langs de flanken van de zandmotor, en snelstromende gebieden aan de tip. De bodemschuifspanning door golven is ook meer gedifferentieerd, omdat afhankelijk van de hoek die de golven maken met de kust, bepaalde zones beschermd zijn door de uitstekende delen van de zandmotor. Het verschil is hier echter veel kleiner; bodemschuifspanning door golven wordt gedomineerd door storm.

Herman et al. (2021) beschrijven de dominante trend in de samenstelling van de bodemdierfauna (op basis van boxcores) met de eerste as van een PCA analyse. De waarden langs die as kunnen uitstekend voorspeld worden met een lineair model dat twee termen bevat: de interactieterm van diepte en log-getransformeerde totale bodemschuifspanning, en korrelgrootte van het sediment. Deze twee verklarende variabelen zijn onderling niet gecorreleerd, maar een plot toont wel aan hoe de range van de fysische omstandigheden rond de Zandmotor is toegenomen als gevolg van de aanleg (Figuur 3.3).



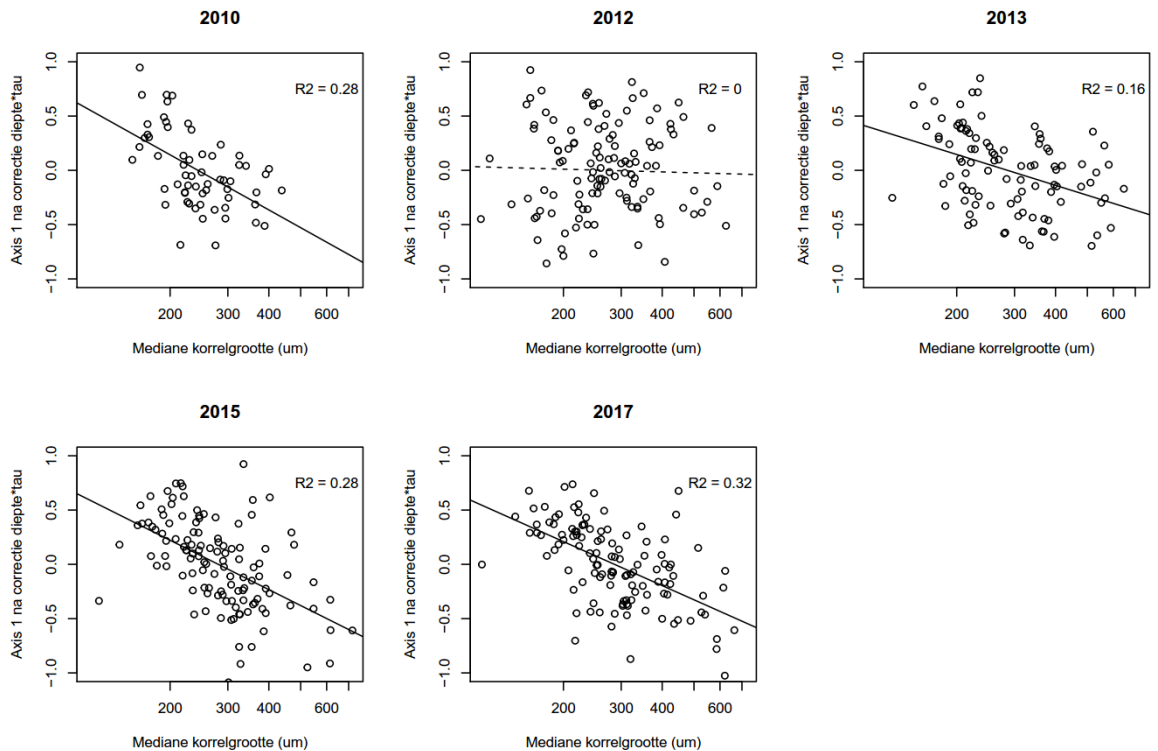
*Figuur 3.3: Relatie tussen de interactieterm diepte*log(totale bodemschuifspanning) op de x-as, en mediane korrelgrootte op de y-as, voor de verschillende bemonsteringen vóór (2010) en na (andere jaren) aanleg van de Zandmotor. De niet-significante regressielijn tussen beide variabelen is getoond. De omhullende van de waarnemingen in 2010 is als referentie aan de andere figuren toegevoegd. In alle jaren werd dezelfde diepterange bemonsterd. De toename in de range van beide variabelen is veroorzaakt doordat de range aan bodemschuifspanningen en de range aan korrelgroottes van het sediment is toegenomen.*

Voor de zandmotor worden de sterkste relaties gevonden tussen de bodemschuifspanning, diepte en bodemdieren. De interactie tussen diepte en bodemschuifspanning is de beste enkelvoudige voorspeller voor de scores op de PCA-as, die een weergave zijn van de samenstelling van de bodemdierfauna (Figuur 3.4). Op diepere en/of hydrodynamisch minder dynamische plaatsen is de score van de fauna hoger, wat correleert met een hoger aantal soorten, een hogere dichtheid en een hogere diversiteit van de fauna.



*Figuur 3.4: Lineair relatie tussen de scores van de bodemdiërgemeenschap op de eerste as van de PCA, en de interactieterm diepte*log(bodemschuifspanning). Er is tussen de jaren geen significant verschil in de helling van de regressielijn, maar in 2012 ligt de lijn significant hoger dan in de andere jaren.*

De invloed van de sedimentsamenstelling lijkt er in te bestaan dat deze de overblijvende variatie in de scores op de eerste as (i.e. de bodemfauna), die dus niet door de interactie diepte*tau wordt verklaard, voor een aanzienlijk deel verklaard (Figuur 3.5). Na aanleg van de zandmotor, in 2012, is de relatie tussen fauna en sedimentsamenstelling niet terug te vinden. In 2012 is het signaal van de verstoring door de aanleg nog vrij sterk. De gemiddelde totale dichtheid is significant hoger dan in alle andere jaren, terwijl de gemiddelde biomassa niet hoger is. In de monsters die direct of indirect door de aanleg van de Zandmotor zijn geraakt, is nog sprake van invasie door vele soorten, wat ook zichtbaar is in het hoogste gemiddelde aantal soorten per monster in 2012 (significant hoger dan andere jaren) en een significant hogere gemiddelde score op de eerste as van de PCA. In latere jaren, vanaf 2013, zien we dat de relatie tussen fauna en korrelgrootte zich herstelt en terugkeert naar de relatie zoals die was in 2010. Dat patroon is gepaard gegaan met het verlies van een zekere diversiteit en een vermindering in totale dichtheid. Na de verstoring door de aanleg is de lege ruimte gekoloniseerd door juvenielen van vele verschillende soorten, maar alleen de soorten die geschikt zijn om in de heersende omstandigheden te overleven lijken overgebleven na enkele jaren. Bij die selectie lijkt korrelgrootte van het sediment een rol te spelen.

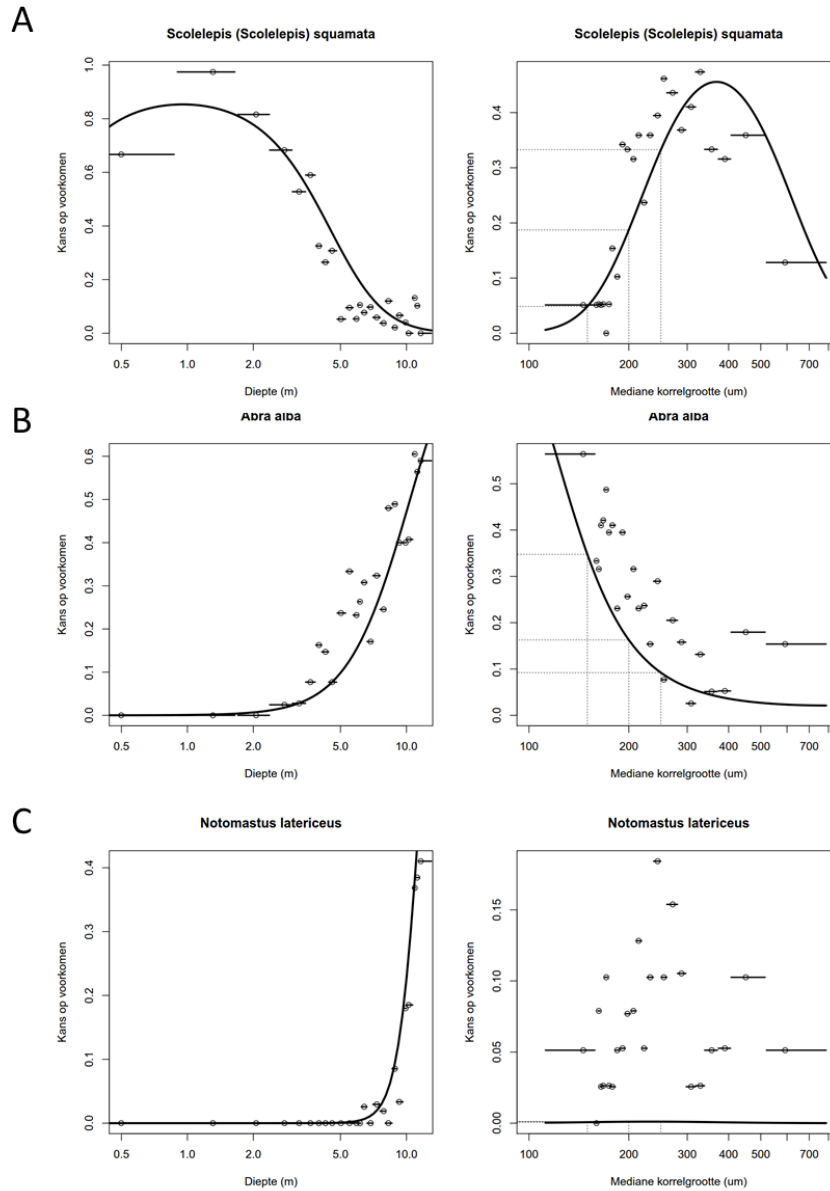


Figuur 3.5: Relatie tussen de residuen van de relaties tussen scores op de eerste as en diepte*tau, zoals getoond in Figuur 3.4, en mediane korrelgrootte van het sediment. In de meeste jaren draagt korrelgrootte van het sediment significant bij aan het verklaren van de variatie in de scores. Dat is echter niet het geval in 2012, en slechts beperkt in 2013. Vanaf 2015 wordt de relatie, die was gevonden voor 2010, opnieuw gevonden met vergelijkbare sterkte en vergelijkbaar functioneel verband.

Patronen in de vooroever langs de Nederlandse kust

Binnen het project 'Natuurlijk Veilig' is een database samengesteld van bestaande gegevens van bodemdieren langs de Nederlandse kust. Daarbij zijn verschillende gebieden in verschillende jaren bemonsterd. Aan de hand van deze dataset is zowel multivariaat als per soort gekeken naar de relatie tussen bodemdieren, diepte, bodemschuifspanning (waar bekend) en sedimentsamenstelling.

Uit de responscurves die per soort de waarschijnlijkheid van voorkomen beschrijven als functie van diepte en sedimentsamenstelling, is gebleken dat sedimentsamenstelling voor een deel van de soorten een significant deel van de variatie verklaart. Daarbij verhoogt de waarschijnlijkheid van voorkomen met de mediane korrelgrootte voor sommige soorten, vooral die soorten die in de brandingszone voorkomen. *Scolelepis (scolelepis) squamata* is daar een goed voorbeeld van (Figuur 3.6 A). Er is een groep soorten waar geen respons op korrelgrootte wordt gevonden (Figuur 3.6 C), maar voor een vrij groot aantal soorten vermindert de waarschijnlijkheid van voorkomen als het sediment grover is (bijvoorbeeld *Abra alba*, Figuur 3.6 B). Die respons kan sterk zijn, tot een factor twee minder kans op voorkomen bij een verschuiving van slechts 50 μm in de mediane korrelgrootte. Dit patroon werd vooral gezien bij de soorten uit de soortenrijke, wat dieper voorkomende gemeenschap die gekenmerkt wordt door een aantal schelpdieren. Een sterke overgang tussen wel en niet voorkomen van deze soorten komt meestal voor bij een mediane korrelgrootte rond 150 tot 250 μm , zoals geïllustreerd voor *Abra alba*.

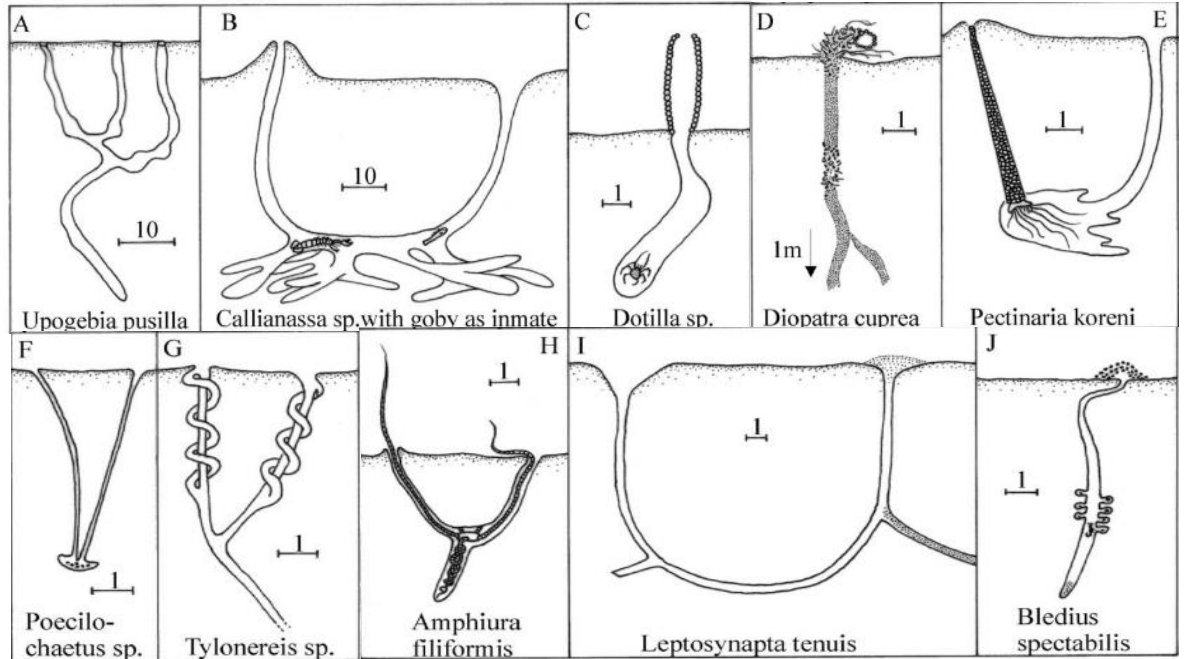


Figuur 3.6: Voorbeelden van responscurves van drie soorten op de factoren diepte en mediane korrelgrootte van het sediment. De respons (kans op voorkomen) is gefit als een multipel regressie op beide onafhankelijke variabelen tegelijk, maar is in twee grafieken weergegeven voor de duidelijkheid. Punten tonen de fractie voorkomens in 25 klassen met gelijk aantal waarnemingen als illustratie. De curves geven kans op voorkomen als functie van de ene variabele, terwijl de andere constant gehouden wordt op de gemiddelde waarde.

Uit deze analyse is geconcludeerd dat een respons van de gemeenschap op een verandering in korrelgrootte kan voorkomen als gevolg van suppleties, als de suppletie de mediane korrelgrootte met enkele tientallen μm zou veranderen. Dat is niet mogelijk als gevolg van een enkele suppletie, maar zou theoretisch het gevolg kunnen zijn van cumulatieve effecten over een langere periode. Het is echter zeer onzeker of een dergelijke verschuiving ook echt kan voorkomen. Er zijn geen metingen voorhanden in frequent gesuppleerde gebieden en over een voldoende lange periode, waarmee deze hypothese kan worden getest.

Terugkoppeling van bodemdieren op sediment

Naast dat het voorkomen van bodemdieren sterk gestuurd wordt door de abiotische omstandigheden zijn bodemdieren ook in staat om het sediment waarin ze leven te veranderen door het graven van gangen, maken van versterkte kokers of door het sediment los te maken. Door bijvoorbeeld het graven van gangen of het filteren van sediment uit de waterkolom worden zandkorrels, nutriënten maar ook zuurstof uitgewisseld tussen het water en de bodem (Reise, 2002; Widdows & Brinsley, 2002).



Figuur 3.7: Een voorbeeld van gangen, tunnels en kokers (Reise, 2002). De ruimere delen van de gangen worden gebruikt om te keren (A,B), een 'schoorsteen uit schelprestjes' om lucht in op te sluiten wanneer het water opkomt (C), een koker in het zand (E), gang van een borstel worm met onderin een ruimte voor uitwerpselen (F), extra gang rond de verticale gang (G), Holtes aan de bovenkant van de gang om voedsel in te vangen (I), Gang met ruimte voor eieren (J).

De bodemdieren beïnvloeden daarmee de stabiliteit van het sediment waardoor het transport van sediment beïnvloed wordt (Borsje et al., 2009; Widdows & Brinsley, 2002). Opgemerkt moet worden dat deze soorten vooral een rol spelen in slibrijke bodems met een deel fijn zand waar de forcering door golven beperkt is. Aan de open kust wordt het sediment echter al regelmatig omgewoeld door (storm)golven én voortbewegende bodemvormen (ribbels, zandgolven en onderwater zandduinen). Toch is beïnvloeding ook in deze omgeving goed beschreven, met name door de schelpkokerworm *Lanice conchilega* (Rabaut et al., 2009; Borsje et al., 2014), die wellicht de sterkste biobouwer is in de vooroever en kustnabije sedimenten.

In deze rapportage wordt een overzicht gegeven van gegevens over bodemdieren en sediment van de Nederlandse en Belgische Noordzeekust. Daarnaast wordt een beschrijving gegeven van de invloed van omgevingsomstandigheden (o.a. sediment, morfologie en bodemschuifspanning) op het voorkomen van bodemdieren. Op basis hiervan zijn de volgende conclusies geformuleerd:

- De analyse van de gegevens over bodemdieren op de Nederlandse en Belgische Noordzeekust geeft aan dat er sterke ruimtelijke verschillen bestaan in de diversiteit en dichtheid van soorten.
 - De diversiteit van de bodemdiergemeenschappen is groter in de noordelijke Nederlandse Noordzee dan voor het zuidelijke deel. Correlaties met de soorten worden voor de Oestergronden en Doggersbank met name gevonden met parameters die gerelateerd zijn aan het water (o.a. de temperatuur, zoutgehalte, stroomsnelheden, stratificatie en diepte) terwijl sediment niet is onderzocht.
 - Het offshore deel van de zuidelijke Nederlandse Noordzee lijkt zowel een kleinere diversiteit als dichtheid van soorten te hebben. Het sediment is hier grover (medium zand met weinig slib) dan voor de noordelijke Nederlandse Noordzee. Ook in het Belgische offshore deel van de Noordzeekust (wat erg vergelijkbaar is) is het aantal soorten en de dichtheid van bodemdieren lager dan in ondiep water. Binnen deze zone is de *N. cirrosa* gemeenschap, die in grover sediment voorkomt dan de *A. alba* gemeenschap, veel armer aan soorten en individuen.
 - In de ondiepe zone van de Nederlandse kust is de biomassa aanzienlijk groter dan voor het offshore deel van de zuidelijke Nederlandse Noordzeekust. De ruimtelijke verdeling van soorten verschilt enorm. Sommige soorten zijn hoofdzakelijk bij bepaalde zeegaten of kustsecties aanwezig. Wellicht is productiviteit (primaire productie beïnvloed door de aanvoer van nutriënten uit de rivieren) een belangrijke verklarende factor hiervoor, maar ook fysische factoren en sedimentsamenstelling kunnen een rol spelen. Binnen de kustzone zijn bepaalde soorten, bv. *Spisula subtruncata* of *Abra alba*, gebonden aan zones met relatief fijn sediment.
 - Bij de Zandmotor lijkt het veranderen van de omgevingscondities een invloed te hebben op de ruimtelijke verdeling van de soorten. Zowel diepte, bodemschuifspanning als sedimentsamenstelling spelen een rol bij het bepalen van de soortengemeenschap. Opmerkelijk was dat de aanpassing van de gemeenschap aan de sedimentsamenstelling trager lijkt te verlopen dan de aanpassing aan diepte en bodemschuifspanning.
- Zowel bodemsediment, morfologie als bodemschuifspanning kunnen worden gecorreleerd aan de bodemdiergemeenschappen in de ondiepe kustzone. Er is per soort vaak een duidelijke voorkeur te onderscheiden voor de dieptezone en bodemschuifspanning of sediment.
 - Een invloed van het bodemsediment, als verklarende factor voor het voorkomen van bodemleven, lijkt van belang te zijn voor de Zandmotor. Ook wordt zo'n invloed beschreven voor het Belgisch deel van de Noordzeekust. Opgemerkt moet echter worden dat in de gebieden waar de bodemsamenstelling is veranderd vaak ook de hydrodynamische omstandigheden wijzigen.

- Naast de korrelgrootte is ook het slibgehalte van belang voor bepaalde soortengemeenschappen, en dan met name in gebieden met een groter slibgehalte (i.e. overwegend niet zandig). Voor bodemdieren die zich voeden door water te filteren is de hoeveelheid slib in de waterkolom met name relevant, maar ook voor de permeabiliteit van de bodem is slib belangrijk. In de ondiepe kustzone is het sediment overwegend zandig en de invloed van slibgehalte minder groot.
- Voor vissen (Tong en Schol) is een relatie met het (zandige) bodemsediment vastgesteld in laboratoriumexperimenten, aangezien het ingraven niet in elk bodemsediment even eenvoudig of effectief is.
- In de morfologie van de kust (en dieptezones) kunnen gebieden worden onderscheiden met een duidelijk verschillende samenstelling van bodemleven, zoals in de troggen, op de banken, in de ondiepe brandingszone en zeewaarts van de brekerbanken. Deze gebieden worden dan ook gekenmerkt door grote verschillen in de golfforcering, stroming, sedimentmobiliteit en korrelgrootte. Het is niet per se duidelijk welke combinatie van omstandigheden (stroming, golven, sediment en sedimentatie/erosie) er voor zorgt dat soorten zich op deze specifieke zones vestigen.
- Bodemschuifspanning is in combinatie met diepte de sterkste verklarende factor voor het voorkomen van soorten bodemdieren als op grotere schaal wordt gekeken naar de ondiepe Nederlandse kust (ongeveer eerste 20 km). Daarnaast blijkt uit de zandmotor-data dat sediment ook een verklarende factor is. Op grotere schaal hangt sedimentsamenstelling samen met zowel de bodemschuifspanning als de diepte, wat een analyse daarvan compliceert.
- Er is ook een terugkoppeling van bodemleven op het bodemsediment, wat samenhangt met het filteren, opwoelen en begraven van slib en biomassa door bodemdieren. Verondersteld wordt echter dat dit effect het grootst is voor getijdebassins of op diepere (rustiger) locaties waar meer fijner sediment beschikbaar is. Uit het deel van de ondiepe kustzone waar suppleties worden geplaatst (tot ~8 meter waterdiepte) is alleen van de schelpkokerworm *Lanice conchilega* beschreven dat hij riffen bouwt en een actieve biobouwer is (Rabaut et al., 2009). Voor de meeste andere soorten is de dynamiek in deze zone te groot en worden mogelijke biologische effecten in de schaduw gesteld door de natuurlijke beweging van het sediment als gevolg van stroming en golven.

Ondanks de beschikbare kennis over het voorkomen van bodemleven én de invloed van omgevingscondities, is het een grote uitdaging om de impact op het ecosysteem vast te stellen voor zandsuppleties en andere ingrepen in het kuststelsel. Het doen van voorspellingen over toekomstige ontwikkelingen of over de effecten van mitigerende maatregelen is moeilijk. Oorzaken hiervoor zijn met name de 1) beperkte kennis van de specifieke eigenschappen en omgevingseisen van de soortengemeenschappen, 2) de sterke onderlinge samenhang tussen de omgevingsfactoren als bodemschuifspanning, sediment en diepte die het moeilijk maken de invloed per aspect te onderzoeken, en 3) het niet altijd beschikbaar zijn van aanvullende abiotische data bij metingen. Mogelijk kunnen meetcampagnes ook effectiever worden uitgevoerd als de hypothesen van tevoren worden getoetst met modellen of analyses van de beschikbare gegevens. Op basis van de bevindingen komen een aantal aanbevelingen naar voren die kunnen helpen bij het beter begrijpen van de sturende factoren voor bodemdieren in de kustzone:

- 1) De relatie tussen omgevingscondities (o.a. morfologie, sediment, hydrodynamica maar ook voedselaanbod) en het voorkomen van bodemdieren en andere organismen zoals vissen kan worden onderzocht. Dit kan in het veld maar mogelijk ook onder laboratorium omstandigheden.
 - a. De voorkeuren die soorten hebben voor de omgevingscondities kunnen in gecontroleerde (laboratorium) omstandigheden worden onderzocht. Op deze wijze kan er gestructureerd worden gezocht naar de invloed van afzonderlijke omgevingscondities. Opgemerkt moet worden dat het ondoenlijk zal zijn dit voor een groot aantal soorten te doen.
 - b. Veldonderzoek kan gedaan worden bij de Zandmotor, omdat de omgevingscondities daar zodanig zijn dat diepte, bodemschuifspanning en sedimentsamenstelling minder sterk samenhangen, waardoor het effect van afzonderlijke variabelen beter te onderzoeken is.
- 2) Het monitoren van vaste monsterpunten, zoals dit al jaren gedaan wordt, is nog steeds van groot belang om de huidige situatie te kunnen beoordelen en ontwikkelingen te signaleren. Op deze wijze kunnen jaar tot jaar variaties en lange-termijn trends beter begrepen worden.
- 3) Bestaande monitoring zou aangevuld moeten worden met relevante abiotische gegevens, waarbij sedimentsamenstelling, diepte en precieze coördinaten de belangrijkste zijn. Bij de bemonsteringen voor de Schelpdiersurvey worden geen sedimentgegevens verzameld. Met relatief weinig extra werk komt er veel meer informatie beschikbaar.
- 4) Door gebruik te maken van hydrodynamische en morfologische modellen voorafgaand aan de bemonstering kan er gericht gemeten worden. De meetlocaties kunnen ruimtelijk en in de tijd beter worden geplaatst als de vooraf berekende golfforcering, stromingen en (netto) transportpaden van sediment in beeld zijn gebracht. Ook valt de informatie achteraf beter te begrijpen.
- 5) Door de inzet van nieuwe meettechnieken, zoals bijvoorbeeld de side scan sonar (Steven Degraer et al., 2003; Paap, 2011), multibeam met backscatter informatie (Simons and Snellen, 2009; Mestdagh et al., 2020), remote sensing en onderwater camera's (Damveld et al., 2018; Didderen, Bouma, & Lengkeek, 2011; Lengkeek, Bouma, & van den Boogaard, 2010) kan de efficiëntie van het monitoringprogramma mogelijk vergroot worden.

Referenties

- Baptist, M. J., van Dalen, J., Weber, A., Passchier, S., & van Heteren, S. (2006). The distribution of macrozoobenthos in the southern North Sea in relation to meso-scale bedforms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(3–4), 538–546. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.02.023>
- Beyst, B., Hostens, K., & Mees, J. (2001). Factors influencing fish and macrocrustacean communities in the surf zone of sandy beaches in Belgium: temporal variation. *Journal of Sea Research*, 46, 281–294.
- Borsje, B. W., de Vries, M. B., Bouma, T. J., Besio, G., Hulscher, S. J. M. H., & Herman, P. M. J. (2009). Modeling bio-geomorphological influences for offshore sandwaves. *Continental Shelf Research*, 29(9), 1289–1301. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.02.008>
- Borsje, B.W., Bouma, T.J., Rabaut, M., Herman, P.M.J., and Hulscher, S.J.M.H. (2014). Formation and erosion of biogeomorphological structures: A model study on the tube-building polychaete *Lanice conchilega*. *Limnology and Oceanography* 59(4), 1297-1309. doi: 10.4319/lo.2014.59.4.1297.
- Breine, N. T., De Backer, A., Van Colen, C., Moens, T., Hostens, K., & Van Hoey, G. (2018). Structural and functional diversity of soft-bottom macrobenthic communities in the Southern North Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 214, 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.09.012>
- Broekema, Y. B., Giardino, A., van der Werf, J. J., van Rooijen, A. A., Vousdoukas, M. I., & van Prooijen, B. C. (2016). Observations and modelling of nearshore sediment sorting processes along a barred beach profile. *Coastal Engineering*, 118, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.08.009>
- Damen, J. M., van Dijk, T. A. G. P., & Hulscher, S. J. M. H. (2018). Spatially Varying Environmental Properties Controlling Observed SandWaveMorphology. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123.
- Damveld, J. H., van der Reijden, K. J., Cheng, C., Koop, L., Haaksma, L. R., Walsh, C. A. J., ... Hulscher, S. J. M. H. (2018). Video Transects Reveal That Tidal Sand Waves Affect the Spatial Distribution of Benthic Organisms and Sand Ripples. *Geophysical Research Letters*, 45(21), 11,837-11,846. <https://doi.org/10.1029/2018GL079858>
- De Backer, A., & Hostens, K. (2013a). *T2 situatie - ecologische analyse 2012: Epibenthos en (juvenile) visbemonstering Ameland en Schiermonnikoog*. Oostende: ILVO.
- De Backer, A., & Hostens, K. (2013b). *T3 situatie - ecologische analyse 2013: Juvenile visbemonstering Ameland en Schiermonnikoog*. Oostende: ILVO.
- De Bakker, A. T. M., & Huisman, B. J. A. (2019). *Invloed suppleties op bodemsamenstelling. Modelleren van verandering in korrelgrootte*. Delft.
- Degraer, S., Verfaillie, E., Willems, W., Adriaens, E., Vincx, M., Lancker, V. Van, & van Lancker, V. (2008). Habitat suitability modelling as a mapping tool for macrobenthic communities : An example from the Belgian part of the North sea. *Continental Shelf Research*, 28, 369–379. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.09.001>
- Degraer, Steven, Van Lancker, V., Moerkerke, G., Van Hoey, G., Vanstaen, K., Vincx, M., & Henriët, J. (2003). *Evaluation of the ecological value of the foreshore habitat-model and macrobenthic side-scan sonar interpretation: extension along the Belgian coastal zone*. Gent.
- Didderen, K., Bouma, S., & Lengkeek, W. (2011). *Onderwater videobeelden van de zeebodem ten noorden van Ameland. Een test van een videotechniek als quick scan methode om benthos te inventariseren*. Culemborg.
- Dorst, L. L. (2009). *Estimating Sea Floor Dynamics in the Southern North Sea to Improve Bathymetric Survey Planning*. <https://doi.org/10.3990/1.9789036528788>
- Eisma, D. (1986). 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.
- Goudswaard, P. C., van Asch, M., & Troost, K. (2014). Monitoring VIBEG voor bodemdieren T0 in 2013. In *Rapport / IMARES Wageningen UR;C046/14*. Retrieved from <http://edepot.wur.nl/298295>

- Gray, J., & Elliott, M. (2009). Ecology of Marine Sediments. In *Ecology of Marine Sediments* (2nd ed.). Oxford: Oxford University press.
- Groenewold, S., & Dankers, N. M. J. A. (2002). *ECOslib. De ecologische rol van slib*. Wageningen: Alterra.
- Guillén, J., & Hoekstra, P. (1996). The “equilibrium” distribution of grain size fractions and its implications for cross-shore sediment transport: A conceptual model. *Marine Geology*, 135, 15–33.
- Herman, P.M.J., Moons, J.J.S., Wijsman, J.W.M., Luijendijk, A.P., and Ysebaert, T. (2021). A Mega-Nourishment (Sand Motor) Affects Landscape Diversity of Subtidal Benthic Fauna. *Frontiers in Marine Science* 8, 605.
- Holzauer, H., Borsje, B. W., van Dalfsen, J. A., Wijnberg, K. M., Hulscher, S. J. M. H., & Herman, P. M. J. (2020). Benthic Species Distribution Linked to Morphological Features of a Barred Coast. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 16. <https://doi.org/10.3390/jmse8010016>
- Huisman, B.J.A., De Schipper, M.A., Ruessink, B.G. (2016). Sediment sorting at the Sand Motor at storm and annual time scales. *Marine Geology*, Vol. 381, pp. 209-226.
- Huisman, B.J.A., Ruessink, B.G., De Schipper, M.A., Luijendijk, A.P., Stive, M.J.F. (2018). Modelling of bed sediment composition changes at the lower shoreface of the Sand Motor. *Coastal Engineering*, Vol. 132, pp. 33-49
- Inman, D. L. (1953). *Areal and seasonal variations in beach and nearshore sediments at La Jolla, California*.
- Janssen, G.M., Mulder, S. (2005). Zonation of macrofauna across sandy beaches and surf zones along the Dutch coast. *OCEANOLOGIA* 47, 265–282.
- Janssen, G. M., Kleef, H., Mulder, S., & Tydeman, P. (2008). Pilot assessment of depth related distribution of macrofauna in surf zone along Dutch coast and its implications for coastal management. *Marine Ecology*, 29(1), 186–194.
- Kröncke, I., Becker, L. R., Badewien, T. H., Bartholomä, A., Schulz, A.-C., & Zielinski, O. (2018). Near- and Offshore Macrofauna Communities and Their Physical Environment in a South-Eastern North Sea Sandy Beach System. *Frontiers in Marine Science*, 5(December), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00497>
- Lengkeek, W., Bouma, S., & van den Boogaard, B. (2010). *Onderwater videobeelden van de Voordelta en de Zeeuwse banken*. Culemborg: Bureau Waardenburg.
- Markert, E., Kröncke, I., & Kubicki, A. (2015). Small scale morphodynamics of shoreface-connected ridges and their impact on benthic macrofauna. *Journal of Sea Research*, 99, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2015.02.001>
- Mestdagh, S., Amiri-Simkoei, A., van der Reijden, K.J., Koop, L., O'Flynn, S., Snellen, M., et al. (2020). Linking the morphology and ecology of subtidal soft-bottom marine benthic habitats: A novel multiscale approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 238, 106687. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106687>.
- Moutzouris, C. I., Kraus, N. C., Gingerich, K. J., & Kriebel, D. L. (1991). Beach profiles versus cross-shore distributions of sediment grain sizes. In *Advances in Coastal Modeling* (pp. 860–874). New York, NY: American Society of Civil Engineers.
- Paap, B. (2011). *Benthos kartering met behulp van side scan sonar voor de kust van Noordwijk*. Utrecht.
- Perdon, K. J., Troost, K., Van Zwol, J., Van Asch, M., & Pool, J. vander. (2018). *Schelpdierbestanden in de Nederlandse kustzone in 2018*. IJmuiden.
- Post, M. H. M., Blom, E., Chen, C., Bolle, L. J., & Baptist, M. J. (2017). Habitat selection of juvenile sole (*Solea solea* L.): Consequences for shoreface nourishment. *Journal of Sea Research*, 122, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2017.02.011>
- Rabaut, M., Vincx, M., and Degraer, S. (2009). Do *Lanice conchilega* (sandmason) aggregations classify as reefs? Quantifying habitat modifying effects. *Helgoland Marine Research* 63(1), 37-46. doi: 10.1007/s10152-008-0137-4.
- Rachor, E., Reiss, H., Degraer, S., Duineveld, G. C. A., van Hoey, G., Lavaleye, M., ... Rees, H. L. (2003). Structure, distribution, and characterizing species of North Sea macro-zoobenthos communities in 2000. In *Structure and dynamics of the North Sea benthos* (pp. 46–59). Retrieved from http://www.ices.dk/pubs/crr/crr288/CRR_288.pdf

- Radermacher, M., de Schipper, M. A., Price, T. D., Huisman, B. J. A., Aarninkhof, S. G. J., & Reniers, A. J. H. M. (2018). Behaviour of subtidal sandbars in response to nourishments. *Geomorphology*, *313*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.04.005>
- Reise, K. (2002). Sediment mediated species interactions in coastal waters. *Journal of Sea Research*, *48*, 127–141.
- Reiss, H., Birchenough, S., Borja, A., Buhl-Mortensen, L., Craeymeersch, J., Dannheim, J., ... Degraer, S. (2015). Benthos distribution modelling and its relevance for marine ecosystem management. *ICES Journal of Marine Science*, *72*(2), 297–315. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu107>
- Reiss, H., Degraer, S., Duineveld, G. C. A., Kröncke, I., Aldridge, J., Craeymeersch, J. A., ... Rees, H. L. (2010). Spatial patterns of infauna, epifauna, and demersal fish communities in the North Sea. *Ices Journal of Marine Science*, *67*, 278–293.
- Shepherd, R. G. (1989). Correlations of permeability and grain size. *Groundwater*, *27*, 633–638.
- Simons, D.G., and Snellen, M. (2009). A Bayesian approach to seafloor classification using multi-beam echo-sounder backscatter data. *Applied Acoustics* *70*(10), 1258-1268. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.07.013>.
- Teal, L. R., & Van Keeken, O. A. (2011). *The importance of the surf zone for fish and brown shrimp in The Netherlands. A literature review*. IJmuiden: IMARES.
- Terwindt, J. H. J. (1962). *Study of grain size variations at the coast of Katwijk 1962*. Den Haag.
- Tien, N. S. H., Craeymeersch, J., van Damme, C., Couperus, A. S., Adema, J., & Tulp, I. (2017). Burrow distribution of three sandeel species relates to beam trawl fishing, sediment composition and water velocity, in Dutch coastal waters. *Journal of Sea Research*, *127*, 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2017.05.001>
- Troost, K., Goudswaard, P. C., & van Asch, M. (2014). *Monitoring VIBEG voor bodemdieren Vlake van de Raan. TO in 2013*. IJmuiden: Imares.
- Tulp, I., van Hal, R., & Rijnsdorp, A. (2006). *Effects of climate change on North Sea fish and benthos*. Yerseke: IMARES.
- van Colen, C., Montserrat, F., Vincx, M., Herman, P. M. J., Ysebaert, T., & Degraer, S. (n.d.). *Benthos-Mediated sediment dynamics: Implications for growth and production of juvenile recruits*.
- van Dalen, J. A., & Oosterbaan, J. (1996). Risk analysis of coastal nourishment techniques. The effects on benthic fauna of sand extraction off the island Terschelling. The Netherlands. Report 5: Post-Extraction survey, September-October 1994. In *RIACON*. Haren: Rijksinstituut voor Kust en Zee.
- van Dalen, J.A., Essink, K. (1999). RIACON: Risk analysis of coastal nourishment techniques in the Netherlands. *Senckenbergiana Maritima* *29*, 51–53. <https://doi.org/10.1007/bf03043120>
- van Dalen, J.A., Essink, K. (2001). Benthic Community Response to Sand Dredging and Shoreface Nourishment in Dutch Coastal Waters. *Senckenbergiana maritima* *31*, 329–332.
- van Dalen, J. A. (2009). *Inventarisatie brandingszone*. Wageningen.
- Van de Meene, J. W. H., & Van Rijn, L. C. (2000). The shoreface-connected ridges along the central Dutch coast - Part 2: Morphological modelling. *Continental Shelf Research*, *20*(17), 2325–2345. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00049-2)
- van den Bogaart, L., van Hal, R., van der Meijden, M., Brasseur, S., Baptist, M., & Wijsman, J. (2019). *De ecologie van het Amelanders Zeegat*. IJmuiden.
- van Hoey, G., Degraer, S., & Vincx, M. (2004). Macrobenthic community structure of soft-bottom sediments at the Belgian Continental Shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *59*(4), 599–613. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2003.11.005>
- 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.
- Vanaverbeke, J., Merckx, B., Degraer, S., & Vincx, M. (2011). Sediment-related distribution patterns of nematodes and macrofauna: Two sides of the benthic coin? *Marine Environmental Research*, *71*(1), 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2010.09.006>
- Verduin, E. C., Templeman, D., & van Moorsel, G. W. N. M. (2012). *The Macrobenthic Fauna Monitoring in the Dutch Sector of the North Sea, MWTL 2010 and a comparison with previous data*. Amsterdam: Grontmij.
- Vergouwen, S. A., Holzhauer, H., Stolte, W., Herman, P., & Prins, T. (2018). *Update lange termijn data-analyse*. Delft: Deltares.

- Vergouwen, S.A., Meijer-Holzhauer, H. (2016). *Ontwikkeling van het bodemleven in de vooroever na aanleg van een onderwatersuppletie van het bodemleven in de vooroever na aanleg van een onderwater-suppletie*. Case studie Ameland en Schiermonnikoog 2009-2014. Delft.
- Walstra, D. J. R., Reniers, A. J. H. M., Ranasinghe, R., Roelvink, J. A., & Ruessink, B. G. (2012). On bar growth and decay during interannual net offshore migration. *Coastal Engineering*, 60, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.10.002>
- Widdows, J., & Brinsley, M. (2002). Impact of biotic and abiotic processes on sediment dynamics and the consequences to the structure and functioning of the intertidal zone. *Journal of Sea Research*, 48(2), 143–156. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(02\)00148-X](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(02)00148-X)
- Wijsman, J., Ende, D. van den, & Brummelhuis, E. (2018). *Bodemdiergemeenschap in de vooroever en op het natte strand van de zandmotor in het najaar 2017*.
- Wijsman, J. W. M., & Craeymeersch, J. A. (2016). *Effect van diepe vooroeversuppletie bij Callantsoog op de benthosgemeenschap. Resultaat T0-bemonstering najaar 2015*. Yerseke.
- Wijsman, J. W. M., van Hal, R., & Jongbloed, R. H. (2015). *Monitoring en Evaluatie Pilot Zandmotor Fase 2. Evaluatie benthos, vis, vogels en zeezoogdieren 2010 - 2014*. Yerseke: Imares.

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