

Review effecten natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering in de sublitorale Waddenzee

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

PROGRAMMA NAAR EEN RIJKE WADDENZEE

Altenburg & Wymenga
ECOLOGISCH ONDERZOEK

Auteurs

A. Rippen
E. van der Zee
N. Fieten
J. Latour
E. Wymenga

In opdracht van

Programma naar een Rijke Waddenzee
Rijkswaterstaat

Voorwoord

In de Waddenzee vinden tal van menselijke activiteiten plaats. Transport over water, visserij, delfstofwinning, kabelaanleg, baggeren, zandsuppleties en zo meer. Veel van die activiteiten brengen bodemberoering in de sublitorale delen van de Waddenzee met zich mee. Tegelijkertijd kenmerkt het gebied zich door een hoge natuurlijke dynamiek door wind, stroming en getij. Die dynamiek is bepalend voor de van nature aanwezige bodemsamenstelling en -structuur, en het leven op en in de bodem. Een belangrijke beleidsvraag is in hoeverre menselijke activiteiten effect hebben op de natuurlijke situatie. De wetenschappelijke uitdaging bij het beantwoorden van deze vraag is hoe de natuurlijke dynamiek met alle ruimtelijke en temporele variatie daarin te onderscheiden is van de effecten van menselijk gebruik op de natuurlijke situatie.

Er is (en wordt) veel gepubliceerd over bodemberoering. Maar het ontbreekt tot nu toe aan een actueel overzicht van de stand van kennis in een gebied als de Waddenzee over de impact van door de mens veroorzaakte bodemberoerende activiteiten in vergelijking met natuurlijke dynamiek. Rijkswaterstaat (RWS) en Programma naar een Rijke Waddenzee (PRW) vinden het van belang om de effecten van bodemberoering in beeld te krijgen om - indien nodig - beleid en beheer te ontwikkelen voor het verminderen van die impact.

Aan Altenburg en Wymenga is gevraagd de beschikbare, en voor de Waddenzee relevante, kennis over ecologische en morfologische effecten van menselijke en natuurlijke bodemberoering samen te brengen in de vorm van een literatuurreview. Daarbij is verzocht om de omvang van de effecten van menselijke activiteiten zoveel mogelijk kwantitatief in beeld te brengen en zo veel mogelijk in relatie tot de natuurlijke dynamiek. Het rapport ‘Review effecten natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering in de sublitorale Waddenzee’ is het product van deze opdracht.

Ondanks dat er veel literatuur beschikbaar is, is ook gebleken dat er nog veel kennislacunes zijn rond de effecten van diverse vormen van bodemberoering sublitoraal en hoe deze zich verhouden tot de natuurlijke dynamiek. De effecten beschreven in de verschillende wetenschappelijke studies laten zich daarbij onderling vaak lastig vergelijken door verschillende onderzoeksmethodes, beoordelingscriteria, de vraag in hoeverre de omstandigheden in betreffende studies wel representatief zijn voor de Waddenzee, etc. Het kwantitatief beschrijven van effecten bleek mede om deze reden veelal niet haalbaar, reden waarom de bevindingen in het rapport vooral in kwalitatieve termen zijn weergegeven. Niettemin achten wij de bevindingen van het rapport waardevol als kennisoverzicht en dan met name de volgende kernbevindingen:

- Er is een verschil in de bodemsoortensamenstelling tussen hoog- en laag-dynamische sublitorale gebieden in de Waddenzee. De hoog-dynamische gebieden zijn vooral de grote getijgeulen, in het algemeen relatief dichtbij de zeegaten. De laag-dynamische gebieden bevinden zich in de kleinere geulen, de wantijen en meer richting de kust van het vaste land.
- In de laag-dynamische gebieden bevinden zich soorten die gevoeliger zijn en langzamer herstellen dan in de hoog dynamische gebieden.
- De gevolgen van een gelijke aard en mate van menselijke bodemberoering zullen (daardoor) in het algemeen groter zijn in laag-dynamische gebieden, waar immers soorten leven die sensitiever zijn en een langere hersteltijd hebben.
- Extractie (zoals baggeren en schelpenwinning) en bedekking (zoals zandsuppletie en verspreiding baggerspecie) hebben lokaal de grootste impact.
- Lichtere vormen van menselijke bodemberoering, zoals garnalenvisserij, kunnen door hun frequentie en de schaal waarop ze plaats vinden netto ook impact hebben.
- In laag-dynamische gebieden is de kans groter dat frequente bodemberoering herstel verhindert en de bodemgemeenschap zich ontwikkelt naar één die meer kenmerkend is voor meer dynamische gebieden.

Wij hebben de Waddenacademie gevraagd kritisch naar dit rapport te kijken op de volgende punten:

- Of het een adequaat overzicht geeft over de in de literatuur aanwezige kennis van voor de Waddenzee relevante ecologische en morfologische effecten van menselijke en natuurlijke bodemberoering.
- Of de kernbevindingen voldoende onderbouwd zijn.

De Waddenacademie heeft drie onafhankelijke deskundigen, die niet bij het opstellen van het rapport betrokken waren, gevraagd om onafhankelijk van elkaar de review uit te voeren. Hun samengevatte commentaar luidt als volgt:

- De auteurs van het rapport zijn erin geslaagd om een bewonderenswaardige hoeveelheid rapporten en artikelen te verwerken, zij het dat het op basis van de beschrijving van de toegepaste zoek- en selectiemethode niet goed te achterhalen is of de literatuurlijst volledig is.
- Hoewel de deskundigen hier en daar een kritische kanttekening plaatsen, lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat de kernbevindingen van het rapport in voldoende mate zijn onderbouwd.

De belangrijkste kritische kanttekeningen zijn:

- De indeling in laag- en hoog-dynamische delen is klaarblijkelijk volledig gebaseerd op resultaten van een getijmodel. Daarbij blijft het effect van golven buiten beschouwing. Echter in de uitgevoerde analyse wordt maar zeer beperkt aandacht besteed aan de effecten van het getij en gaat de aandacht vooral uit naar het effect van stormen en daarmee golven.
- Onder invloed van stroming en golven kan ook sprake zijn van een verandering in sedimentsamenstelling en sedimentologische opbouw van het sediment in het sublitoraal. Ook dit heeft gevolgen voor organismen.
- De opgave om een vergelijking te maken tussen de natuurlijke dynamiek van de bodem en die ten gevolge van menselijk handelen is om verschillende redenen op dit moment feitelijk nog een brug te ver. Met name bij de hypothetische vergelijking van de impact van garnalenvisserij versus het effect van stormen zijn vraagtekens te zetten. Dat geldt zowel voor de wijze waarop de conclusie wordt geformuleerd als wel voor het nut van een dergelijke vergelijking.

Naar aanleiding van de review zijn er enige beperkte wijzigingen doorgevoerd. De beschouwelijk exercitie waarbij de effecten van storm en garnalenvisserij worden beschreven is wel gehandhaafd, omdat deze illustreert hoe menselijke bodemberoering, die altijd additioneel is aan natuurlijke bodemberoering, met name bij frequente herhaling mogelijk leidt tot onvoldoende hersteltijd van gevoelige bodemdiergemeenschappen.

De volledige reviewtekst is weergegeven in bijlage 1.

Zoals eerder aangegeven, is er behoefte aan kennis die gebruikt kan worden bij het vormgeven van beheer en beleid. Deze studie is een eerste stap in dat zoekproces. De bevindingen in deze studie zijn relevant, maar vooral kwalitatief van aard en daardoor nog een onvoldoende basis voor verdere beleidsvorming. Dit blijkt ook uit de review van de Waddenacademie. Vervolgstappen in de vorm van vervolgonderzoek, zoals ook aangegeven in de aanbevelingen in het rapport zelf en conform de aanbevelingen van de review, zijn nodig om een dergelijke basis te leggen. De Programmatische Aanpak Grote Wateren met het onderdeel Onderwaternatuurherstel kan hierbij een belangrijke rol spelen. We zullen met betrokken waddenpartijen in gesprek gaan om de weg uit te stippelen waarlangs de vervolgstappen het best kunnen worden vormgegeven en waar de focus van het vervolgonderzoek dient te worden gelegd. In de tussentijd hopen wij dat dit rapport ook voor u van waarde is voor het begrijpen, behouden en versterken van een rijke Waddenzee.

Hoofdingenieur-directeur Noord Nederland Rijkswaterstaat - Joost de Ruig
Programmadirecteur Programma naar een Rijke Waddenzee - Hendrikus Venema

Dankwoord

Deze opdracht is aangestuurd door een projectgroep bestaande uit medewerkers van PRW en RWS (Sonja van der Graaf, Hein Sas en Lies van Nieuwerburgh). Dank voor de goede samenwerking.
Het tussenproduct en het eindproduct is besproken met deskundigen uit de klankbordgroep (Addy Risseeuw van PO Mosselcultuur, Barbara Holierhoek van Visafslag Lauwersoog, Frank Timmer van TenneT, Angelo Kouwenhoven van het Ministerie van LNV, Geertjan Smits van Natuurmonumenten, Allix Brenninkmeijer van de Provincie Groningen en Marnix van Stralen van MarinX). Tevens is het eindproduct ter review aangeboden aan de Waddenacademie (o.l.v. Katja Philippart). Dank aan de leden van de klankbordgroep en geraadpleegde deskundigen (waaronder WaterProof B.V.) voor deskundig advies en het aanleveren van bronnen.

Inhoudsopgave

Samenvatting 6
Summary 11

1. Inleiding 15
1.1 Aanleiding 15
1.2 Doel 15
1.3 Geografische afbakening 16
1.4 Aanpak en leeswijzer 17
2. Ontwikkeling analytisch afwegingskader 18
2.1 Beknopte beschrijving van het sublitorale deel van de Waddenzee 18
2.2 Bodemberoering typologie 20
2.3 Inventarisatie van artikelen en mogelijke indicatoren 22
2.4 Selectie van indicatoren voor het afwegingskader 27
2.5 Indeling sublitoraal in subsystemen 39
2.6 Belangrijkste bevindingen 41
3. Bodemberoering 41
3.1 Effecten van bodemberoering door systeemeigen dynamiek 41
3.2 Effecten van bodemberoering door natuurlijke 'events' 53
3.3 Effecten van bodemberoering door omwoeling/schuring (visserij) 60
3.4 Effecten van bodemberoering door extractie (winning) 71
3.5 Effecten van bodemberoering door bedekking 82
3.6 Effecten van bodemberoering door obstructie / constructie 88
3.7 Belangrijkste bevindingen 91
4. Natuurlijke vs. menselijke bodemberoering 92
4.1 Beperkingen bij de vergelijking 92
4.2 Bevindingen vergelijking natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering 94
4.3 Vergelijking storm versus garnalenvisserij 99
4.4 Belangrijkste bevindingen 101
5. Kennisleemten en onderzoeksaanbevelingen 102
5.1 Kennisleemten 102
5.2 Aanbevelingen 103
6. Bevindingen 107
7. Literatuur 110

Bijlage 1. Review Waddenacademie 117
Bijlage 2. Indeling analysetabel 133
Bijlage 3. Abiotische kenmerken 141
Bijlage 4. Biotische kenmerken 142
Bijlage 5. Sensitiviteit en hersteltijd 146
Bijlage 6. Overige menselijke bodemberoering 151

Samenvatting

In voorliggende review is de huidige kennis over effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering in het sublitorale deel van de Waddenzee op een rij gezet. Daarbij is gekeken naar de vraag hoe de effecten van menselijke bodemberoering zich verhouden tot natuurlijke bodemdynamiek. Deze zeer relevante, maar ook complexe vergelijking is tot op heden voor de Waddenzee nog niet gedaan. De resultaten uit voorliggende review geven waardevolle nieuwe inzichten om de effecten van menselijke bodemberoering in perspectief te kunnen plaatsen in de van nature dynamische Waddenzee.

Methodiek

Om tot de review te komen, is een afbakening gemaakt; o.a. van type beroering, van type effecten, van de manier van zoeken naar literatuur, het gebruik daarvan en in de presentatie van resultaten.

Er zijn diverse indicatoren onderkend die in de praktijk gebruikt worden om de effecten van bodemberoering te beschrijven. Het gaat daarbij vooral om indicatoren die de effecten op morfologie en biotiek beschrijven. Er is met deze indicatoren en systeem-/ingreep eigenschappen een afwegingskader opgesteld, om verschillende typen bodemberoering op een eenduidige manier met elkaar te kunnen vergelijken. Er zijn daarbij drie kernindicatoren onderkend die bij het vergelijken van de effecten goed gebruikt kunnen worden: de bodemschuifspanning, de sensitiviteit (gevoeligheid) en de hersteltijd van soorten. Om effecten beter te kunnen vergelijken en beoordelen is tevens onderscheid gemaakt in het type subsysteem waarin de bodemberoering plaatsvindt: de hoog en laag dynamische systemen van het sublitoraal.

Resultaten

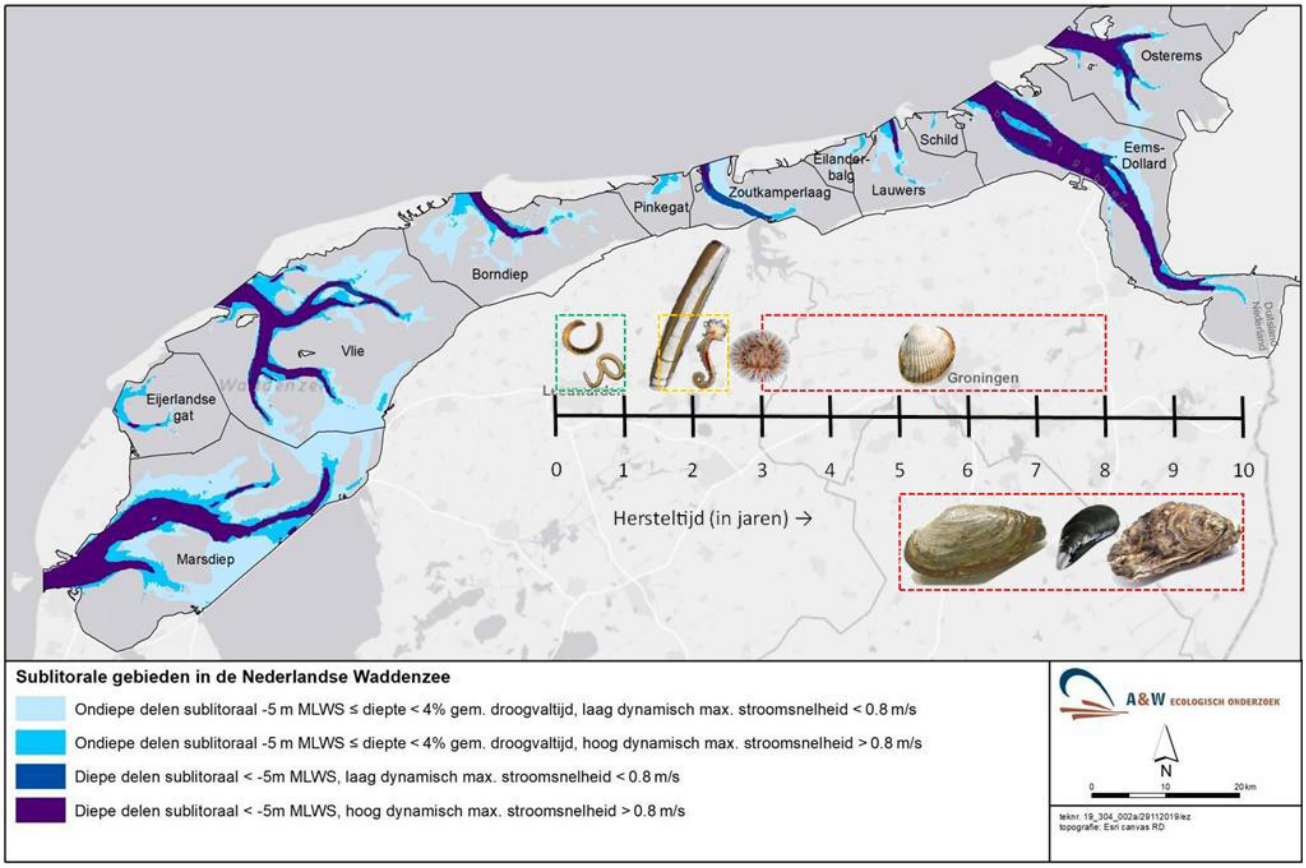
De beschrijving van de effecten van natuurlijke bodemdynamiek op de morfologie en biotiek is complex, omdat natuurlijke dynamiek uit veel verschillende facetten bestaat. Zo is er op dagelijkse schaal sprake van stroming door getij, met daarbij vaak ook door wind aangedreven golven. Deze natuurlijke vormen van dynamiek zijn sterk bepalend voor hoe het sublitoraal eruit ziet, maar ook vice versa (de abiotiek beïnvloedt de biotiek en de biotiek de abiotiek).

In hoog dynamische gebieden is er over het algemeen sprake van een hogere bodemschuifspanning, grotere korrelgrootte van het sediment, lagere slibfractie en meer erosie. Bodemdieren zijn aan deze omstandigheden aangepast door o.a. hun verschijningsvorm (meer robuust) en levenswijze (snel reproducerend, korte levensduur). In termen van sensitiviteit en herstel leven hier laag sensitieve soorten, die weinig gevoelig zijn voor verstoring en een korte hersteltijd hebben. In de hoog dynamische gebieden is de bodemdiergemeenschap weinig divers.

In laag dynamische delen van het sublitoraal is overwegend een lagere bodemschuifspanning aanwezig, een kleinere korrelgrootte, hogere slibfractie en vindt meer sedimentatie plaats. De bodemdiergemeenschap kan meer divers zijn en bestaat uit soorten die fragieler (sensitiever) zijn, een langere levensduur hebben en worden gekenmerkt door een langere hersteltijd.

Storm en ijsgang zijn 'natuurlijke events' die bovenop de aanwezige natuurlijke dynamiek komen, zij het met lage frequentie, en kunnen zorgen voor sedimenttransport en het wegslaan van schelpdierbanken in het ondiepe sublitoraal.

De beschrijving van natuurlijke bodemdynamiek (zoals golfwerking door wind, stroming door getij, erosie en sedimentatie) benadrukt dat de systeemeigen dynamiek van grote invloed is op de bodemstructuur en (daarmee) op de samenstelling van de bodemdiergemeenschap.



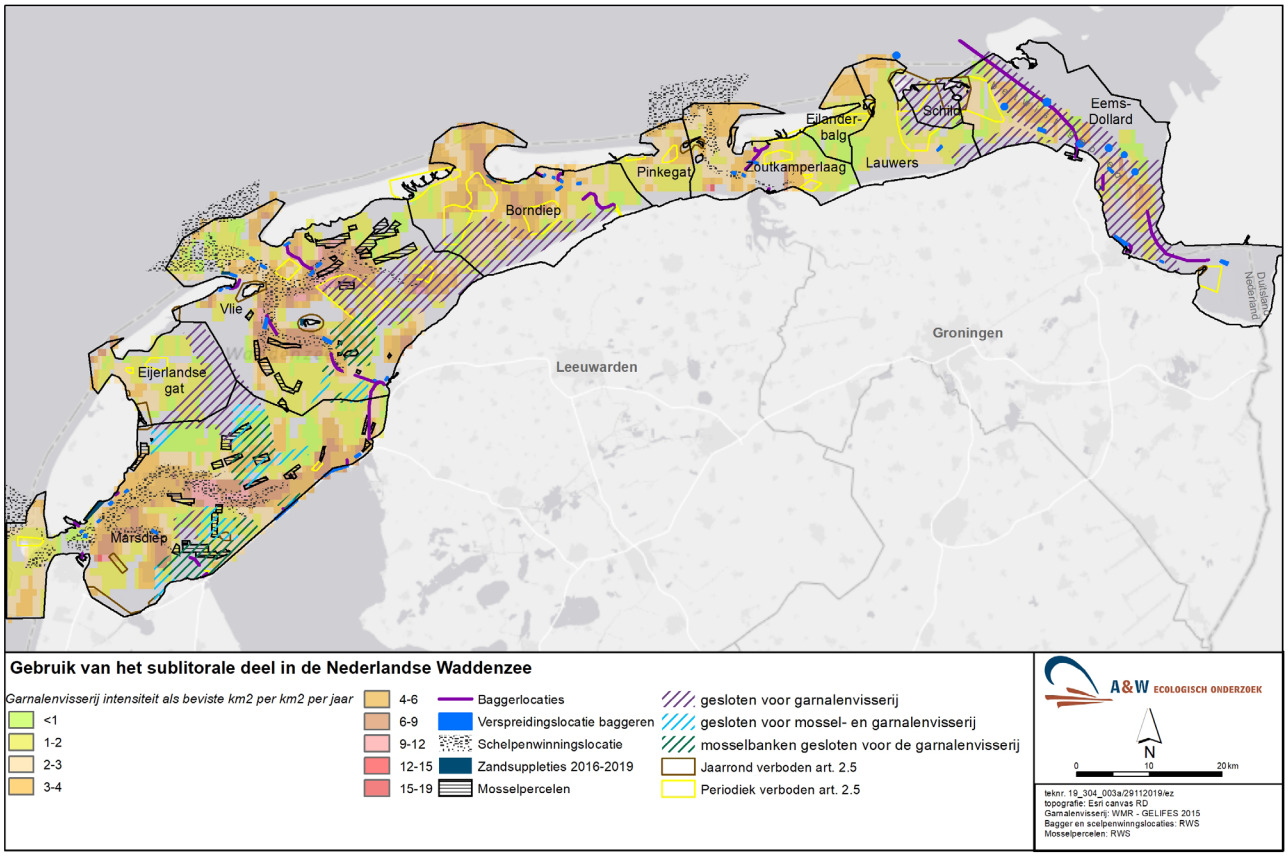
Sublitorale getijdenbekkens en hun hydrodynamische kenmerken in de Nederlandse Waddenzee (gebaseerd op Baptist et al. 2019). (MLWS = Mean Low Water Spring = de gemiddelde hoogte van laagwater tijdens springtij). Met als inzet een schematische weergave van de hersteltijd (in jaren) van wormensoorten, zwaardschede, schelpkokerworm, anemoon, kokkel, strandgaper, mossel en oester.

De effecten van menselijke bodemberoering lopen onderling sterk uiteen. Onder meer omdat er verschillende soorten menselijke activiteiten zijn, die met verschillende frequentie en op uiteenlopende ruimtelijke en temporele schaal voorkomen. De activiteiten kunnen worden ingedeeld in de categorieën:

- omwoeling/schuring (mosselzaadvisserij- en kweek, garnalenvisserij),
- extractie (zandwinning, sedimentextractie / baggeren, schelpenwinning),
- bedekking (zandsuppletie, verspreiding van baggerspecie) en
- obstructie (aanleg en onderhoud van kabels en leidingen).

Omwoeling/schuring (zoals garnalen- en mosselzaadvisserij) komt vaak op grote schaal (Waddenzeebreed) voor en met hoge frequentie (meerdere keren per jaar). Effecten op de morfologie zijn vaak lokaal en van korte duur (sedimentpluimen). De biotiek ondervindt directe effecten van omwoeling/schuring met sterfte als gevolg, waardoor soortenrijkdom van de bodemdiergemeenschap kan afnemen, evenals de verdeling van individuen over soorten (evenness). Het bestuderen van lange termijn effecten (herstel) blijkt in de praktijk lastig. Soorten die minder gevoelig zijn voor verstoring kunnen gemakkelijk beroerd gebied rekoloniseren, terwijl meer fragiele soorten hinder ondervinden en verdwijnen of lang wegblijven.

Extractie en bedekking (zoals baggeren, zandwinning en -suppletie) vinden overwegend op kleine schaal plaats (lokaal) met lage frequentie (bv. één keer in de vijf jaar, waarbij lokaal uitzonderingen kunnen zijn). Deze vormen van bodemberoering zijn vaak invasiever, in die zin dat de activiteit een grote impact heeft op de bodem (afname biomassa, dichtheid en soortenrijkdom van de bodemdiergemeenschap) en herstel lang kan duren (tot enkele tientallen jaren). Obstructie, zoals aanleg van kabels en leidingen, sluit qua impact aan bij activiteiten als zandwinning en zandsuppletie, omdat het gaat om een activiteit met (zeer) lage frequentie die op kleine ruimtelijke schaal plaatsvindt. Herstel van biotiek na kabelaanleg lijkt echter sneller te gaan (enkele maanden tot jaren).



Overzicht van bodemberoerende activiteiten in het sublitorale deel (met overloop naar het litorale deel) van de Waddenzee.

Uit de literatuur volgt, middels eenduidige resultaten en weinig tegenstrijdigheden, dat van de menselijke bodemberoerende activiteiten extractie en bedekking lokaal de grootste impact hebben. Deze activiteiten beïnvloeden de morfologie en biotiek ter plaatse zeer sterk en volledig herstel van gevoelige soorten duurt lang. Echter, deze activiteiten vinden overwegend met lage frequentie en op kleine schaal plaats, terwijl visserijactiviteit (zoals garnalenvisserij met een matige beroering van de bodem) met veel hogere frequentie en op veel grotere schaal plaatsvindt. Echter, eenduidige resultaten ontbreken, de resultaten die er zijn zijn soms tegenstrijdig of onderzoek kan niet goed worden uitgevoerd, waardoor onduidelijk is wat de lange termijn effecten zijn.

Vergelijking

De uitgevoerde vergelijking van natuurlijke bodemdynamiek vs. menselijke bodemberoering, kent allereerst een aantal beperkingen:

- Er zijn onvoldoende referenties van de ongestoorde situatie, omdat er in de Nederlandse Waddenzee maar een enkel gebied is waar geen menselijke bodemberoering plaatsvindt en dat ook al langere tijd wordt gevolgd in ontwikkeling. Evenmin is er een historische referentie uit de periode voordat er menselijke bodemberoering was.
- In alle gebieden vindt altijd natuurlijke bodemdynamiek plaats. De natuurlijke dynamiek, kan niet worden 'uitgezet'.
- Het aantal studies over systeemkennis en bodemberoering in de Waddenzee is beperkt, waardoor het scheiden van effecten door natuurlijke dynamiek en menselijke bodemberoerende activiteiten niet altijd mogelijk is. Hier ligt duidelijk een kennisleemte.
- Er bestaat geen vaste set aan indicatoren. Iedere studie heeft een eigen aanleiding en doel en komt tot een eigen set van indicatoren, waardoor een gedegen vergelijking lastig is.

Doordat specifiek en voldoende solide uitgevoerd onderzoek naar de toegevoegde effecten van menselijke bodemberoering (additioneel aan de van nature aanwezige dynamiek) ontbreekt, zijn de hiernavolgende bevindingen kwalitatief van aard.

De effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke beroering op de bodemstructuur en samenstelling van de bodemfauna zijn vergelijkbaar. Echter, menselijke bodemberoering is additioneel aan natuurlijke dynamiek in een gebied. Daarbij, blijkt uit literatuur, zijn effecten van menselijke bodemberoering minder in hoog dynamische gebieden, waar van nature een bodemgemeenschap leeft die is aangepast om in deze omstandigheden te leven en zich te herstellen. In laag dynamische gebieden richt bodemberoering veel meer schade aan en herstel duurt langer omdat hier gevoeliger soorten leven.

Bij het vergelijken van specifieke typen van menselijke bodemberoering en natuurlijke 'events', lijkt het dat de effecten van storm en garnalenvisserij goed met elkaar vergeleken kunnen worden omdat deze wat betreft intensiteit, schaal en frequentie overeenkomen.[1] Zowel storm als garnalenvisserij kunnen meerdere malen per jaar en op grote schaal voorkomen, waarbij sprake is van matige beroering.

Wanneer er, met behulp van een hypothetisch en kwalitatief model, een vergelijking wordt gemaakt lijkt het er dus op dat het niet zo zeer gaat om de impact per event van bodemberoering maar vooral om de frequentie waarmee de bodemberoering zich uiteindelijk herhaalt. Wanneer er naast storm 'events' ook sprake is van garnalenvisserij, is er een toegenomen frequentie van beroering van de zeebodem. Het additionele effect van garnalenvisserij bovenop het effect van storm kan de bepalende factor zijn voor een systeem om niet volledig van een storm event te kunnen herstellen, omdat er alweer een volgende beroering plaatsvindt (d.w.z. er is te weinig tijd voor herstel waardoor de effecten van iedere losse verstoring bij elkaar opgeteld worden). Dit zal eerder optreden in een laag dynamisch systeem. De bodemgemeenschap in een laag dynamisch systeem kan door de herhaaldelijke bodemberoering van een menselijke bodemberoerende activiteit, zoals garnalenvisserij, additioneel aan de natuurlijke beroering door een storm 'event', veranderen van één met gevoeliger soorten naar een met robuuster/snel reproducerende soorten, die snel herstellen. De soortensamenstelling van laag dynamische systemen kan dus steeds meer gaan lijken op die van hoog dynamische systemen. In hoog dynamische gebieden speelt dit waarschijnlijk minder omdat soorten daar zijn aangepast aan continue beroering door natuurlijke dynamiek.

Kennisleemten

Uit deze review blijkt dat er over bepaalde bodemberoerende activiteiten en van specifieke gebieden veel kennis is over de impact op de bodem. Er is echter ook nog veel onbekend. Kennisleemten hebben met name betrekking op de kwantitatieve systeemkennis van de Waddenzee; er is bijvoorbeeld onvoldoende kwantitatieve kennis over de verspreiding en aantallen bodemdieren in het sublitoraal en over de natuurlijke dynamiek. De kennis die er is is niet goed bijeengebracht om een vergelijking te kunnen maken tussen de effecten van menselijke bodemberoering versus natuurlijke bodemdynamiek. Daarbij wordt in studies aan menselijke bodemberoering in de Waddenzee (bijna) geen onderscheid gemaakt tussen gebieden die laag of hoog dynamisch zijn, terwijl dit sterk de impact kan beïnvloeden. Vaak worden maar enkele indicatoren uit ons afwegingskader onderzocht met een beperkte ruimtelijke en temporele schaal. Goede referentiegebieden in de Waddenzee ontbreken en er is weinig bekend over de situatie zonder bodemberoering. Lange en middellange termijnstudies zijn schaars of ontbreken. Er is weinig zicht op de effecten van cumulatie en de doorwerking van bodemberoering op systeemniveau (vooral naar de hogere trofische niveaus).

[1] De review van de Waddenacademie (zie bijlage 1) zegt het volgende: “De deskundigen plaatsen vraagtekens bij de vergelijking van de impact van garnalenvisserij versus het effect van stormen. Zij hebben moeite met de wijze waarop de conclusie wordt geformuleerd maar hebben ook twijfels over het nut van de vergelijking omdat het vaak juist om cumulatieve effecten zal gaan”.

Aanbevelingen

Concluderend kan gesteld worden dat voorliggende review laat zien dat er in de Waddenzee complexe interacties plaatsvinden tussen soorten, hun natuurlijke omgeving en menselijk gebruik. Deze interacties variëren sterk in tijd en ruimte waardoor oorzaak-gevolg relaties moeilijk vast te stellen en te kwantificeren zijn. Wel is, met behulp van het afwegingskader en een hypothetisch model, inzichtelijk geworden dat storm en garnalenvisserij vergelijkbare effecten kunnen uitoefenen op de bodem, maar dat garnalenvisserij bovenop het effect van storm de 'drempel' kan zijn voor met name de laag dynamische soortenrijke systemen om niet volledig van een storm event te kunnen herstellen, omdat er alweer een volgende beroering plaatsvindt. Zodoende kan met name in laag dynamische gebieden (met hoog gevoelige soorten) de bodemdiergemeenschap bij aanhoudende bodemberoering verschuiven van één met hoog gevoelige soorten naar één met laag gevoelige soorten die snel herstellen. Dit betekent voor de Waddenzee dat er een afname van gevoelige soorten plaatsvindt, en daarmee ook een afname in biodiversiteit.

Aanbevelingen laten zich vatten in de volgende punten:

1. Huidige kennis van het sublitoraal bijeen brengen op een ruimtelijke en temporele schaal
2. Effecten van bodemberoering bestuderen in gesloten gebieden met verschillende dynamiek
3. Grootschalige en langdurige monitoring, met onderzoek naar hogere trofische niveaus
4. Systematische benadering d.m.v. statistische modellering en toetsing met waarnemingen
5. Gebruik maken van BACI studies

Summary

In this review, an overview has been made of the available knowledge from scientific literature about the effects of natural disturbance and human induced disturbance on the subtidal parts of the Dutch Wadden Sea. Also an attempt has been made to compare these two ways of seabed disturbance; to what extent do these two types of disturbance relate to each other?

Methods

A first step is to define the research area and subjects; a.o. different types of seabed disturbance, type of effects (on seabed morphology and biotics), the way of searching for literature and its use, as well as the presentation of results.

A tool for the analysis of results from the literature study is the 'assessment framework' that has been set up.
The framework consists of indicators and system / disturbance properties, to be able to compare different types of seabed disturbance in a more ambiguous way. The most important elements of the framework are bottom shear stress, as well as sensitivity and recovery time of species.

A brief description of the study area is included, because the subtidal parts of the Wadden Sea are a unique and special area, also with high natural dynamics. It should be noted that much is also unknown and studies are ongoing to obtain more information about the subtidal.

Results

Describing the effects of natural disturbance on seabed morphology and biotics is complex. Natural disturbance consists of many different elements. For example, on a daily scale there is current due to tidal action, often also with wind-driven waves. The elements of natural dynamics seem inseparable linked and all-determining for what the subtidal looks like.
A distinction can be made between high and low dynamic areas, determined e.g. by the flow velocity of the water in those parts.

In the highly dynamic areas there is a higher bottom shear stress, a larger grain size of the sediment, lower silt fraction and more erosion. Benthic species in those areas are adapted to these dynamic conditions by e.g. their appearance (more robust) and lifestyle (rapidly reproducing, short lifespan). In terms of sensitivity and recovery, species in dynamic areas have a low sensitivity to disturbance and a short recovery time. In the highly dynamic areas, the benthic community is not very diverse.

In the low dynamic parts of the subtidal there is a low bottom shear stress, a smaller grain size, higher silt fraction and more sedimentation. The benthic community is more diverse and consists of species more fragile (more sensitive) with a longer lifespan (longer recovery time). Storm and ice drift are 'natural events' that come on top of the present natural dynamics, though with low frequency, and can ensure sediment transport and the disappearance of shellfish beds.

In short: natural dynamics have a major influence on the seabed structure and (thus) the composition of the benthic community.

The effects of human induced disturbance vary widely. Partly because there are different types of human activities, which occur with different frequencies and on a different spatial scale. The activities can be divided into the categories:

- abrasion (mussel seed fishery and culture, shrimp fishery),
- extraction (sand extraction, sediment extraction / dredging, shell extraction),
- covering (sand nourishment, distribution of dredged material) and
- obstruction (construction and maintenance of cables and pipelines).

Abrasion often takes place on a large spatial scale with high frequency. Effects on seabed morphology are often local and of short duration (e.g. sediment plumes). The biotics experience direct effects of scouring/ploughing resulting in mortality, causing species diversity of the benthic community to decrease, as well as the distribution of individuals over species (evenness). Studying long-term effects (recovery) appears to be difficult (which seems to be the case with fisheries research anyway). Species less susceptible to disturbance can easily settle in fished areas, while more fragile species disappear.

Extraction and covering (such as dredging, sand extraction and -nourishment) mostly take place at a low frequency (e.g. once every five years, with local exceptions) and on a small scale. But these activities are often more invasive, in the sense that the activities cause more damage (major impact on de seabed morphology and benthic community) and recovery takes a long time (up to a few decades). Obstruction, such as the laying of cables and pipelines, is similar in impact to the activities as sand extraction and sand nourishment, because it concerns an activity with a (very) low frequency that takes place on a local scale. However, recovery of benthic communities after cable laying seems to be going faster (a few months to years).

So: extraction and covering seem to be the most violent kind of activities of the human induced disturbance, because they strongly influence the morphology and biotics on the spot and recovery takes a long time. However, these activities take mostly place at a low frequency and on a small spatial scale, while fishing activities take place at a much higher frequency and on a much larger spatial scale. The question then is, what is worse for the ecosystem.

Comparison

The comparison of natural dynamics vs. human induced disturbance of the seabed that takes place has, first of all, a number of limitations. To start with the fact that there are no areas (anymore) in the Wadden Sea with only natural dynamics. Some areas have been closed, but they also each have their own specific dynamics. In addition, the human induced disturbance always takes place in an area with natural dynamics, whereby the latter cannot be 'turned off'. It was also clear from start of this study that the number of studies on area knowledge and seabed disturbance in the Wadden Sea is limited. There is clearly a knowledge gap here. In addition, there is insufficient use of a fixed set of indicators in the literature we studied, making a thorough comparison difficult.

The bottom line is that there are similar effects: natural dynamics influence the seabed structure and composition of the benthic fauna; human induced disturbance of the seabed can also affect the sediment composition and the occurrence/ distribution of benthic fauna, which is in addition to the natural dynamics in an area. In addition, the effects of human induced disturbance seem less in highly dynamic areas, where naturally a benthic community occurs that is adapted to live and recover in these conditions. In low dynamic areas, human induced disturbance may cause much more damage and recovery will take longer because more sensitive species live here.

Clustering the different types of seabed disturbance by intensity, frequency and spatial scale shows that there is actually only one good and relevant comparison to be made, namely that between storm and shrimp fishing. Both storm and shrimp fishing can occur several times a year and on a large spatial scale, with moderate seabed disturbance. A comparison, using a hypothetical model, illustrates that the additional effect of shrimp fishing on top of the effect of storm may be the 'threshold' for a system to not be able to fully recover from a storm event, because a subsequent disturbance takes place. The benthic community in a low dynamic system may change, due to the repeated seabed disturbance of shrimp fishing in addition to the natural disturbance caused by storm, from one with more sensitive species to one with less sensitive more robust / rapidly reproducing species, which will recover quickly.

Knowledge gaps

This review shows that there is a lot of knowledge about the impact of certain seabed disturbing activities and about specific areas. However, much is still unknown. Knowledge gaps relate in particular to the system knowledge of the Wadden Sea (it is not always possible to separate effects by natural dynamics and human induced seabed disturbance); there is insufficient quantitative knowledge and the knowledge that is available has not been brought together properly to make a comparison between the effects of human induced disturbance versus natural dynamics.

In addition, studies on human induced disturbance in the Wadden Sea make (almost) no distinction between areas that are low or high dynamic, while this can strongly influence the impact. Often only a few indicators from our assessment framework are examined with a limited spatial and temporal scale. There are no good reference areas in the Wadden Sea and little is known about the situation without seabed disturbance. Long term and medium term studies are scarce or missing. There is little insight into the effects of cumulation and the effect of seabed disturbance at system level (especially towards the higher trophic levels).

Recommendations

In conclusion, this review shows that complex interactions take place in the Wadden Sea between species, their natural environment and human use. These interactions vary greatly in time and space, making cause-effect relationships difficult to determine and to quantify. However, with the aid of the assessment framework and a hypothetical model, it has become clear that storm and shrimp fishing can have similar effects on the bottom, but that shrimp fishing in addition to the natural disturbance of storm can be a 'threshold' for a system to not be able to fully recover from a storm event, because a subsequent disturbance takes place. Thus, especially in low dynamic areas (with highly sensitive species), the benthic animal community can shift from one with highly sensitive species to one with low sensitive species that recover quickly with persistent seabed disturbance. Recommendations can be summarized as follows:

1. Gathering current knowledge of the subtidal on a spatial and temporal scale
2. Study the effects of seabed disturbance in areas with different dynamics
3. Large-scale and long-term monitoring, investigating higher trophic levels
4. Systematic approach by means of statistical modeling and testing with observations
5. Using BACI studies

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

De internationale Waddenzee is het grootste aaneengesloten intergetijdengebied ter wereld en herbergt unieke natuurwaarden. De Nederlandse Waddenzee is in 2009 aangewezen als Natura 2000-gebied en UNESCO werelderfgoed. De ondiepe kustzee wordt vanwege haar grote rijkdom aan bodem- en waterleven op allerlei manieren gebruikt en benut. Dat geldt in het bijzonder voor transport, visserij, delfstofwinning, en voor recreatie, en meer recent ook voor de aanleg van voorzieningen voor de energietransitie (kabels). Vanuit Rijkswaterstaat vinden daarnaast activiteiten plaats als baggerwerkzaamheden en zandsuppleties (Noordzeekustzone) voor het op orde houden van een veilige en bereikbare kust. Als gevolg van al deze activiteiten is in bijna alle delen van de Waddenzee en aangrenzende Noordzeekustzone sprake van frequente en directe bodemberoering. Tegelijkertijd is er in dit estuariene systeem sprake van een hoge dynamiek door wind, water, stroming en getij, waardoor er ook van nature beroering van de bodem is.

Bodemberoering kan potentieel grote effecten hebben op het systeem door o.a. verstoring van de bodem en de waterkolom, en doorwerking op de voedselsituatie. Er is (en wordt) veel gepubliceerd over bodemberoering maar het ontbreekt tot nu toe aan een actueel overzicht van de stand van kennis over de omvang en impact van bodemberoerende activiteiten op de bodem en het bodemleven. Er is bij de betrokken overheden behoefte aan een dergelijk kennisoverzicht. Zowel waar het gaat om de impact in vergelijking tot verstoring als gevolg van natuurlijke bodemdynamiek als om de cumulatie van bodemberoerende effecten op de morfologie en biotiek van de Waddenzee.

Het Programma naar een Rijke Waddenzee heeft samen met Rijkswaterstaat de opdracht uitgezet om een uitgebreide literatuuranalyse uit te voeren om zo de relevante beschikbare kennis over de ecologische effecten van bodemberoering te bundelen. Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek heeft deze opdracht uitgevoerd en de resultaten worden in dit rapport gepresenteerd.

1.2 Doel

In deze studie ligt de focus op het beschrijven van de primaire effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering op de morfologie en biotiek van het sublitoraal van de Waddenzee, evenals het vergelijken van de verschillende typen bodemberoering. Daarbij zijn de volgende doelen opgesteld:

1) Het verzamelen en opstellen van een overzicht van bestaande kennis over effecten van menselijke bodemberoering en natuurlijke bodemdynamiek op morfologie en biotiek in de permanent onder water gelegen delen van de Waddenzee.

   Voor de morfologie gaat het hierbij om de volgende effecten:
   a) de verstoring van de bodemstructuur en/of bodemsamenstelling waardoor harde structuren verdwijnen, destabilisatie van zachte bodems optreedt, en/of stabilisatie wordt tegengegaan;
   b) de opwerveling van sediment waardoor de slibhuishouding kan veranderen en daarmee de helderheid van het water kan verminderen. Ook kan sedimentatie optreden waardoor schelpdieren en andere structuren mogelijk worden afgedekt.

Voor wat betreft effecten op biotiek gaat het om:

c) directe verstoring en/of vernietiging (bv. verplaatsing, bedekking, beschadiging, verbrijzeling of sterfte) van epibenthische organismend) directe verstoring en/of vernietiging van endobenthische organismen
   NB. Er wordt in deze studie niet ingegaan op de secundaire effecten hogerop in de voedselketen (doorwerking in het ecosysteem).

2) Het ontwikkelen van een afwegingskader waarmee het mogelijk is om een vergelijking te maken tussen effecten van menselijke bodemberoering en natuurlijke bodemdynamiek en cumulatie-effecten aan de hand van habitatkarakteristieken, sensitiviteit en herstel van soorten.

3) Het uitvoeren van een vergelijking over hoe menselijke bodemberoering zich in de sublitorale delen van de Waddenzee verhoudt tot natuurlijke bodemdynamiek.

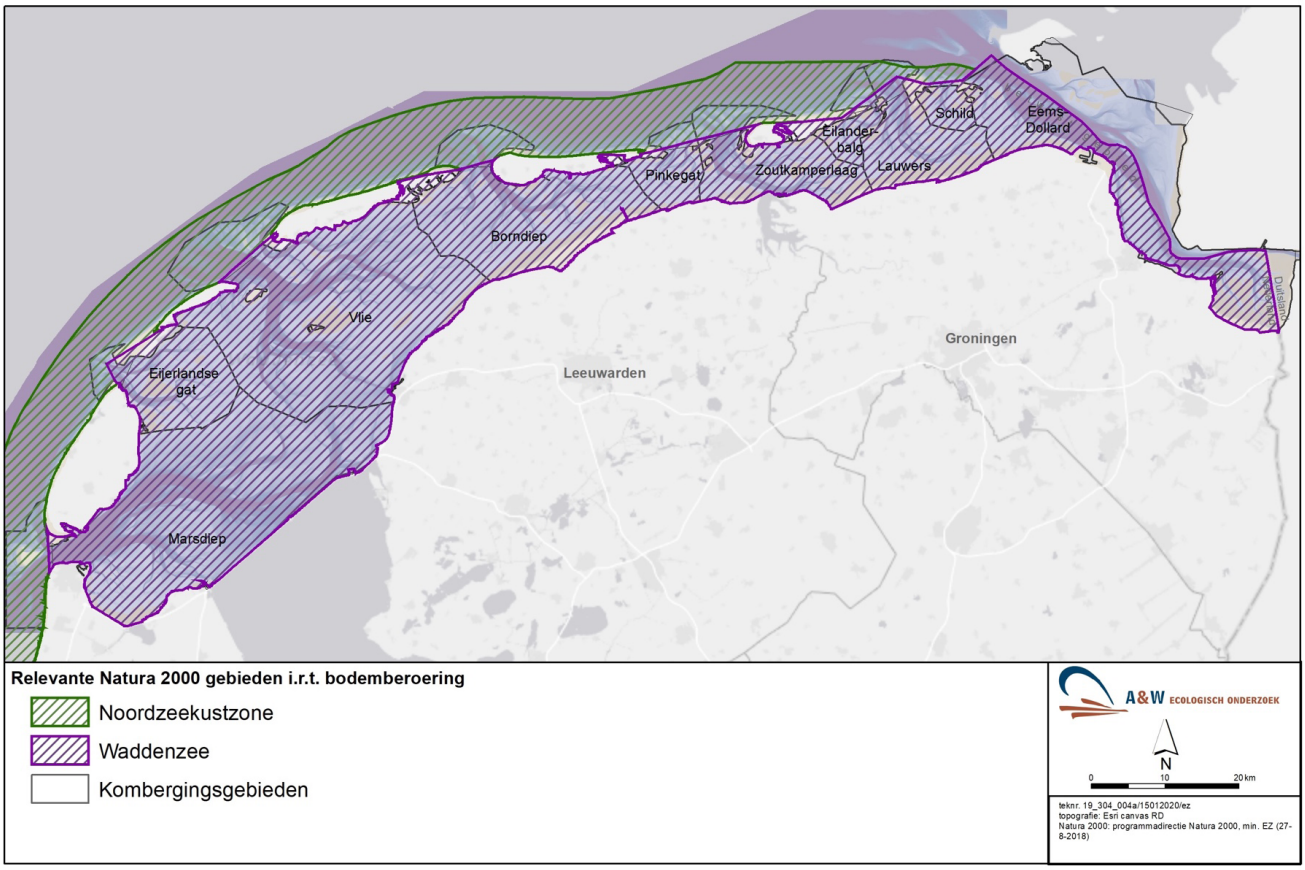
4) Het benoemen van onzekerheden, vervolgstappen om die onzekerheden weg te nemen, en een overzicht van kennisleemten.

Met de vergaarde kennis wil de opdrachtgever beoordelen wat de invloed is van bodemberoerende activiteiten op het ecosysteem van de Waddenzee, identificeren welk onderzoek nodig is, en zo nodig en mogelijk een maatregelenpakket ontwikkelen voor het verduurzamen van menselijke activiteiten en het verminderen van de impact van menselijke bodemberoerende activiteiten. Om tot een dergelijk maatregelenpakket te komen is het van belang om de effecten zoveel mogelijk kwantitatief in kaart te brengen, leemten in kennis duidelijk te maken en om de effecten in perspectief te plaatsen, dat wil zeggen in relatie tot de bestaande natuurlijke dynamiek.

1.3 Geografische afbakening

De geografische afbakening van deze studie is weergegeven in figuur 1-1. Ter illustratie zijn de relevante Natura 2000-gebieden in de omgeving weergegeven. In deze studie gaat het om het sublitorale deel van de Nederlandse Waddenzee. Hieronder vallen de geulen en permanent onderwater gelegen platen ook wel bekend als Natura 2000 habitattype H1110_A. Circa 45% (~1002 km2) van de Nederlandse Waddenzee is sublitoraal. Hoewel de focus in deze studie niet ligt op droogvallende platen en op het diepere deel van de Noordzee zijn studies in die zones wel meegenomen als er relevante kennis uit naar voren komt.

Op voorhand is bekend dat kennis van bodemberoering en -verstoring specifiek voor de Waddenzee schaars is. Daarom is ook gebruik gemaakt van onderzoek naar bodemberoering in de aangrenzende Noordzeekustzone, gebieden elders op de Noordzee (bv. naar de boomkorvisserij met wekkerkettingen en aanleg van kabels) en naar de internationale literatuur over bodemberoering en –verstoring in andere, vergelijkbare kustzeeën in de wereld. Ook studies die niet direct vergelijkbaar zijn aan de Waddenzee, maar wel bijdragen aan het conceptuele kader zijn meegenomen. De review is niet uitputtend, zo zijn niet alle studies meegenomen waarbij ook zijdelings sprake kan zijn van bodemeffecten of onderzoeken die nog niet zijn afgerond (de onderzoeken naar de pulsvisserij zijn bijvoorbeeld niet meegenomen). Zie 2.2 voor de selectie die is gemaakt.



Figuur 1-1 Geografische afbakening van deze review, met Natura 2000-gebied Waddenzee (en aangrenzende Noordzeekustzone).

1.4 Aanpak en leeswijzer

Voor het kennisoverzicht van effecten door natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering is een review uitgevoerd van bestaande gepubliceerde studies.

De werkwijze is uitgewerkt in hoofdstuk 2. In dit hoofdstuk wordt allereerst een beknopte beschrijving gegeven van het sublitorale deel van de Waddenzee. Vervolgens wordt een definitie gegeven van wat er in deze studie onder bodemberoering wordt verstaan. Er wordt in dit hoofdstuk beschreven hoe de inventarisatie van artikelen en mogelijke indicatoren heeft plaatsgevonden en een eerste bronnenoverzicht wordt gepresenteerd. Om effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering op een eenduidige manier met elkaar te kunnen vergelijken is een afwegingskader opgesteld. Het afwegingskader is een systematische lijst van geselecteerde indicatoren waarmee een vergelijking van effecten van bodemberoering gemaakt kan worden. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe dit kader tot stand is gekomen.

In hoofdstuk 3 worden de resultaten van de literatuuranalyse gepresenteerd. Er wordt aan de hand van de indicatoren in het afwegingskader beschreven wat de effecten zijn van natuurlijke bodemdynamiek (door systeemeigen dynamiek en natuurlijke 'events') en wat de effecten zijn van menselijke bodemberoering (door omwoeling/schuring, extractie, bedekking en obstructie).

In hoofdstuk 4 wordt aan de hand van het afwegingskader een vergelijking gemaakt tussen natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering, gebaseerd op gegevens gepresenteerd in voorgaande hoofdstukken. In deze beschouwing plaatsen we bodemberoering in het perspectief van gevoeligheid (van soorten of systemen voor bodemberoering), en herstel (o.a. rekolonisatie), en gaan we in op hoe menselijke bodemberoering zich verhoudt tot verstoring als gevolg van natuurlijke dynamiek en mogelijke cumulatie van effecten van bodemberoering.

In hoofdstuk 5 worden kennisleemten aangegeven en aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

Hoofdstuk 6 geeft een samenvatting van de belangrijkste bevindingen.

2. Ontwikkeling analytisch afwegingskader

Om effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering op een eenduidige manier met elkaar te kunnen vergelijken is een afwegingskader opgesteld. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe dit kader tot stand is gekomen. Daartoe is allereerst een beknopte beschrijving van het sublitoraal van de Waddenzee opgesteld. Vervolgens is een uitgebreide inventarisatie gedaan naar wetenschappelijke artikelen over bodemberoering in het sublitoraal, waarvan in dit hoofdstuk wordt beschreven hoe het zoekproces was ingericht, hoe bronnen zijn opgeslagen en geanalyseerd, en hoe daaruit resultaten zijn verkregen. Een eerste bronnenoverzicht wordt getoond. Er is uit de bestudeerde literatuur een groslijst van indicatoren gemaakt, die veelvuldig in de artikelen gebruikt worden, om effecten te beschrijven in de vorm van een analysetabel (zie Excel bijlage 1). Vervolgens is de groslijst van indicatoren ingekort (zie voor toelichting §2.4) tot een compacte lijst van indicatoren waarmee de vergelijking tussen natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering gemaakt kan worden. Deze verkorte lijst vormt het afwegingskader.

2.1 Beknopte beschrijving van het sublitorale deel van de Waddenzee

De trilaterale Waddenzee strekt zich uit tussen de Waddeneilanden en de noordkust van Nederland, vanaf Den Helder langs de Duitse kust tot aan het Deense Esbjerg. In totaal beslaat de Waddenzee circa 10.000 km2 bestaande uit geulen, sublitorale, litorale en permanent droge slik- en zandplaten en kwelder. De Nederlandse Waddenzee (hierna Waddenzee) is circa 150 km lang en loopt van Den Helder tot aan het Eems-Dollard estuarium bestaande uit een aantal getijdenbekkens met een totaal oppervlak van circa 2250 km2. De getijdenbekkens staan in verbinding met de Noordzee door zes zeegaten waardoor via de getijdengeulen naast zoutwater ook sediment wordt aangevoerd, en er abiotische en biotische uitwisseling plaatsvindt (bv. met nutriënten en larven). Het wantij ten zuiden van Terschelling verdeelt de Waddenzee in een westelijk en oostelijk deel. In het westelijke deel van de Waddenzee liggen relatief meer en diepere sublitorale gebieden dan in vergelijking met het oostelijke deel van de Waddenzee (Elias et al. 2012; Min. I&M 2016; Baptist et al. 2019). Dieptes in het sublitoraal variëren van > -5 m t.o.v. NAP tot plaatselijke dieptes van < -40 m bij de zeegaten van het Marsdiep en Vlie (Min. I&M 2016).

Het zoutgehalte in de Waddenzee is zeer variabel en is lokaal afhankelijk van het getij als ook van het spuiregime en neerslag. Zoetwater wordt aangevoerd door instroom vanuit het IJsselmeer, het Lauwersmeer en de Eems-Dollard (zie figuur bijlage 2.1 voor zoutgehalte Waddenzee op basis van model; de Jonge et al. 1993). De wadplaten bestaan voornamelijk uit zand en slib waar op sommige locaties harde structuren zoals schelpdierriffen (oester- en mosselbanken) voorkomen. Hoewel dichter bij de kust de fractie fijn slib groter is, is de fractie fijn slib in de litorale wadplaten de afgelopen tien jaar afgenomen met gemiddeld 0.24% per jaar (Folmer et al. 2017). Lokaal zijn slibgehaltes echter hoog, zoals bij de vaargeul naar Ameland (waar door het wantij de stroming rustiger is en het slib kan bezinken). De Waddenzee wordt verder gekenmerkt door een dubbeldaags getij. Door de beschermende werking van de Waddeneilanden tegen hoge Noordzee golven, worden golven in de Waddenzee lokaal gegenereerd (Donker 2015).

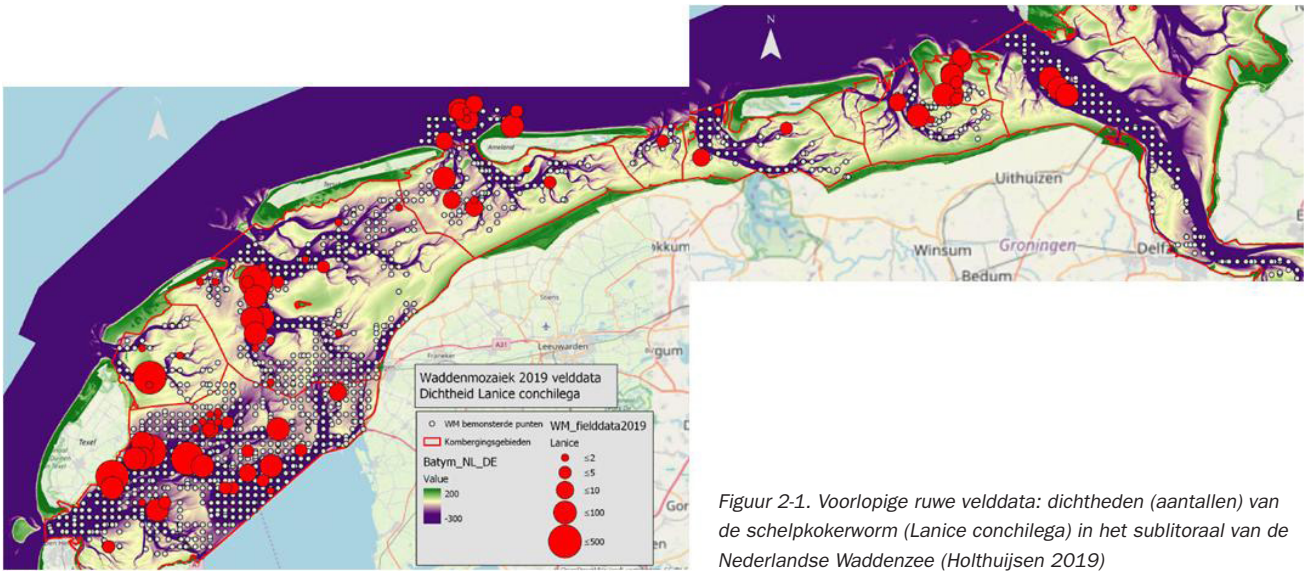
Door het getij, de wind, golven en stroming wordt sediment aangevoerd, afgezet, getransporteerd en geërodeerd, waardoor een grote natuurlijke dynamiek ontstaat binnen het systeem. Tevens zorgt de aanvoer van zoet- en zoutwater voor gradiënten in saliniteit. Dergelijke abiotische milieucondities zijn direct en indirect bepalend voor de soortsamenstelling en diversiteit in het gebied (zie ook H3). Daarbij ondersteunt de hoge primaire productie het Waddensysteem door de omzetting van nutriënten uit de Noordzee en het IJsselmeer door microfytobenthos. Daardoor kunnen hoge aantallen

bodemdieren (o.a. wormen en schelpdieren), evenals kreeftachtigen, vissen en zeezoogdieren in het gebied bestaan en gebruiken miljoenen vogels de Waddenzee als voortplantings- en overwinteringsgebied (Jung et al. 2017; Dankers et al. 1981; Christianen et al. 2017).

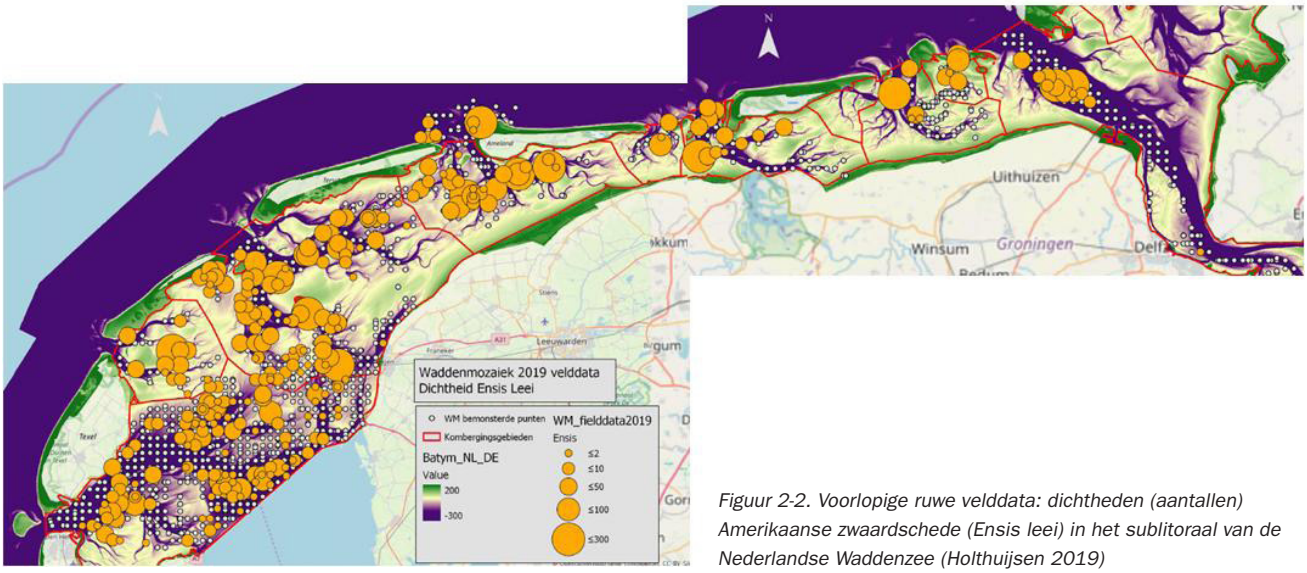
Hoewel het waddengebied het grootste natuurgebied van Nederland is, is het systeem niet meer (geheel) natuurlijk. In de afgelopen eeuw is het systeem, en daarmee de kenmerkende vertegenwoordigers in het sublitoraal, sterk veranderd door verschillende (menselijke) invloeden. Zo werd vóór de afsluiting van de Zuiderzee door de Afsluitdijk het sublitoraal onder andere gekenmerkt door de aanwezigheid van ondergedoken Groot zeegras (Zostera marina) en geassocieerde soorten zoals de zeestekelbaars (Spinachia spinachia), evenals het voorkomen van de platte oester (Ostrea edulis) en zandkokerworm riffen (Sabellaria spinulosa) (Buhs & Reise 1997). Met de verdwijning van dergelijke uitgestrekte biotopen en soorten zijn tevens de natuurwaarden (kenmerkende soorten voor het gebied) van het sublitoraal aanzienlijk veranderd.

Vandaag de dag is de aanwezigheid van schelpdierbanken in verschillende stadia van ontwikkeling zoals mossel- (Mytilus edulis) en Japanse oesterbanken (Magallana gigas) een belangrijk kwaliteitskenmerk van het sublitoraal. Schelpdierbanken vormen hier het substraat voor aan harde ondergrond gerelateerde soorten zoals anemonen, mosdiertjes, zeepokken en verschillende soorten wieren. Bovendien fungeren schelpdierbanken, of riffen, als habitat of schuilplek voor verschillende soorten wormen, kreeftachtigen en vissen en als voedselbron voor garnalen, krabben, vissen en vogels wat de biodiversiteit stimuleert (Dekker & Drent 2013; Christianen et al. 2018). Enkele soorten borstelwormen worden als typisch voor het sublitoraal gekarakteriseerd waaronder de schelpkokerworm (Lanice conchilega) (zie indicatie ruimtelijke verspreiding figuur 2-1) en de groene zeeduizendpoot (Alitta virens). Typische schelpdieren van het sublitoraal zijn o.a. nonnetje (Macoma balthica), strandgaper (Mya arenaria), mossel (Mytilus edulis) en Amerikaanse zwaardschede (Ensis leei) (zie indicatie ruimtelijke verspreiding figuur 2-2). Typische vissoorten van het sublitoraal zijn haring (Clupea harengus), platvissen (schol (Pleuronectes platessa), bot (Platichthys flesus), schar (Limanda limanda)), puitaal (Zoarces viviparus) en zeedonderpad (Myoxocephalus scorpius) (Min. LNV 2014). De top van het voedselweb in het sublitoraal wordt gedomineerd door zeezoogdieren (zeehonden) en visetende vogels, grotere (roof)vissen ontbreken.

Voor de voorliggende literatuurstudie is kennis over voorkomen en verspreiding van benthos in het sublitoraal belangrijk als achtergrondinformatie. Er is al veel onderzoek in het litoraal gaande, zo wordt sinds 2008 voor het programma SIBES (Synoptic Intertidal Benthic Survey of the Wadden Sea) het benthos inclusief het sediment in het gehele litoraal van de Nederlandse Waddenzee gemonitord met een monsterpunt om de 500 meter. Onderzoek in het sublitoraal is echter schaarser. Recent (periode van 2015-2018) zijn wel in het sublitoraal ruim 1500 monsters genomen. Daarnaast is onder het programma Waddenmozaïek in het voorjaar van 2019 een systematische monitoring in het sublitorale deel van de Waddenzee van start gegaan. De voorlopige ruwe velddata van de 2019 bemonstering geven een eerste indicatie van de verspreiding en populatiekenmerken van vier soorten over de gehele Waddenzee: de Amerikaanse zwaardschede, strandgaper, schelpkokerworm en de mossel (Holthuijsen 2019). Zowel de schelpkokerworm (figuur 2-1) als de Amerikaanse zwaardschede (figuur 2-2) komen algemeen voor in alle getijdenbekkens, met dichtheden van respectievelijk meer dan 5000 en 25.000 individuen per m^2 . Uit veldobservaties lijkt de biodiversiteit in schelpkokerworm riffen bovendien hoog. De strandgaper is veelal in brakwater condities gevonden, bij de Afsluitdijk en de Eems-Dollard. Sublitorale mosselen komen in hoge dichtheden voor in de westelijke Waddenzee langs de Afsluitdijk en in Marsdiep en Vlie (Zie figuren in bijlage 3).



Figuur 2-1. Voorlopige ruwe velddata: dichtheden (aantallen) van de schelpkokerworm (Lanice conchilega) in het sublitoraal van de Nederlandse Waddenzee (Holthuijsen 2019)



Figuur 2-2. Voorlopige ruwe velddata: dichtheden (aantallen) Amerikaanse zwaardschede (Ensis leei) in het sublitoraal van de Nederlandse Waddenzee (Holthuijsen 2019)

2.2 Bodemberoering typologie

De definitie van beroering volgens de Van Dale is 'aanraking', 'onrust'. Beroering van de zeebodem zoals we die in deze studie opvatten gaat over activiteiten waarbij tijdens de activiteit contact is met de zeebodem, waardoor deze verstoord wordt ten opzichte van de natuurlijke situatie. We beschouwen ook verstoring van bodems door de natuurlijke dynamiek. Bij deze natuurlijke 'beroering' gaat het om de natuurlijke dynamiek die kenmerkend is voor het systeem (golfwerking, stroming, geulverlegging door erosie en sedimentatie) en om bijzondere 'events' (storm, ijsgang). De belangrijkste elementen van natuurlijke dynamiek zijn:

- **Golfwerking (in open gebieden met lange strijklengte):** In de Westelijke Waddenzee heeft de wind langere strijklengtes en kunnen golven langer in hoogte opbouwen, vooral onder invloed van westelijke en noordwestelijke wind. Dit geldt ook voor de buitendelta's en zeegaten waar golven zich hoog kunnen opbouwen vanaf de Noordzee. Golven en daarmee gepaard gaande stroming zijn van invloed op sedimenttransport.
- **Stroomsnelheid:** Op sommige locaties, zoals in de zeegaten, kunnen de stroomsnelheden sterk oplopen. Hierdoor wervelt sediment van de bodem op en wordt het getransporteerd.

- **Geulverlegging**: door sedimentatie- en erosieprocessen.
- **Storm**: Tijdens stormen kunnen grote golfhoogtes optreden die de bodem extra beroeren.
- **IJsgang**: IJsgang kan de bodem lokaal opstuwen. IJsgang heeft grote effecten op droogvallende platen en randen van de plaat. Bij lage waterstanden kan het ijs ook de bodem van het ondiepe sublitoraal beïnvloeden.

Effecten van bodemberoering door menselijke activiteiten vormen een afwijking van de bodemdynamiek die past bij het systeem op die plek. Al sinds de vroege historie van het Waddengebied zijn menselijke ingrepen een veel voorkomend fenomeen. In de late Middeleeuwen werd het systeem getransformeerd door veen afgravingen, het aanleggen van dammen en dijken en drainage van moerasgebied door het graven van sloten. Ook werden zeegras en oesters veelvuldig geoogst. Echter met de voortschrijdende technologische ontwikkelingen zijn bodemberoerende activiteiten in de Waddenzee en Noordzeekustzone vanaf de 19e eeuw zowel in aantal als intensiteit sterk toegenomen. Zo werd onder andere bodemvisserij op industriële schaal toegepast en traditionele schelpdieroogst werd vervangen door mechanische. De intensivering van activiteiten had zowel directe als indirecte gevolgen voor de natuurwaarden van het gebied zoals habitatdestructie en afname van biodiversiteit (Lotze et al. 2005; Lotze 2007).

Ook in de huidige tijd wordt het gebied gekenmerkt door een breed scala aan bodemberoerende activiteiten (zie Figuur 2-3; en voor de ruimtelijke spreiding Figuur 2-4). Er zijn in de loop der jaren ook weer activiteiten stopgezet in de Waddenzee (zoals mechanische kokkevisserij) en er vindt verduurzaming, innovatie en transitie plaats (bijvoorbeeld minder mosselzaadvisserij dan vroeger en de opkomst van mzi's). De menselijke bodemberoerende activiteiten behandeld in deze studie kunnen grofweg worden ingedeeld in vier categorieën van bodemberoering (Foden et al. 2011):

- Omwoeling/schuring, waarbij de bodem wordt afgeschaafd, door elkaar wordt gewerkt en verplaatst. Ook kan schuring op harde bodemstructuren ontstaan. Hieronder vallen de verschillende vormen van bodemvisserij.
    - Mosselzaadvisserij en -kweek;
    - Garnalenvisserij;

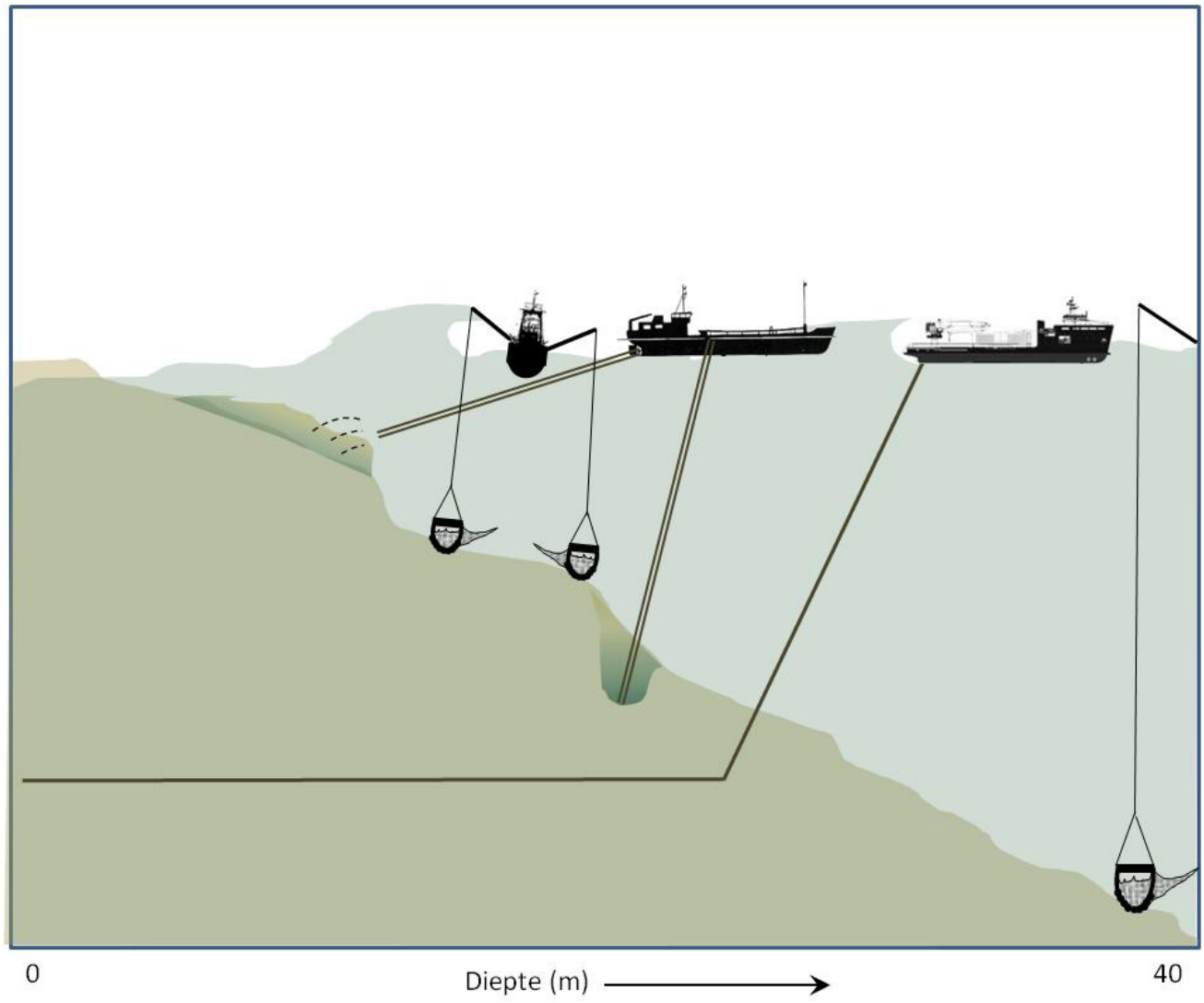
- Extractie, exploitatie als delfstofwinning of waarbij andere natuurlijke bronnen uit de bodem worden verwijderd. Hieronder vallen de volgende activiteiten:
    - Zandwinning
    - Sedimentextractie (incl. baggeren)
    - Schelpenwinning

- Bedekking, waarbij de zeebodem bedekt wordt met een laag materiaal. Dit gebeurt bij:
    - Zandsuppletie
    - Verspreiding van baggerspecie

- Obstructie, in combinatie met extractie (ingraven), waarbij permanente structuren in of op de zeebodem geplaatst worden.
    - Aanleg en onderhoud van kabels en leidingen

In hoofdstuk 3 worden de (effecten van) natuurlijke bodemdynamiek en de verschillende typen menselijke bodemberoerende activiteiten nader uitgewerkt.

Er zijn ook activiteiten niet meegenomen in deze studie, zoals de aanleg van dijken en de winning van delfstoffen in de diepere ondergrond (gaswinning, zoutwinning), hoewel er wel sprake kan zijn van impact op de bodem (hoogteligging, meer of minder sedimentatie, verlegging geulen). Maar omdat er geen sprake is van directe beroering zijn dit soort activiteiten niet meegenomen.



Figuur 2.3. Visualisatie van menselijke bodemberoerende activiteiten in de Waddenzee. De focus is gericht op activiteiten in de sublitorale zone. Zie het onderstaande schema.

Natuurlijke bodemberoering

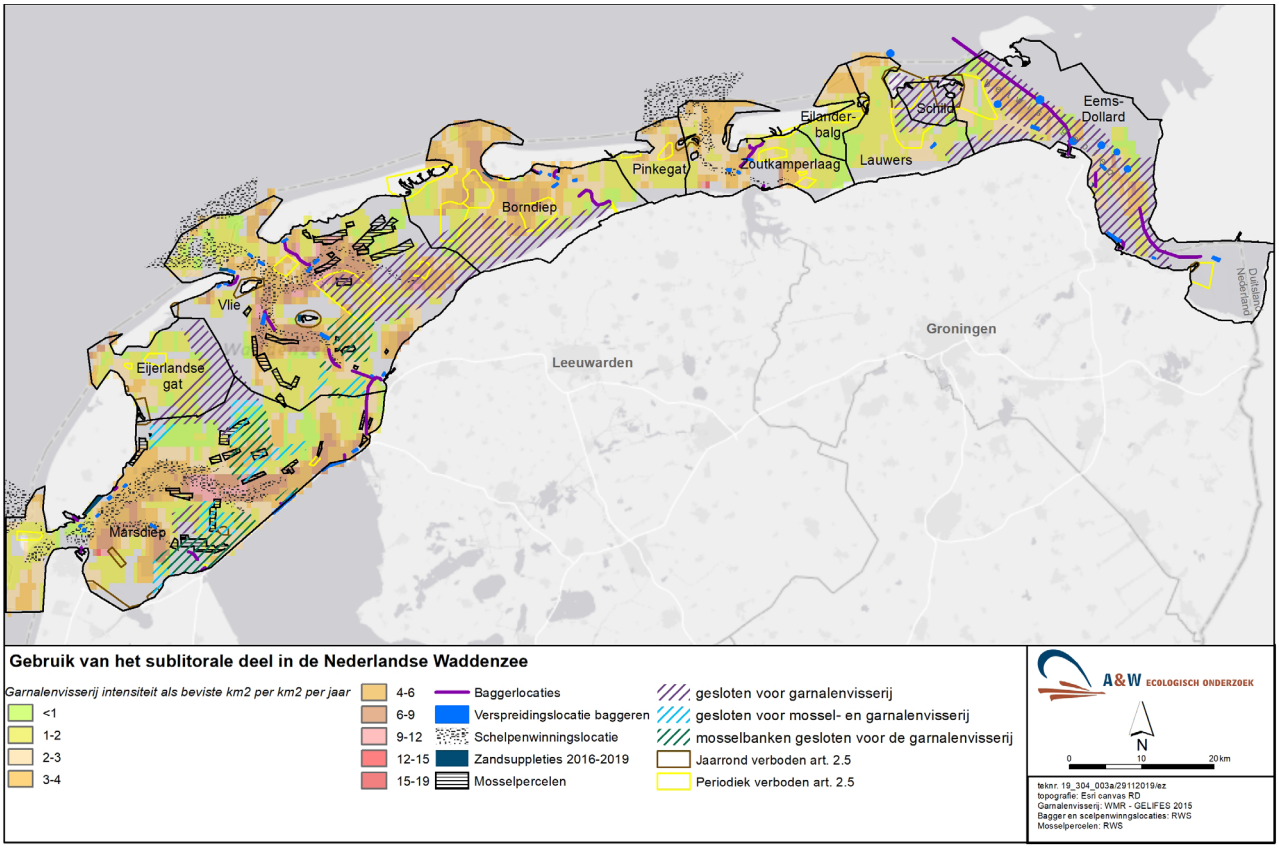
Verstoring door natuurlijke dynamiek

- Golfwerking door wind
- Stroming door getij
- Geulverlegging (erosie, sedimentatie)
- Storm
- IJsgang

Menselijke bodemberoering

Bodemberoerende activiteiten

- Mosselzaadvisserij en -kweek;
- Garnalenvisserij;
- Zandwinning
- Sedimentextractie (baggeren)
- Schelpenwinning
- Zandsuppleties
- Verspreiding van baggerspecie
- Kabels en leidingen



Figuur 2-4. Overzicht van bodemberoerende activiteiten in het sublitorale deel van de Waddenzee (met gegevens van WMR - GELIFES 2015 (garnalenvisserij) en RWS (bagger- en schelpenwinlocaties en mosselpercelen).

2.3 Inventarisatie van artikelen en mogelijke indicatoren

2.3.1 Zoekproces en opslag in database

Het zoekproces, voor het vinden van relevante en bruikbare literatuur, is ingericht met het bepalen van de zoektermen, de afbakening uit de uitvraag in acht nemende, en de databases waarin is gezocht. Dat waren in beginsel de reguliere databases zoals Web of Science, Google Scholar, SCOPUS en Picarta (vooral grijze literatuur). Daarbij is een beperkte set relevante zoektermen gebruikt per bodemberoerende activiteit of -verstoring. De resulterende eerste 20 hits die uit de zoektermen voortkwamen zijn gecheckt als mogelijk relevante bron. Daarbij werd tijdens het zoekproces ook direct gescand op relevantie, waardoor niet elke hit is terug te vinden in het literatuuroverzicht. Er zijn tevens bronnen aangeleverd door de opdrachtgever, er zijn bronnen uit bronnen gebruikt en bronnen zijn uit eigen archief naar voren gekomen, waarbij afgeweken werd van het algemene zoekproces. In het Logboek is daarom de herkomst vermeld. Voor de opgeslagen bronnen is vervolgens het type bron bepaald (grijze of wetenschappelijke literatuur), of er een effect is onderzocht op morfologie en/of biotiek, het type studie (effectstudie, modelstudie, review, meta-analyse, of algemeen beschrijvende studie), het aantal citaties (voor een idee van de impact van de studie) en voor welk deel van de rapportage de bron mogelijk tot nut kon zijn (tabel 2-1).

Tabel 2-1. Overzicht logboek structuur zoals gehanteerd voor het bijhouden van het zoekproces en opslag van literatuur.

Publicaties	Beoordeling	Zoekproces	Archief
Auteurs	Type bron	Zoektermen	Hoofdmap
Publicatiejaar	Onderzocht effect	Herkomst	Gedeelde hoofdmap
Titel	Type studie	In/via (naam bron)	Submap
Onderzoeksgebied	Nuttig voor onderdeel	Download datum	
	Aantal citaties		

De gebruikte zoektermen en criteria zijn vastgelegd in een logboek (zie tabel bijlage 2-3). Selecties en verfijningen in zoekacties zijn ook gedocumenteerd. Aanvullend op de digitale scans zijn estuariene en mariene ecologen geraadpleegd voor eventuele aanvullende grijze literatuur. Het open source programma Mendeley is gebruikt als opslagdatabase.

2.3.2 Bronnenanalyse en duiding resultaten

Na een eerste zoektocht zijn de gevonden bronnen verdeeld in (I) 'evidence-based' effectenstudies, waarin de effecten van menselijke en natuurlijke bodemberoering op morfologie en/of biotiek ook daadwerkelijk in het veld zijn onderzocht, en (II) andersoortige studies zoals review en modelstudies. Aan de hand hiervan zijn resultaten op twee manieren tegen het licht gehouden: (I) een verdiepende bronnenanalyse van de geselecteerde 'evidence-based' effectstudies en (II) een beschouwend gedeelte waarin de resultaten uit de effectenstudies, mede op basis van de andere studies en kennis, worden geduid in een ecologische context. Belangrijke vragen daarbij zijn hoe de effecten van menselijke activiteiten zich verhouden tot beroering door natuurlijke dynamiek, wat de gevoeligheid (sensitiviteit) van soorten is voor dit type effecten en het herstelvermogen. Ook mogelijke cumulatie wordt hier nader bekeken.

Om te bepalen welke artikelen meer tot in detail werden bestudeerd voor de daadwerkelijke analyse, is een selectie gemaakt. Dit is gedaan op basis van een indeling van artikelen die effect beschrijven op morfologie en op biotiek. Daarbij is gekeken naar het aantal artikelen dat is gevonden per bodemberoeringstype (d.w.z. de verschillende menselijke activiteiten en de natuurlijke dynamiek). Het aantal artikelen met de hoogste impact factor (aantal citaties in combinatie met publicatiejaar) per onderwerp werd meegenomen voor de verdiepende bronnenanalyse. Daarbij werd ook gelet op de locatie van het studiegebied (met een voorkeur voor studies in de Waddenzee of qua afstand zo dichtbij mogelijk). Voor verdere verwerking is uit elk geselecteerd artikel informatie geëxtraheerd en in een analysetabel opgeschreven (zie aparte Excel bijlage 1), onderverdeeld in de volgende categorieën voor nadere analyse: documentatie, algemeen, methode/kwaliteitscontrole, studiegebied, morfologische effecten, biotische effecten structureel, biotische effecten functioneel en sensitiviteit (voor details zie tabel bijlage 1.1). De effecten zijn hierbij onderverdeeld in effecten op de morfologie (sedimentsamenstelling, korrelgrootte, organisch gehalte en troebelheid) en biotiek.

Effecten op de biotiek zijn onderverdeeld in effecten gerelateerd aan klassieke structurele parameters van de benthische gemeenschap (bv. biodiversiteit/evenness[2], soortenrijkdom, aantallen/dichtheid en biomassa) en functionele parameters (bv. 'functional diversity', 'trait composition' en secundaire productie).

Tevens is voor elke studie de hersteltijd voor elk onderdeel genoteerd wanneer dit in de studie stond beschreven. Om een sensitiviteitsmaat voor soorten te kunnen bepalen is daarnaast ingevuld welke soorten kenmerkend waren voor het controle en/of impact gebied en of er in de betreffende studie specifieke soorten als 'gevoelig' zijn geïdentificeerd.

Vervolgens is een tweede selectie gemaakt van bronnen op basis van relevantie (bv. studiegebied, sublitoraal, diepte, sediment) en betrouwbaarheid (bv. BACI effectstudie, voldoende replica's, referentiesituatie). Aan elke geanalyseerde bron is hiervoor een betrouwbaarheids- en relevantiescore toegekend met een beoordelingsmaat (zie uitwerking in tabel bijlage 1.2). Studies met een lage score voor betrouwbaarheid in de zin van het ontbreken van referentie- of controlegebieden of weinig monsters zijn niet meegenomen in de resultatenbeschrijving. Dat geldt tevens voor studies met een lage score voor relevantie. Uitzonderingen zijn model- en labstudies die door hun andere opzet afzonderlijk zijn beoordeeld.

Voor de beschrijving van de resultaten van elke activiteit in hoofdstuk 3 zijn de resultaten kort samengevat volgens een vast stramien. Daarbij wordt ingegaan op (1) het type bodemberoering en voorkomen in tijd en ruimte, (2) wat de bodemberoering doet en welk deel van de bodem impact ondervindt, (3) hoeveel studies beschikbaar zijn en leemten in kennis, en (4) wat de belangrijkste resultaten zijn. Aan het eind volgt een korte samenvatting in een overzichtstabel.

2.3.3 Bronnenoverzicht

In totaal zijn voor deze review 210 bronnen geselecteerd en opgeslagen met relevante onderwerpen voor de huidige studie, waaronder 97 effectstudies, 6 meta-analyses, 21 modelstudies, 36 reviews en 53 bronnen vallende onder een andere categorie (d.w.z. beschrijvende studie, proefschrift, notitie, boek). Voor de 'evidence based' analyse zijn 60 studies geselecteerd (zie uitleg hierboven) op basis van onderwerp, impact factor en betrouwbaarheid en relevantie; waaronder 56 effectstudies, 2 meta-analyse en 2 modelstudies.

Figuur 2-5 geeft het aantal geselecteerde studies voor analyse per type verstoring weer, uitgesplitst in het aantal bronnen per effectcategorie (biotiek, morfologie, of een combinatie). Er zijn relatief veel studies gevonden voor zandsuppleties en boomkorvisserij met wekkerkettingen. Van andere bodemberoerende activiteiten zijn minder effectenstudies beschikbaar. Uit het overzicht blijkt, dat het aantal studies dat zich richt op de biotiek wat groter is dan morfologische studies, maar dat in veel studies beide indicatoren zijn meegenomen. Voor zowel sedimentextractie, zandsuppletie en ijsgang zijn 'simulatie' studies in de analyse meegenomen. In deze studies is de betreffende activiteit gesimuleerd in het veld of in een laboratoriumsetting en zijn de effecten hiervan gemeten. In figuur 2-6 is ook het aantal artikelen per publicatiejaar weergegeven. In de analyse zijn relatief veel recente studies meegenomen.

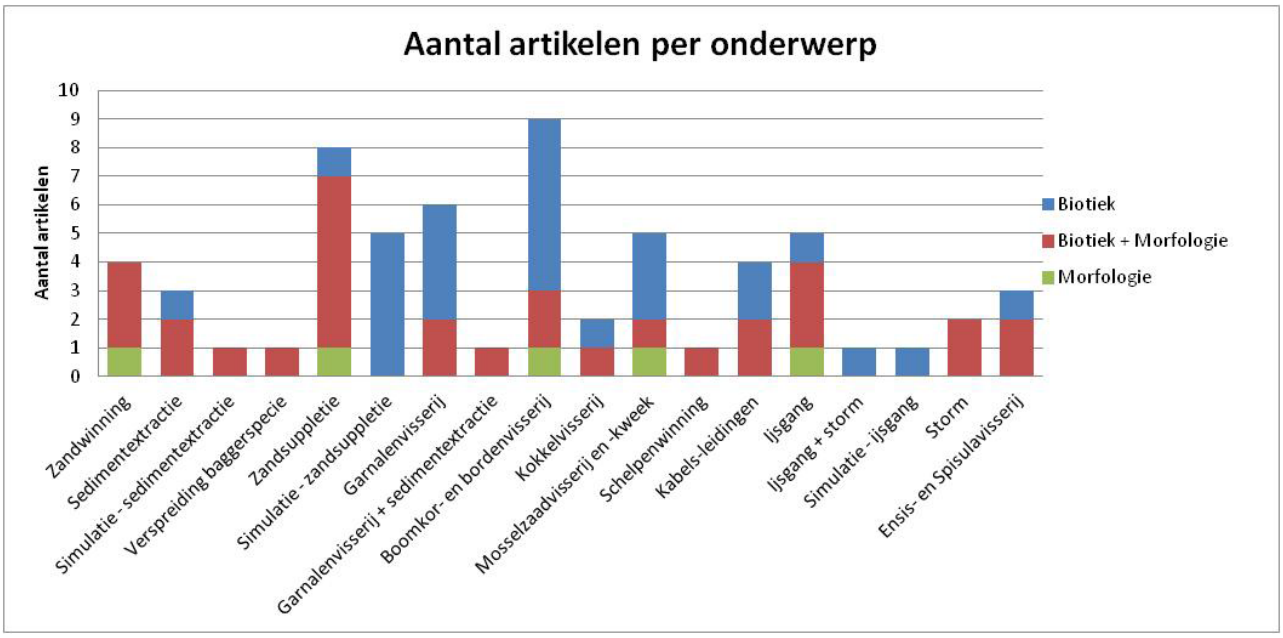
Figuur 2-7 geeft het aantal studies per diepterange weer, verdeeld over de verschillende studiegebieden. Er is relatief veel onderzoek gedaan naar activiteiten met effecten op droogvallende platen en in het ondiepe kustgebied.

In totaal zijn 18 studies in de gehele Waddenzee meegenomen (13 in de Nederlandse Waddenzee), waarvan 6 in het litoraal, 8 in het sublitoraal en 4 studies beide zones dekken. In figuur 2-8 wordt op kaart een overzicht gegeven van studies aan bodemberoering in de Waddenzee. Daarbij valt op dat er vooral veel onderzoek is gedaan in het westelijk deel van de Waddenzee, en dan met name over de onderwerpen mosselzaadvisserij/-kweek en garnalenvisserij.

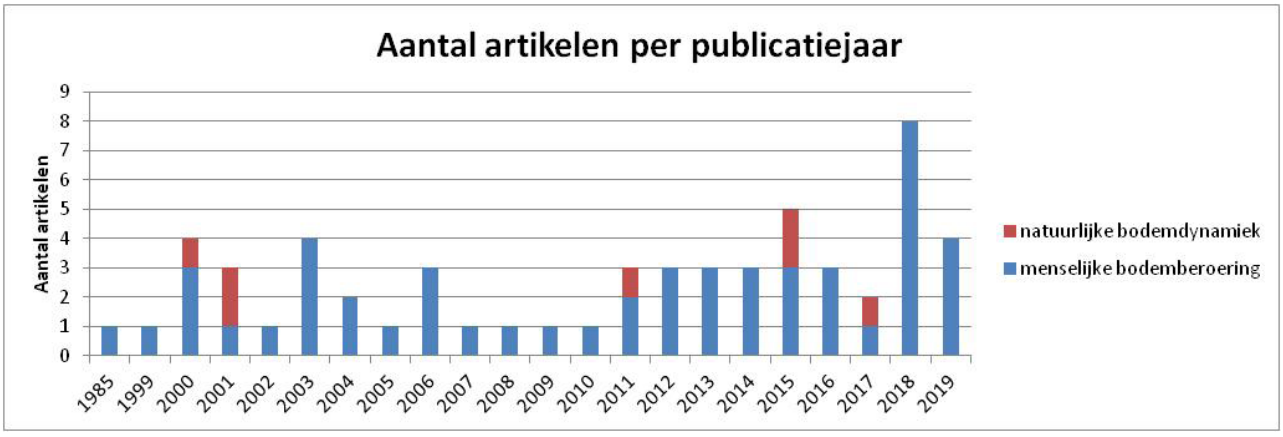
---

[2] Verklaring van termen: Evenness = verdeling van individuen over soorten
Functional diversity = elementen van biodiversiteit die beïnvloeden hoe ecosystemen functioneren
Trait composition = samenstelling van eigenschappen van verschillende organismen in een levensgemeenschap

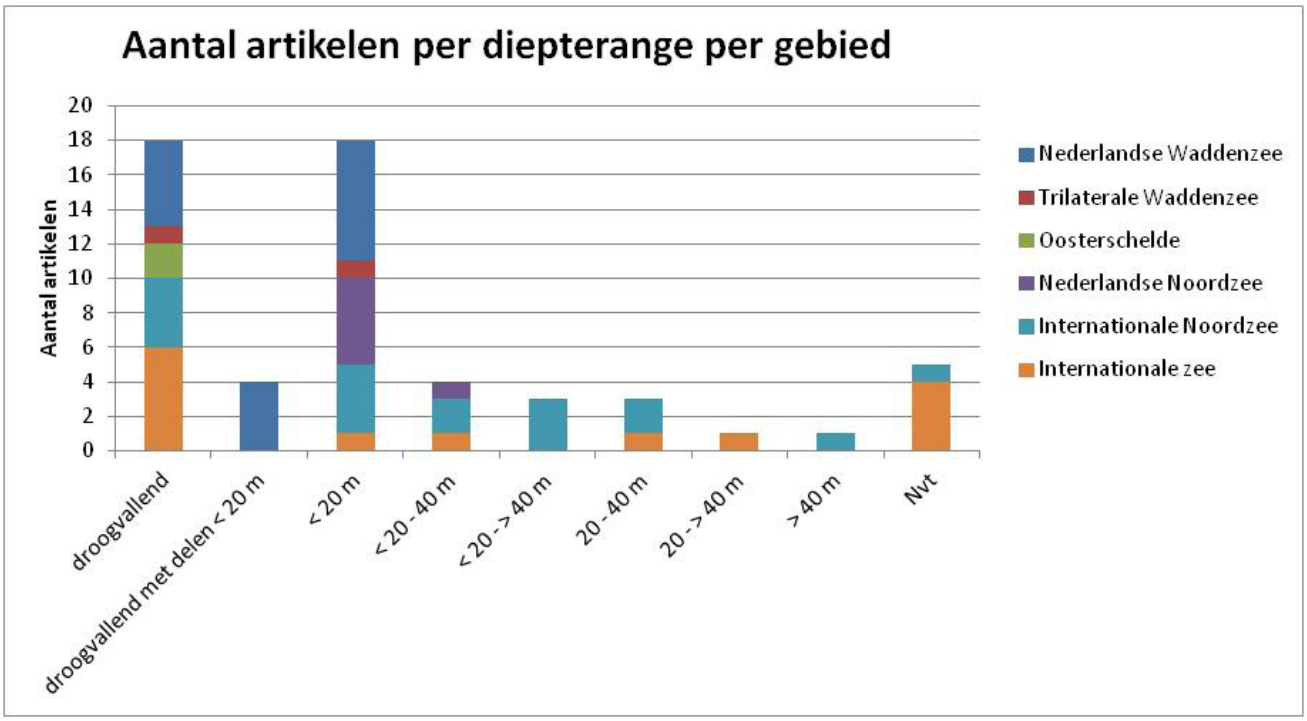
Vijf van de geselecteerde studies zijn uitgevoerd in de Nederlandse Noordzeekustzone, 34 studies in de internationale zeeën. Hoewel er geen één op één vertaling mogelijk is van de resultaten uit deze studies naar de Nederlandse Waddenzee en Noordzeekustzone, kunnen deze indicatief zijn voor algemene patronen en zijn daarmee relevant voor dit onderzoek.



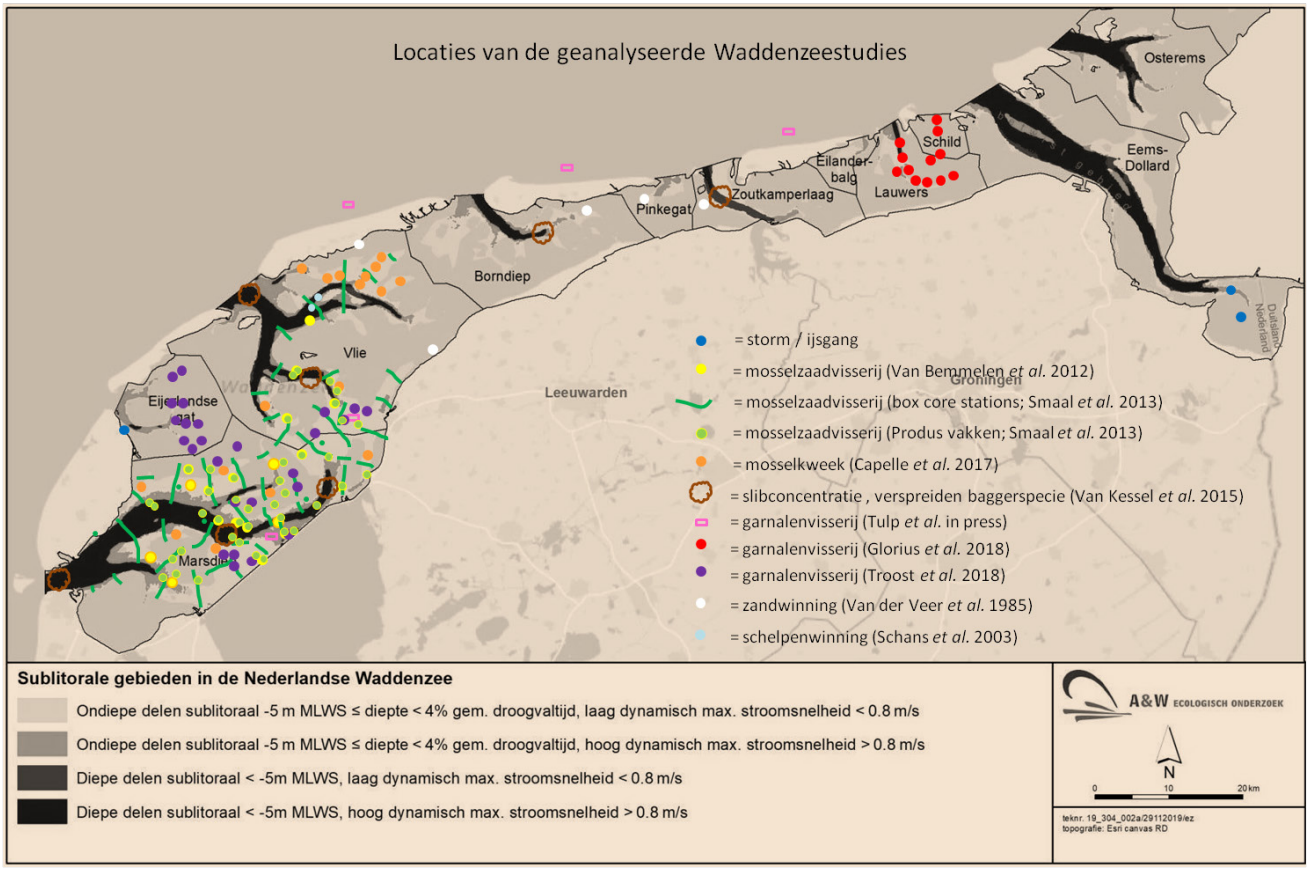
Figuur 2-5. Overzicht van het aantal geselecteerde effectenstudies per bodemberoerende activiteit resp. bodemverstoring per primair effect op biotiek, en/of morfologie.



Figuur 2-6. Overzicht van geselecteerde effectenstudies verdeeld over menselijke bodemberoerende activiteit resp. natuurlijke bodemdynamiek, en het publicatiejaar van de geselecteerde effectenstudies.



Figuur 2-7. Verdeling van de geselecteerde effectenstudies naar diepteklasse en oorsprong studiegebied.



Figuur 2-8. Overzicht van studies aan bodemberoering in de Waddenzee (onderliggende kaart gebaseerd op Baptist et al. 2019).

2.4 Selectie van indicatoren voor het afwegingskader

Eerdere studies aan de effecten van bodemberoering (bv. Hiddink et al. 2006; Tillin et al. 2006; Van Dalfsen et al. 2000; Van Denderen et al. 2015; Rijnsdorp et al. 2018) wijzen uit dat er een aantal indicatoren zijn die belangrijk kunnen zijn bij het maken van de vergelijking tussen natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering. Het gaat hierbij om indicatoren op verschillende niveaus, te weten: eigenschappen van het systeem en van de ingreep; bodemparameters en biotiek (zie tabel 2-2). In tabel 2-2 zijn de belangrijkste systeem-/ingreepeigenschappen en indicatoren weergegeven, evenals het percentage van de geanalyseerde artikelen waarbij iets over de indicator wordt gezegd. Bij de beschrijving van effecten in het resultaten hoofdstuk (H3) worden de resultaten tabellarisch samengevat, waarbij deze tabel (2-2) per type natuurlijke bodemdynamiek vs. menselijke bodemberoerende activiteit zoveel mogelijk wordt ingevuld, afhankelijk van de beschikbare kennis die er is. Er is gekozen voor een set van meerdere indicatoren (en niet één), omdat er verschillende onderzoeken zijn die verschillende factoren meten. Wij proberen daarin alles mee te nemen en overzicht te krijgen (waar mogelijk op basis van veldgegevens, modellen); en indien kennis ontbreekt de leemtes aan te geven.

Van de indicatoren is in onderstaande tabel een korte definitie gegeven in de laatste kolom. Bij het uitwerken van de vergelijking van effecten tussen natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering gebruiken we met name 3 indicatoren: bodemschuifspanning, sensitiviteit, en herstel. Deze indicatoren zijn overkoepelend voor de andere indicatoren, geven de maat van het effect goed weer en zijn goed vergelijkbaar.

1. De bodemschuifspanning geeft een integraal beeld van de bodemparameters bodemdynamiek, sedimenttype, organisch gehalte en korrelgrootte.

2. De sensitiviteitsmaat geeft een samenvatting van de biomassa, dichtheid, diversiteit en soortensamenstelling.

3. Herstel is een maat voor de ecologische impact.

Tabel 2-2. Systeem-/ingreepeigenschappen en indicatoren voor het bepalen en vergelijken van effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering

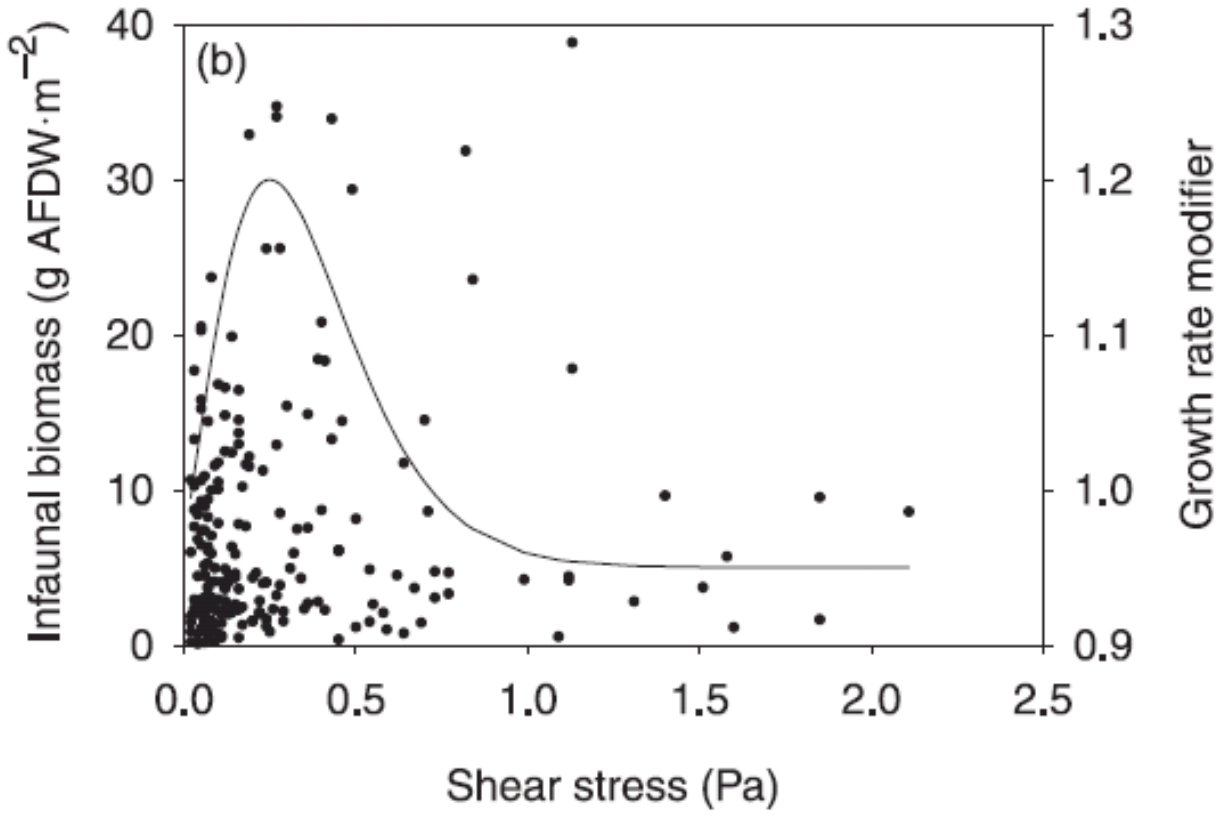
Systeembeschrijving	Indicator	Toelichting	In % van geanalyseerde (51) studies gebruikt
Systeem duiding	Laag dynamisch - hoog dynamisch	Activiteiten kunnen plaatsvinden in laag vs. hoog dynamische gebieden [laag dynamisch = max. stroomsnelheid < 0.8 m/s; hoog dynamisch = max. stroomsnelheid > 0.8 m/s]	23%
	Ondiep - diep	Activiteiten kunnen plaatsvinden in ondiepe vs. diepe gebieden (ondiep: -5m MLWS ≤ diepte < 4% gem. droogvaltijd; diep < -5 m MLWS; MLWS = gemiddeld laagwaterspring]	78%
Ingreep	Intensiteit van de beroering	Invasief: bedekken, omploegen Minder invasief: schuren	96%
	Frequentie	in aantal malen per jaar in de Waddenzee	96%
	Ruimtelijk spreiding	Lokaal, regionaal, hele Waddenzee	25%
Bodemparameters	Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)	Veranderingen in bodemligging (klein, groot, heel groot)	31%
	Sedimenttype en korrelgrootte	Slib, klei, zand, grof zand (of mengsels daarvan)	43 - 90%
	Organisch materiaal gehalte	Als gehalte van sedimentmassa (laag, beperkt, hoog)	16%
	Bodem-schuifspanning	Maat voor de erosiegevoeligheid van de bodem (laag, beperkt, hoog) (zie toelichting in §2.3.5)	16%
Biotiek	Biomassa	De totale massa van de bodemorganismen in het studiegebied	23%
	Dichtheid	De hoeveelheid individuen van een soort per oppervlakte-eenheid	23%
	Diversiteit/ soortsamenstelling	Verscheidenheid aan soorten	22%
	Sensitiviteit	Kwetsbaarheid van een soort / het systeem (zie toelichting in §2.3.6)	31%
	Herstel	Terugkeer van soorten na verwijdering/ sterfte (zie toelichting in §2.3.7)	14%

2.4.1 Bodemschuifspanning

Bodemschuifspanning is een fysieke horizontale kracht die op de bodem inwerkt, zoals de kracht van stromend water of een menselijke bodemberoerende activiteit. Bodemschuifspanning wordt uitgedrukt in kracht per oppervlakte-eenheid zeebodem (N/m2). Bij stromend water is bodemschuifspanning een functie van de waterdiepte, stroomsnelheid, golven (orbitaalsnelheid) en de bodemruwheid.

Hoge bodemschuifspanning resulteert in schuring van de bodem en als de kracht te groot wordt door bv. hoge stroomsnelheden zal er erosie van de bodem optreden.

Met de aanname dat bodemschuifspanning in eerste instantie de biomassa van bodemdiergemeenschappen beïnvloedt via groeisnelheid (de foerageeractiviteit wordt beperkt als er een te hoge stroomsnelheid is), tonen Hiddink et al. (2006) middels modelwerk en velddata, aan dat er een verband is tussen de groeisnelheid van infauna (biomassa) in de Noordzee en de bodemschuifspanning. Er is een maximum van gemodelleerde bodemschuifspanning (0,25 N/m2) voor groei en overleving van benthos (zie figuur 2-9; Hiddink et al. 2006). Er is echter ook enige mate van waterbeweging nodig voor de aanvoer van voedingsstoffen voor bodemdieren (m.a.w. een bodemschuifspanning van 0 is ook niet optimaal; Hiddink et al. 2006).



Figuur 2-9. Het verband tussen infauna biomassa in de Noordzee en bodemschuifspanning als gevolg van getijdestroming (uit Hiddink et al. 2006).

Bodemschuifspanning is een goede parameter bij het vergelijken van menselijke bodemberoering en natuurlijke bodemdynamiek, omdat het een integraal beeld geeft van andere bodemparameters (wanneer de bodemschuifspanning verandert, veranderen de andere bodemparameters ook).

Het gebruik van de parameter bodemschuifspanning is drieledig:

1. Met bodemschuifspanning zijn gebieden in de te delen in mate van dynamiek, bv. hoog versus laag. Binnen deze gebieden kan vervolgens gekeken worden naar de effecten van een bodemberoerende activiteit.

2. Bodemschuifspanning is te modelleren, waardoor er bijvoorbeeld ook een situatie gemodelleerd kan worden zonder menselijke bodemberoering. Op basis daarvan kunnen uitspraken worden gedaan over wat verwacht kan worden aan benthos. Dit kan vervolgens vergeleken worden met veldmetingen, wat inzicht kan geven in effecten van menselijke bodemberoering additioneel aan natuurlijke bodemdynamiek.

3. Bodemschuifspanning kan als parameter gebruikt worden om 'een gebied van impact' door fysieke verstoring vast te stellen, hetgeen ook voor een menselijke bodemberoerende activiteit kan worden gedaan waardoor (mogelijk) een vergelijking kan worden gemaakt met natuurlijke dynamiek (Diesing et al. 2013).

2.4.2 Sensitiviteitsmaat

Sensitiviteit wordt over het algemeen gedefinieerd als de kans op aantasting, mortaliteit of verdwijnen/uitsterven van individuen, populaties, gemeenschappen of habitats, als reactie op een of meerdere stressfactoren, zowel natuurlijk als menselijk (Hewitt et al. 2011). De mate van sensitiviteit is vaak ook bepalend voor de mate van herstel, maar bij herstel speelt naast de gevoeligheid van een organisme voor verstoring ook de rekolonisatiesnelheid een rol. Benadrukt moet worden dat sensitiviteit betrekking heeft op de gevoeligheid van zowel de bodem (morfologie), de soorten die er in leven (sensitiviteit op soortniveau) als van de samenhang in het (eco)systeem. Wij beperken ons hier in deze paragraaf voor sensitiviteit tot de kans op de mortaliteit van individuen, omdat in deze literatuurstudie de focus ligt op de primaire effecten.

De laatste decennia hebben ecologen zich gericht op het koppelen van biologische kenmerken van soorten aan kenmerken van specifieke verstoringen als een methode om de sensitiviteit te beoordelen. Dergelijke methoden zijn toepasbaar in een breed scala van habitats en regio's waar gedetailleerde soortspecifieke kennis of experimentele gegevens niet beschikbaar zijn (de Juan et al. 2007; Tyler- Walters et al. 2009). In het mariene milieu hebben veel van deze beoordelingen zich gericht op de effecten van commerciële visserijverstoring op de benthische gemeenschappen, maar de technieken zijn toepasbaar op andere soorten fysieke verstoring van de zeebodem, inclusief kanaal baggeren (bijv. Guerra-García et al. 2003) en mijnbouw (bijv. Boyd et al. 2005).

Het schatten van de mate van sensitiviteit van de benthische organismen is belangrijk, omdat het de potentiële kwetsbaarheid van ecologische soortgroepen of systemen kan identificeren en het risico’s kan beoordelen die voortkomen uit bodemberoering en -verstoring. Deze informatie kan richting geven aan beleid en beheer, denk bijvoorbeeld aan de bescherming van bepaalde gebieden, clustering van activiteiten in (dynamische) gebieden met minder gevoelige soorten en monitoring. Door een sensitiviteitsmaat te gebruiken, kunnen activiteiten, effecten, gebieden en soorten in een breder kader geplaatst worden.

Voor het indicatief ‘berekenen’ van de sensitiviteit is een set van biologische kenmerken toegewezen aan de soorten (tabel 2-3). De set aan kenmerken is gebaseerd op de huidige kennis van de reacties van soorten op verstoring (samengevat in voorliggende studie). De gebruikte kenmerken zijn een verkorte lijst van biologische kenmerken waar genoeg kennis over is en die toegepast zijn op bodemberoering in de Waddenzee. Functionele kenmerken als grootte, leeftijd, zeldzaamheid en dichtheid worden niet meegenomen. Ook zijn sommige biologische kenmerken meer gerelateerd aan herstel dan aan sensitiviteit.

De kenmerken uit tabel 2-3 zijn vervolgens gegroepeerd in verschillende mate van sensitiviteit voor de effecten van een fysieke verstoring (Hiscock & Tyler-Walters 2006, Tyler-Walters et al. 2009; tabel 2-4). Dit is gebeurd op basis van de volgende scores: positieve reacties -1, neutraal 0, negatief 1, sterk negatief 2. De mate van sensitiviteit is op basis van tabel 2-4 ingedeeld. Om inzicht te krijgen in de sensitiviteit van soorten in het sublitorale deel van de Waddenzee en aanpalende Noordzeekustzone is een eerste aanzet gedaan door voor de 26 meest voorkomende soorten in dit gebied een sensitiviteitsmaat op te stellen (zie figuur 2-10). Biologische kenmerken zijn toebedeeld aan soorten op basis van literatuur en expert judgement.

Tabel 2-3. Lijst van biologische kenmerken die sensitiviteit voor fysische verstoring bepalen (gebaseerd op Hewitt et al. 2011). De schaal van deze indeling is op individueel en/of groepsniveau, maar niet op populatieniveau.

Type	Kenmerk	Reactie op verstoring
Foerageermodus	Aaseters & predatoren	Positief: extra voedsel na verstoring
	Suspension, deposit, grazers	Neutraal: Afhankelijk van locatie, type verstoring en duur kunnen effecten negatief, neutraal maar ook positief zijn.
Habitat	Uitstekend uit bodem, rechtop	Negatief: kan breken door verstoring
	Alle ander types	Neutraal: ander vormen van habitats zijn gekoppeld aan de positie in sediment
Mobiliteit	Sessiel	Sterk negatief; soort kan niet weggaan
	Relatief sessiel	Negatief: kan moeilijk weggaan
	Mobiel	Neutraal; In staat om weg te gaan van (of te begraven) naderen verstoring
Positie in sediment	Op sediment oppervlakte	(Sterk) negatief: wordt verstoord, maar afhankelijk van graafcapaciteit
	In top 2-5 cm	Negatief afhankelijk van diepte van de verstoring
	Dieper dan 2-5 cm	Negatief of neutraal afhankelijk van diepte van de verstoring
Fragiliteit	Heel fragiel	Sterk negatief: wordt beschadigd of gaat dood
	Fragiel	Negatief: wordt beschadigd
	Robuust	Neutraal

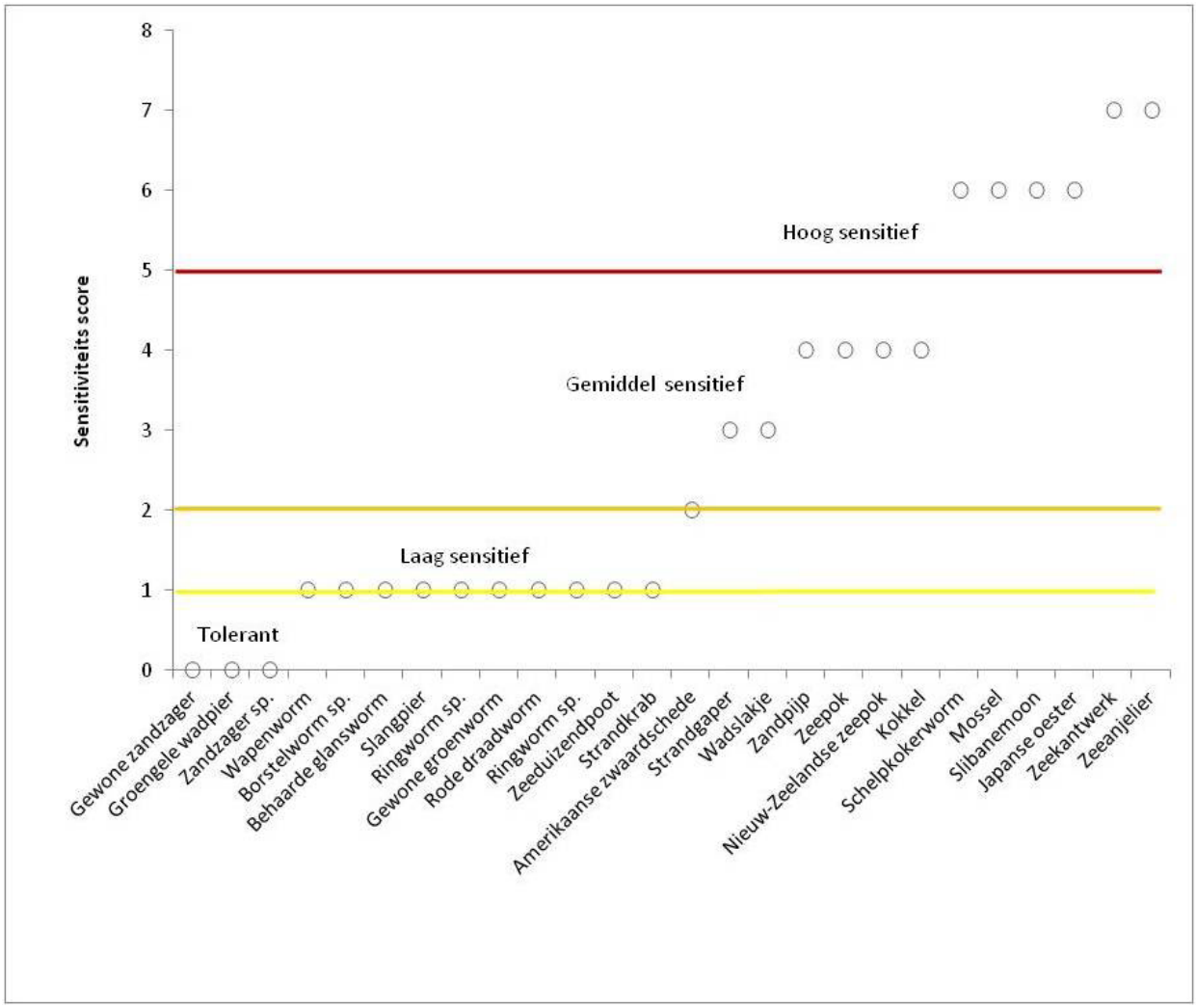
Tabel 2-4. Categorieën van gevoeligheid, gebaseerd op Tyler-Walters et al. (2009), voor individuen voor fysieke verstoring.

Sensitiviteit categorie	Sensitiviteit score	Reactie	Kenmerk
Hoog	=>6	Individuen gaan / groot deel van de populatie gaat dood door verstoring	Sedentaire, rechtopstaande levensvormen die erg breekbaar zijn
Gemiddeld	3-5	Sommige individuen gaan dood	Kwetsbare levensvormen die rechtop staan of bewoners van het sedimentoppervlak met beperkte mobiliteit
Laag	1-2	Enkele individuen gaan dood	Niet-rechtopstaande of fragiele levensvormen die op het oppervlak of in de bovenste 2 cm van het sediment leven en beperkte mobiliteit hebben
Tolerant	0	Geen reactie	Leeft vooral in het sediment met hoge mobiliteit (graafcapaciteit)
Positief	<=-1	Individuen gaan naar gebied toe	Aaseters en roofdieren die zeer mobiel zijn

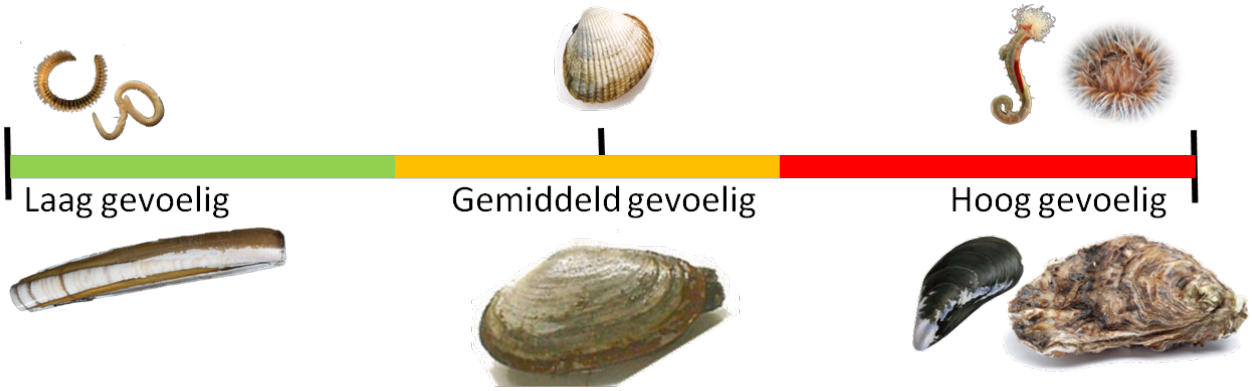
Uit de sensitiviteitsmaat, die is opgesteld op basis van literatuur, is af te leiden dat de volgende soorten in het sublitorale deel van de Waddenzee erg sensitief zijn voor beroering: (meerjarige) banken van mosselen, Japanse oesters, anemonen en schelpkokerwormen. Dit komt overeen met studies in het veld aan deze of vergelijkbare soorten (zie ook H3).

Uit de sensitiviteitsmaat is ook af te leiden dat er soorten zijn die gemiddeld gevoelig zijn voor verstoring zoals kokkels en strandgapers. Dit kan zichtbaar zijn door een verschil in ontwikkeling, met een lagere mate van groei in verstoorde gebieden (zie ook H3). Strandgapers zitten diep in de bodem en zijn robuust en zijn daardoor minder gevoelig voor oppervlakkige bodemberoering. Deze soort is echter wel gevoelig voor morfologische instabiliteit (d.w.z. steeds veranderende morfologie, zoals beweging van wadplaten; Wolff 1973).

Soorten die laag gevoelig zijn, zijn grotendeels mobiele wormensoorten zoals zandzagersoorten Nephtys hombergii/ cirrosa, maar ook de Amerikaanse zwaardschede. Eerdere studies bevestigen dit (zie ook H3). Zwemmende en lopende bodemdieren, zoals krabben/garnalen, zijn laag gevoelig en kunnen zich in veiligheid brengen bij beroering van de bodem.



Figuur 2-10. Sensitiviteitsscore (gebaseerd op literatuur; o.a. Hiscock & Tyler-Walters 2006, Tyler-Walters et al. 2009).



Figuur 2-11. Gevoeligheid van bodemdieren voor beroering, van laag gevoelig (wormensoorten, zwaardschede), gemiddeld gevoelig (kokkel, strandgaper), tot hoog gevoelig (schelpkokerworm, anemoon, meerjarige mossel- en oesterbanken).

2.4.3 Maat voor het herstelvermogen

Nadat bodemberoering heeft plaatsgevonden, volgt de stap naar herstel. Het herstel van een systeem is een belangrijk gegeven bij het beoordelen van het effect. Herstel is afhankelijk van het herstelvermogen van de bodem, van de afzonderlijke soorten en van de relaties die het systeem maken tot wat het is (bijv. een mosselbank als mini-ecosysteem; Zwarts 1991). Bij het herstelvermogen van de bodem en de bovenste bodemlaag is de vraag relevant of dezelfde sortering en laging van sediment terugkeert als voor de ingreep. Wanneer sprake is van uitspoeling van een bepaalde sedimentfractie, dan kan het zijn dat herstel van het originele systeem niet mogelijk is. Of met andere woorden, dat in de 'herstelde' situatie weliswaar weer sprake is van een bodem met bodemleven, maar dat die afwijkt (voor i.i.g. langere periode) van de ongestoorde situatie. Dat speelt bijvoorbeeld in gebieden waar in het verleden sprake is geweest van intensieve bodemvisserij (Kaiser et al. 2006).

Herstel van de soortengemeenschap na een ingreep heeft zowel een kwalitatief als kwantitatief aspect. Soorten kunnen pas terugkeren als de ecologische condities zodanig zijn, dat die passen bij hun optimale habitat, en dus de bodem voldoende is hersteld. Bij herstel speelt naast de gevoeligheid van een organisme voor verstoring ook de rekolonisatiesnelheid een rol. Pioniers zullen daarom domineren in de vroege herstelfase, waarna langzamerhand ook andere soorten gaan terugkomen. In die vroege pionierfase kunnen ook exoten die plaats innemen waardoor de verhoudingen in de soortengemeenschap veranderen, mede als gevolg van bodemverstoring. De Amerikaanse zwaardschede lijkt daar een goed voorbeeld van, zoals aangetoond door Dannheim & Rumohr (2012) en Tulp et al. (2020). Deze tweekleppige vult relatief snel niches op en is ook relatief snel weer terug na beroering van de zeebodem. Uiteindelijk gaat het er om, of de soorten ook weer in de dichtheden voorkomen die horen bij de ongestoorde situatie van voor de ingreep.

Analoog aan de sensitiviteit is ook voor herstel een maat opgesteld. Voor het bepalen van de hersteltijd is een vergelijkbare analyse uitgevoerd (Bijlage 4). De gehanteerde biologische kenmerken staan in tabel 2-5 en de indeling van de herstelscore in tabel 2-6.

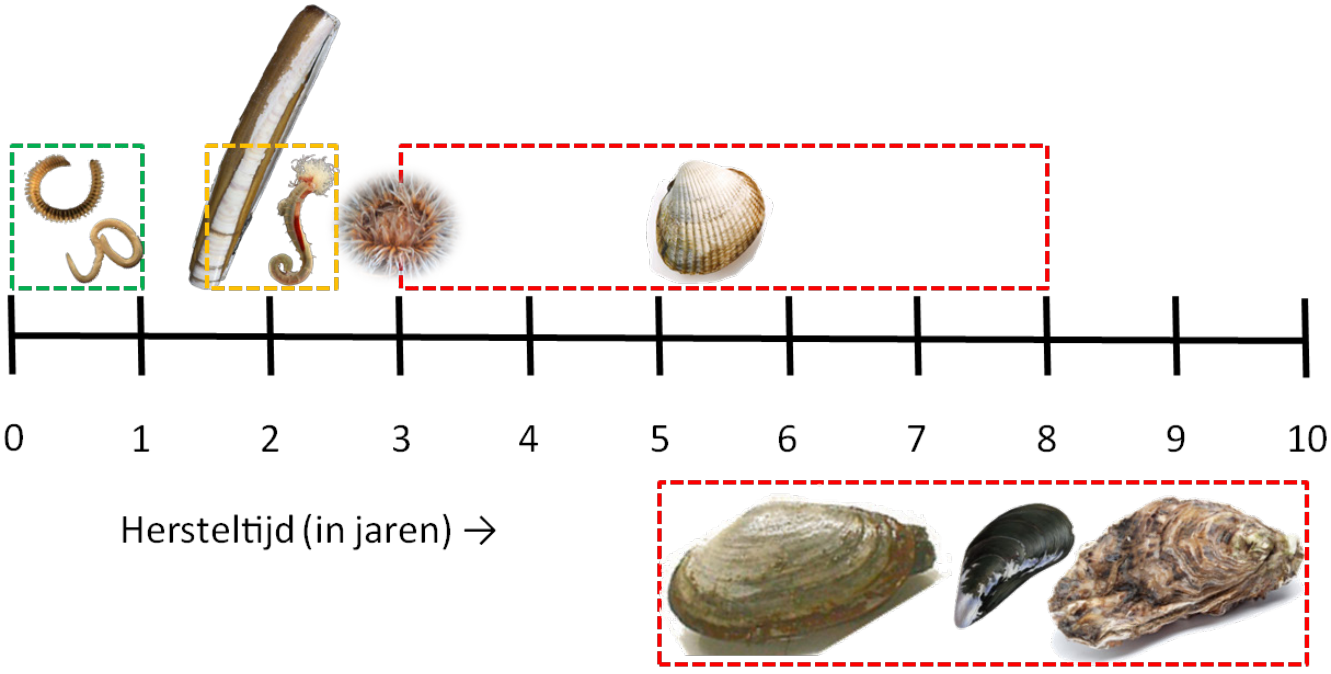
Type	Kenmerk	Herstel na verstoring
Levensduur	Kort <5 jr	Positief effect = 0
	Lang > 5 jr	Negatief effect = 1
Reproductie	Jaarlijks succesvol	Positief effect = 0
	Niet jaarlijks succesvol	Negatief effect = 1
Kolonisatie	Kolonisatie van juvenielen en adulten	Positief effect = 0
	Kolonisatie deels door adulten en juvenielen	Neutraal effect = 1
	Kolonisatie alleen van juvenielen	Negatief effect = 2
Habitat range	Breed	Positief effect = 0
	Smal	Negatief effect = 1

Tabel 2-5. Lijst van biologische kenmerken die herstel na fysische verstoring bepalen. De schaal van deze indeling is op individueel en/of groepsniveau, maar niet op populatieniveau (gebaseerd op verschillende literatuur).

Herstel categorie	Herstel score	Kenmerk
Lang	=>3	Langlevende sessiele (schelp)dieren die niet elk jaar succesvol reproduceren
Gemiddeld	1-2	Organismen die een smalle habitat range hebben en specifiek sediment/ substraat nodig hebben voor settlement
Kort	0	Kortlevende mobiele soorten die snel reproduceren, snel koloniseren en een brede habitat range hebben

Tabel 2-6. Categorieën van herstel voor individuen voor fysiek verstoring.

Om inzicht te krijgen hoe snel soorten in het sublitorale deel van de Waddenzee zich kunnen herstellen is voor de 26 meest voorkomende soorten in het sublitorale deel van de Wadenzee ook een herstelmaat opgesteld (figuur 2-12, zie ook voor de achtergrondinformatie bijlage 4).



Figuur 2-12. Schematische weergave van de hersteltijd (in jaren) van wormensoorten

Fragiele soorten gaan snel dood door fysieke verstoring, maar sommige fragiele soorten zoals wormen kunnen binnen enkele maanden tot 1 jaar weer rekoloniseren (o.a. Deltares 2014). Anderzijds zijn er soorten die én gevoelig zijn voor fysieke verstoring én ook nog langzaam herstellen omdat ze niet elk jaar reproduceren, zoals Mosselen. En voor de mosselbanken als belangrijke systeemstructuur geldt dat er nog veel langer hersteltijd nodig is. Bij deze soorten zijn dan sterkere en langere negatieve effecten op individuen te zien in aantallen en biomassa. Hierbij spelen de snelheid van reproductie en levensduur een belangrijke rol.

Op basis van deze analyse hebben de volgende soorten in het sublitorale deel van de Waddenzee de langste hersteltijd na beroering: Banken van mosselen of Japanse oesters, Kokkels, Strandgapers en Anemonen (Figuur 2-11). Dit komt overeen met studies in het veld aan deze of vergelijkbare soorten: afhankelijk van een jaar met goede broedval is de hersteltijd van kokkels na beroering 3-8 jr (Piersma et al. 2001, Beukema & Dekker 2018, Boersema et al. 2018). Mosselen zijn daarnaast ook nog eens afhankelijk van de aanwezigheid van hard substraat en zijn erg gevoelig voor winterstorm en vraat. Stabielere banken hebben daarbij een veel langere hersteltijd (>5 jr) (Smaal et al. 2013, Donker et al. 2015, Van der Meer et al. 2018). Soorten met een gemiddelde hersteltijd zijn Schelpkokerwormen en de Amerikaanse zwaardschede. Soorten die snel koloniseren en herstellen zijn wormensoorten zoals zandzagersoorten Nephtys hombergii/cirrosa.

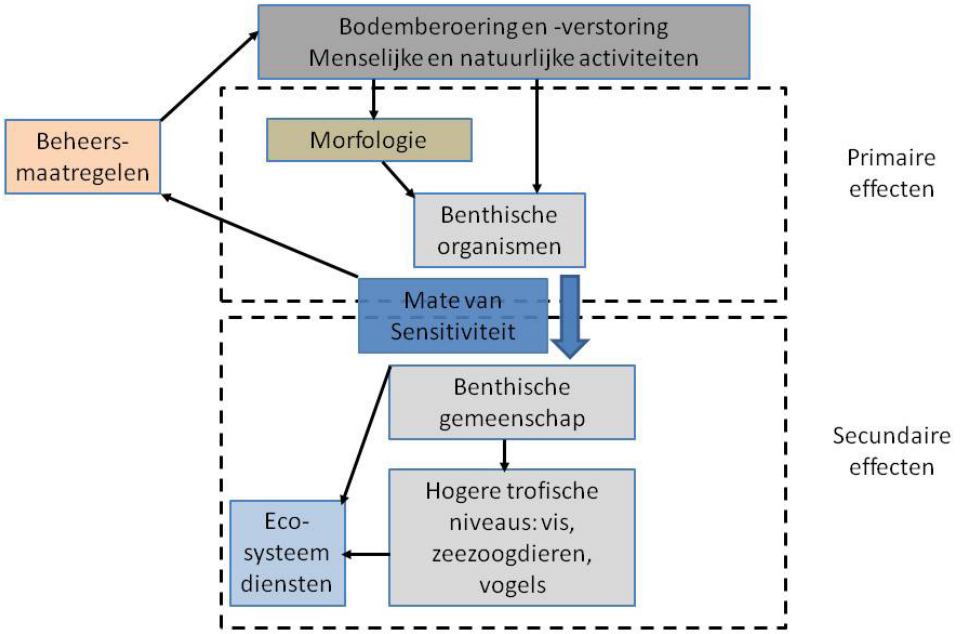
2.4.4 Geen maat voor cumulatieve effecten

In de Europese Habitatrichtlijn, en de vertaling daarvan in de Nederlandse Wet natuurbescherming heeft cumulatie veel aandacht. Er dient bij Passende beoordelingen niet alleen gekeken te worden naar de effecten van afzonderlijke activiteiten, plannen of projecten maar ook naar de cumulatieve effecten. Cumulatie van effecten van bodemberoerende ingrepen kan optreden wanneer bodemberoerende activiteiten elkaar overlappen of wanneer de hersteltijd van de bodem en bodemgemeenschappen langer is dan de 'terugkeertijd' van activiteiten. Met andere woorden, wanneer alweer bodemberoering plaatsvindt terwijl er nog geen volledig herstel heeft plaatsgevonden. Het lijkt voor de hand liggend dat als de bodem na een beroering nog niet hersteld is, deze gevoeliger is voor nieuwe beroeringen; met andere woorden, de bodem wordt dan in een pionierfase gehouden (dit geldt zowel voor beroering door natuurlijke bodemdynamiek als menselijke bodemberoering, met de vraag of de extra effecten door de mens onderscheidend zijn; zie uitwerking in 4.3). Figuur 2-4 laat zien, dat buiten de gesloten gebieden vrijwel overal bodemberoerende activiteiten plaatsvinden en ook deels op dezelfde plaats (overlap in ruimte). Daardoor kan cumulatie optreden van effecten.

Er is voor de (Britse) Noordzee een beperkt aantal studies uitgevoerd om cumulatieve effecten van menselijke activiteiten wetenschappelijk vast te stellen, bijvoorbeeld met o.a. behulp van habitat mapping en biological trait analysis (Foden et al. 2011, Kenney et al. 2018). Ondanks deze studies is er toch te weinig literatuur en kennis beschikbaar om cumulatieve effecten in ruimte en tijd in de Nederlandse Waddenzee op een gedegen manier mee te nemen in het afwegingskader. Voor de toekomst is dit een belangrijk aandachtspunt voor onderzoek. In de Waddenzee zijn zoveel vormen van menselijke bodemberoering gaande dat cumulatie hoogstwaarschijnlijk zal bestaan. In de discussie wordt hierop teruggekomen.

2.4.5 Geen maat voor effecten hogere trofische niveaus (doorwerking in het systeem)

In deze studie is er voor gekozen, mede op basis van de beschikbare literatuur, om in het afwegingskader alleen te kijken naar primaire effecten op de biota van de bodem zelf. Zoals al aangegeven kan de impact op epi- en endobenthische gemeenschappen door omvang en tijdsduur tot herstel doorwerken op systeemniveau (figuur 2-13). Deze secundaire effecten zijn minstens zo belangrijk, zeker voor de soorten en gemeenschappen die gevoelig zijn en minder gemakkelijk herstellen.



Figuur 2-13. Schematisch overzicht van de primaire en secundaire effecten van bodemberoering en -verstoring, waarbij de mate van sensitiviteit en herstelvermogen van benthische organismen en gemeenschappen een eerste inzicht kan geven in implicaties voor secundaire effecten en beheer.

De doorwerking op systeemniveau kan betrekking hebben op de primaire productie, bijvoorbeeld bij langdurige troebelheid door één grote ingreep, of een licht verhoogd troebelheidsniveau door herhaalde ingrepen. Ook kan de doorwerking betrekking hebben op de voedselsituatie voor hogere trofische niveaus zoals vissen, zeezoogdieren en vogels, hetzij door de fysieke ingreep zelf hetzij door andersoortige effecten. Dat kan spelen voor grootschalige of hoogfrequente activiteiten maar ook voor kleinschalige activiteiten. Zo is de kleinschalige ingreep op een litorale wadplaat van een pierensteker of handkokkelaar na één of enkele tijen misschien niet meer te herkennen, en de rekolonisatie van een dergelijk relatief kleine plek verloopt snel doordat de naburige bodemgemeenschap niet is aangetast. Echter, wanneer er een relatief groot aantal pierenstekers of handkokkelaars op één wadplaat tegelijkertijd actief is, zou er geschikt foerageergebied voor vogels tijdelijk niet beschikbaar zijn en kan herkolonisatie moeilijker plaatsvinden zodat herstel vertraagd wordt.

Kortom, bij het beoordelen van activiteiten moet naar het geheel van effecten worden gekeken en de doorwerking op systeemniveau. Maar net als voor cumulatie is er te weinig literatuur beschikbaar om hier op een gedegen manier in het afwegingkader mee om te gaan. In de discussie wordt hierop teruggekomen.

2.5 Indeling sublitoraal in subsystemen

De set van indicatoren en systeem/ingreep eigenschappen (tabel 2-2) is bedoeld om te beschrijven in hoeverre er door bodemberoering veranderingen optreden in een of meerdere van de genoemde indicatoren. Van alle genoemde indicatoren lijken de sensitiviteit, hersteltijd en de bodemschuifspanning de meest bruikbare indicatoren om een goede vergelijking te maken, zoals beschreven in §2.4, omdat deze overkoepelend zijn voor een groot aantal andere indicatoren.

Duiding van de verandering is nog steeds complex en vraagt veel begrip voor de specifieke achtergrond van iedere studie. Het is vaak niet meteen te zeggen of de verandering gunstig dan wel ongunstig is. Ten aanzien van veel ecologische bodemparameters is er namelijk sprake van een optimum. Of een bodemberoerende activiteit gunstig dan wel ongunstig is hangt niet alleen af van de verandering maar ook van de uitgangssituatie.

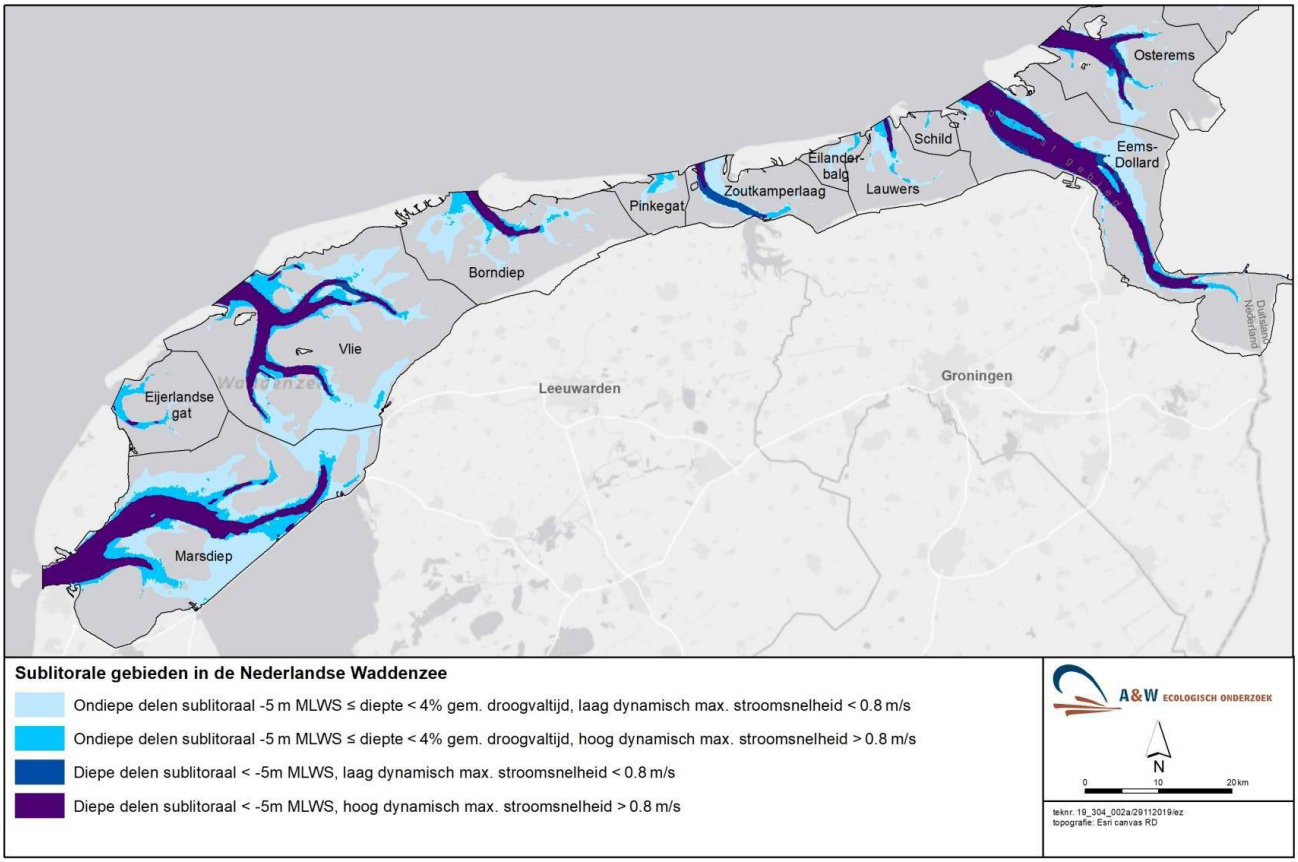
Dat maakt ook het vergelijken en beoordelen van onderzoeksresultaten complex. Om dit te vergemakkelijken maken we gebruik van de indeling van het sublitoraal in vier typen systemen:

- Laag dynamisch ondiep
- Laag dynamisch diep
- Hoog dynamisch ondiep
- Hoog dynamisch diep

Figuur 2-14 geeft weer wat de hoog- en laagdynamische gebieden in het sublitorale systeem zijn (een uitgebreidere ecotopenkaart, met ook zonering in dynamiek voor het litoraal, is recent gepubliceerd door Rijkswaterstaat, en is te vinden via: https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/2020/08/natuurwaarden-waddenzee-innovatief-gevisualiseerd.aspx).

De hoogdynamische gebieden zijn de zeegaten, de 'voordelta's', en de geulen in het systeem, laagdynamisch zijn de wantijen en de wadplaten en kwelders voor de kust. In §3.1 wordt de natuurlijke dynamiek van het systeem verder toegelicht.

In het resultaten hoofdstuk (H3) worden effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering beschreven, met (indien mogelijk uit de literatuur) daarbij vermeld het type systeem waarin de studie heeft plaats gevonden. Effecten laten zich per subsysteem hierdoor makkelijker vergelijken en beoordelen (H4).



Figuur 2-14. Sublitorale getijdenbekkens en hun hydrodynamische kenmerken in de Nederlandse Waddenzee (gebaseerd op Baptist et al. 2019). (MLWS = Mean Low Water Spring = de gemiddelde hoogte van laagwater tijdens springtij) (voor een ecotopenkaart van de gehele Waddenzee (sublitoraal, litoraal, supralitoraal en kwelder) zie recent verschenen: https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/2020/08/natuurwaarden-waddenzee-innovatief-gevisualiseerd.aspx).

2.6 Belangrijkste bevindingen

- In totaal zijn er voor deze review 210 bronnen geselecteerd en opgeslagen met relevante onderwerpen voor de huidige studie, waaronder 97 effectstudies, 6 meta-analyses, 21 modelstudies, 36 reviews en 53 bronnen vallende onder een andere categorie (d.w.z. beschrijvende studie, proefschrift, notitie, boek). Voor de 'evidence based' analyse zijn 60 studies geselecteerd (zie uitleg hierboven) op basis van onderwerp, impact factor, betrouwbaarheid en relevantie; waaronder 56 effectstudies, 2 meta-analyse en 2 modelstudies.

- Uit de inventarisatie van de beschikbare literatuur blijkt dat er te weinig studies met voldoende onderscheidend vermogen zijn gedaan in de Waddenzee om alleen voor dit gebied een gedegen vergelijking van natuurlijke bodemdynamiek vs. menselijke bodemberoering te maken (zie ook figuur 2-8). Dat was op voorhand al enigszins verwacht. Het is om die reden dat ook de literatuur uit andere gebieden onderzocht is. Het betekent helaas wel dat wij een algemene vergelijking in deze review niet kunnen baseren op kennis die alleen over de Waddenzee gaat.

- Uit de inventarisatie van de beschikbare literatuur blijkt dat er geen vaste set van indicatoren is die in alle studies is bekeken. Doordat er in iedere studie weer andere indicatoren zijn gebruikt bestaat het risico dat er 'appels en peren' vergeleken worden.

- Door het gebruik van het afwegingskader met daarin een logische ordening van de indicatoren is het toch mogelijk om tot een beschrijving van effecten te komen op basis van de beschikbare literatuur. In het afwegingskader is speciale aandacht gegeven aan drie overkoepelende indicatoren: bodemschuifspanning, sensitiviteit en herstel.

- Er is een integrale overzichtkaart gemaakt waarin is aangegeven waar welke type menselijke bodemberoering in de Waddenzee optreden. Er zijn locaties waar tot 20 keer per jaar de bodem wordt beroerd.

- Er is een overzichtskaart gemaakt van de locatie van verschillende onderzoeken (uit door ons geanalyseerde bronnen) in de Waddenzee naar de effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering.

- Voor het vergelijken en beoordelen van resultaten is er een indeling gemaakt voor natuurlijke bodemdynamiek op basis van dynamiek en diepte.

3. Bodemberoering

In dit hoofdstuk worden de effecten van bodemberoering beschreven, zoals gevonden in onze literatuurstudie. Het hoofdstuk is opgedeeld in verschillende paragrafen. We beschrijven eerst de effecten van bodemberoering door systeemeigen dynamiek en door natuurlijke 'events'. Vervolgens wordt ingegaan op effecten van menselijke bodemberoerende activiteiten door omwoeling/schuring, extractie, bedekking en obstructie.

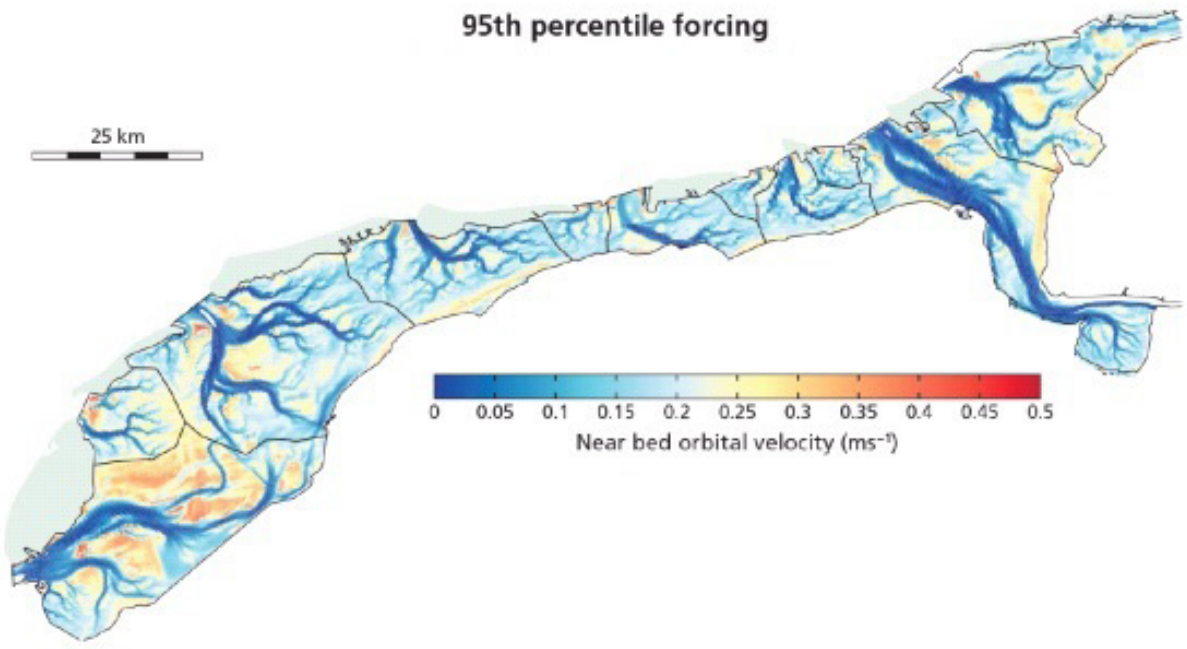
Voor de effectbeschrijving van menselijke bodemberoerende activiteiten zijn de resultaten kort samengevat volgens een vast stramien: (1) het type bodemberoering en voorkomen in tijd en ruimte, (2) wat de bodemberoering doet en welk deel van de bodem impact ondervindt, (3) hoeveel studies beschikbaar zijn en leemten in kennis, en (4) wat de belangrijkste resultaten zijn, opgesplitst in effecten op morfologie en effecten op biotiek. Aan het eind wordt de kennis verkort samengevat in een tabel naar het afwegingskader. Niet van elke type bodemberoering zijn evenveel studies beschikbaar, dus soms moet teruggegrepen worden op studies in estuariene gebieden en ondiepe zeeën elders op de wereld. Daarbij is in bijlage 5 beknopte informatie weergegeven over een aantal overige bodemberoerende activiteiten, te weten kokkelvisserij, Ensisvisserij en boomkorvisserij met wekkerkettingen. Deze activiteiten zijn meegenomen in de literatuuranalyse, maar niet in het hoofddocument beschreven omdat ze niet (meer) in het huidige sublitoraal van de Nederlandse Waddenzee voorkomen. De studies met betrekking tot deze 'overige bodemberoerende activiteiten' zijn wel belangrijke referenties over processen van sensitiviteit en herstel, en hoe beroering op grotere schaal/in diepere systemen plaatsvindt.

3.1 Effecten van bodemberoering door systeemeigen dynamiek

3.1.1 Golfwerking, stroming door getij, erosie en sedimentatie

Het getij, de stroming en golven onder invloed van weer en wind spelen een grote rol in het Waddensysteem. De getijdenamplitude varieert van 1.10 tot 1.90 m in de westelijke Waddenzee en 2.50 tot 3.60 m in de oostelijke Waddenzee. De waterstanden zijn eveneens afhankelijk van wind vanaf de Noordzee. In het algemeen geldt dat de stroomsnelheden door getij in de geulen bij de zeegaten hoger zijn dan elders en deze gebieden dus hoger dynamisch zijn.

De gemodelleerde stroomsnelheid door golfslag, bij bijvoorbeeld storm, nabij de bodem (uitgedrukt in orbitaalsnelheid) is juist het grootst in ondiepere delen (zie figuur 3-1). De ruimtelijke variatie van orbitaalsnelheid wordt bepaald door kenmerken van de inkomende golf en de afzwakking daarvan in de richting van het vaste land. De snelheid waarmee afzwakking / demping van de golf optreedt wordt bepaald door de waterdiepte en de hoeveelheid wrijving van de golf met het bodemoppervlak. De golfkracht in de Nederlandse Waddenzee wordt sterk gestuurd door het effect van wind op het wateroppervlak. De westelijke Waddenzee is meer blootgesteld aan de heersende zuidwestelijke windrichting, terwijl het oostelijk deel van de Waddenzee meer is blootgesteld aan minder vaak voorkomende westelijke- en noordwestelijke windrichtingen. Over het algemeen wordt het westelijk deel van de Waddenzee blootgesteld aan grotere golfkrachten dan het oostelijk deel, veroorzaakt doordat in de westelijke Waddenzee de bodem gemiddeld lager ligt, de strijklengte voor de wind in het algemeen groter is en golven minder gebroken worden. In het oostelijk deel zijn de getijdegeulen kleiner en ligt de bodem ondieper, waarbij de groei van golven wordt gelimiteerd (Donker 2015).



Figuur 3-1. De golfwerking nabij de bodem (uitgedrukt in 95e percentiel orbitaalsnelheid) in de Nederlandse Waddenzee voor de periode 1991-2013 (Donker 2015).

Morfologie

In tegenstelling tot het litorale deel van de Waddenzee is relatief weinig systematisch onderzoek gedaan in het sublitorale deel van de Waddenzee. Specifieke morfologische en hydrodynamische gegevens op kleine schaal zijn schaars. Regelmatig wordt daarom gebruik gemaakt van modellen om abiotische condities zoals, sediment, saliniteit, hydrodynamiek (droogligduur, bodemschuifspanning, stroomsnelheid) en morfodynamiek (sedimentatie en erosie) in de sublitorale Waddenzee te analyseren zoals met het driedimensionale GETM-GOTM model Dutch Wadden Sea (Elias et al. 2012; Duran-Matute et al. 2014; Christianen et al. 2015; Gräwe et al. 2016; Baptist et al. 2016; Baptist et al. 2019).

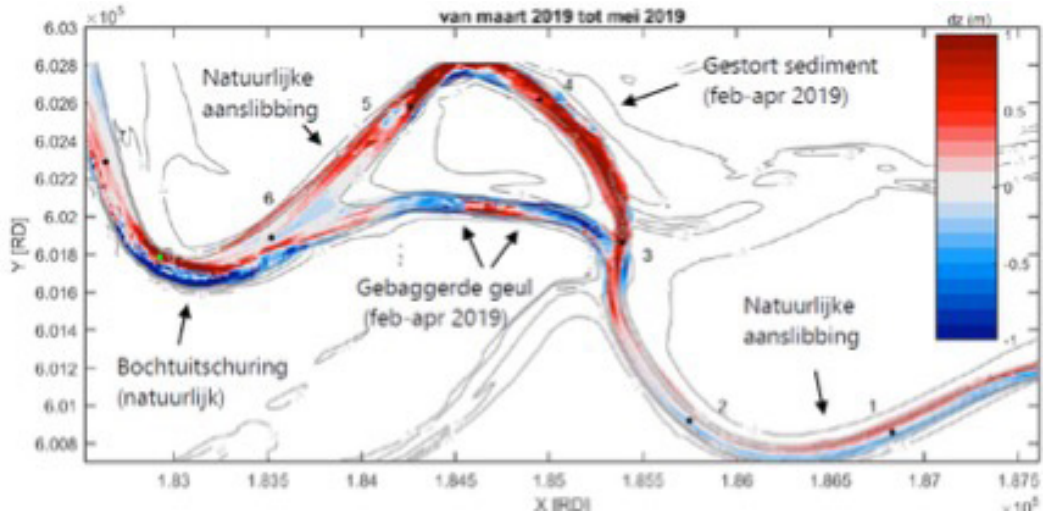
De belangrijkste resultaten uit de literatuur tonen aan dat door de hoge dynamiek van golven en getijdestromingen het onderwaterlandschap van de buitendelta's en zeegaten voortdurend verandert. Er is onder invloed van de verschillen in stroomsnelheden veel afwisseling in sedimentsamenstelling. In de beschutte geulen met lagere stroomsnelheden richting het wantij, bezinkt slib waardoor het onderwaterlandschap ook verandert, hetzij minder snel dan in de zeegaten. In deze gebieden is de golfslag in geulen vaak al geremd door voorliggende platen.

Korrelgrootte en slibgehalte in de geulen bepalen welke stroomsnelheden het sediment aankan voordat het in transport raakt (kritische bodemschuifspanning). Er is nog niet veel literatuur beschikbaar over het effect van slib op de kritische schuifspanning in slib-zandmengsels. Recent heeft WaterProof BV (Perk 2019) onderzoek gedaan naar het effect van de verdeling tussen slib en zanddeeltjes op de kritische bodemschuifspanning van sediment uit de Waddenzee (Holwerd; nader onderzoek is nodig om te onderzoeken of dit geldt voor alle delen van de Waddenzee). Daaruit volgt dat:

- Zand (zonder slib) in beweging komt bij circa 0,3 – 0,4 m/s
- Slib (zonder zand), afhankelijk van de dichtheid in beweging komt bij circa 0,3 – 0,4 m/s
- Mengsels (slib + zand) bij een zandpercentage van 30-50% het sterkste zijn en begin van bewegen pas optreedt bij 0,8 – 1,2 m/s.

Dit betekent dus dat een mengsel van zand en slib een stabiliserende werking heeft op de bodem en bij een hogere druk op de bodem pas in beweging komt (in tegenstelling tot alleen slib of alleen zand). Wanneer er door bodemberoering (natuurlijk of menselijk) iets verandert in sedimentsamenstelling (bijvoorbeeld minder slib, meer zandig sediment blijft achter na beroering) kan dat (destabiliserende) gevolgen hebben met meer sedimentbewegingen tot gevolg.

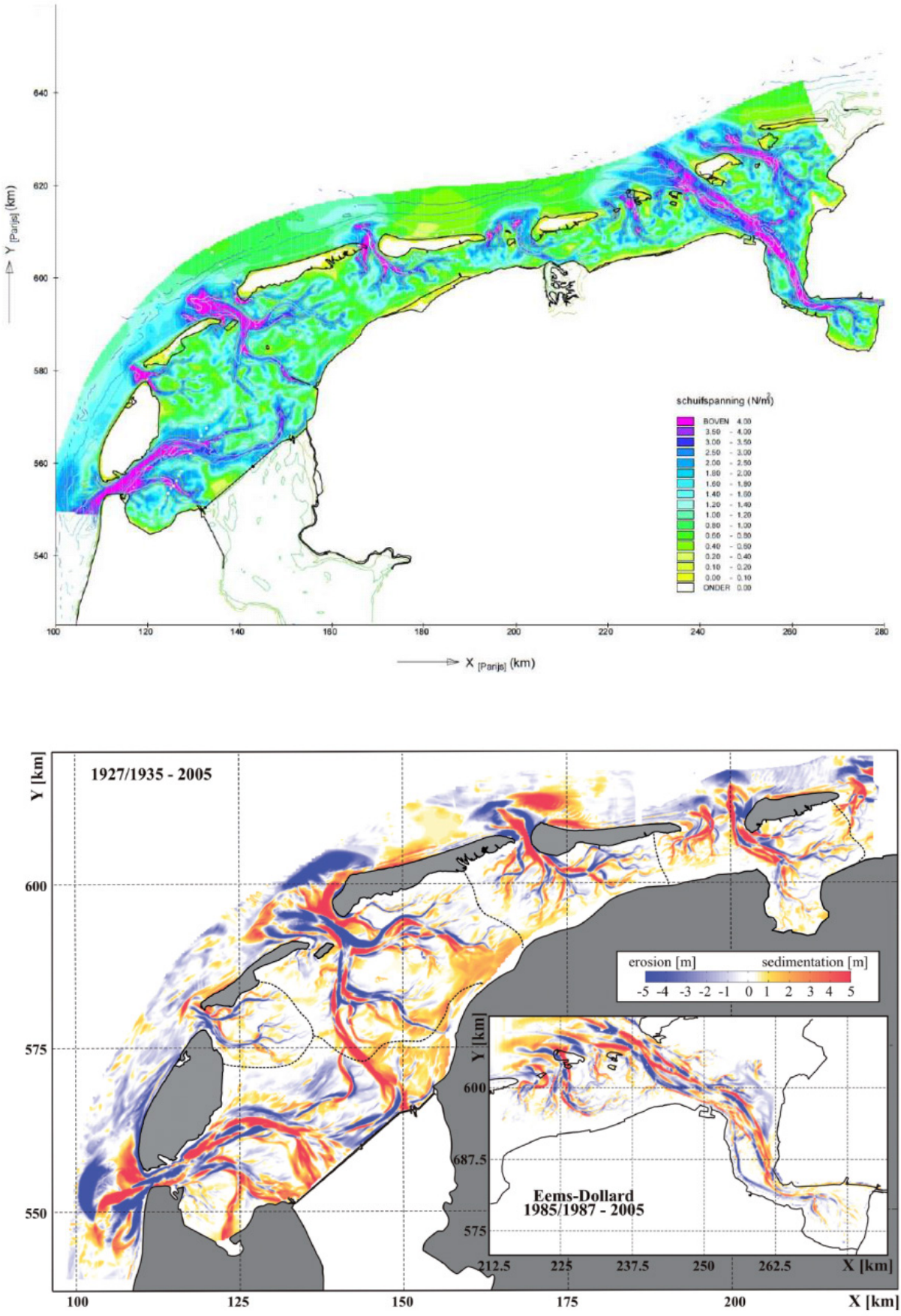
Geuldimensies in het sublitoraal zijn een functie van de hoeveelheid water die door de geul stroomt. Wanneer het getijprisma in een geul groter wordt, nemen de stroomsnelheden toe en gaat de geul over het algemeen uitschuren (Perk 2019). Wanneer het getijprisma afneemt, nemen de snelheden af en zal de geul meer willen aanzanden (Perk 2019). Over het algemeen treden de hoogste stroomsnelheden in de buitenbocht op waardoor deze wil uitschuren (meanderen). In de tijd wordt de loop van de geul daardoor bochtiger. Bij morfologische veranderingen kunnen bocht uitschuring en -aanslibbing snel gaan, met bodemhoogteverschillen variërend tussen -1 tot +1 m in drie maanden (figuur 3-2). Grosso modo is dit proces in zandige geulen in evenwicht bij een maximale stroomsnelheid van ca. 1,0 m/s, dat wil zeggen dat de geulen in het algemeen dimensies aannemen die ervoor zorgen dat de maximale stroomsnelheid tijdens eb en vloed ca 1,0 m/s bedraagt. Hogere snelheden worden ook gemeten, bv. in de zeegaten Marsdiep, Vlie en Ranselgat van resp. 2.3, 1.9 en 1.8 m/s (RWS 1989) en treden vaak op wanneer de geul gefixeerd is (door dammen/dijken niet breder kan worden).



Figuur 3-2. Voorbeeld van bodemverandering gedurende 3 maanden, direct na aanleg van de bochtafsnijding in de vaargeul Holwerd – Ameland (figuur afkomstig van WaterProof BV; NB. het gaat hier om veranderingen in een verstoord systeem).

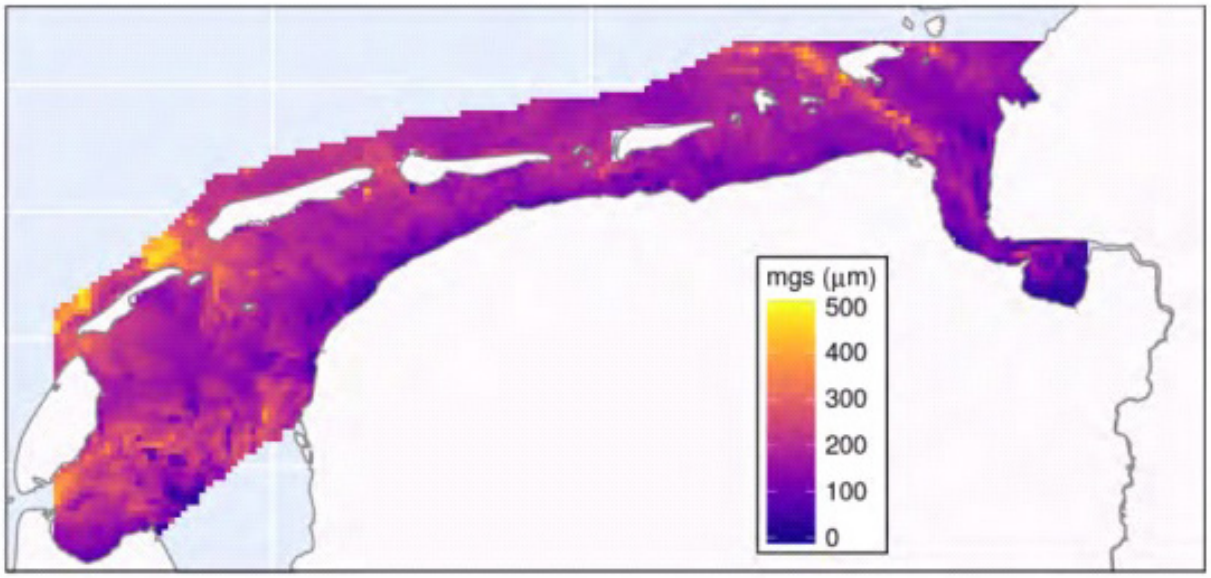
Bij de hoge stroomsnelheden die bijv. gemeten zijn in Marsdiep, Vlie en Ranselgat is er continue beweging van zand en/of slib. Voor de geulen is een maximale bodemschuifspanning tot 4 N/m2 gemodelleerd. In figuur 3-3 is een kaart opgenomen van de Waddenzee met een overzicht van de gemodelleerde (stroming gerelateerde) bodemschuifspanning, gebaseerd op natuurlijke parameters (Kater et al. 2010, via Gotje et al. 2016). In figuur 3-3 is te zien dat de (getijstroom gerelateerde) bodemschuifspanning in de diepe dynamische geulen het hoogst is. Er is in feite een constante omwoeling van de bovenste bodemlaag door getijstroom. Bij stormen (incidenteel; niet in de figuur weergegeven) is de bodemschuifspanning op ondiepe platen juist erg hoog, wanneer de golven op de platen breken.

De bodemruwheid in zachte bodems wordt bepaald door de mediane korrelgrootte van het sediment en bodempatronen zoals zandgolven, ribbels en biogene structuren. Door een analyse van Elias et al. (2012), van de bathymetrie van de Waddenzee over verschillende periodes, is een indruk verkregen over de netto sedimentatie en erosie van het Waddensysteem. Vooral in het westelijke deel van het sublitoraal hebben over de periode van 1927/1935 - 2005 grote veranderingen plaatsgevonden door de afsluiting van de Zuiderzee (Figuur 3-3). Zo zijn grote geulen in de getijdendelta van positie veranderd en verdiept met structurele erosie en terugtrekking van de kustlijn tot gevolg. In de voormalige geulen richting de Zuiderzee is veel sediment geaccumuleerd (meer dan 400 miljoen m3) door verlaagde stroomsnelheden.

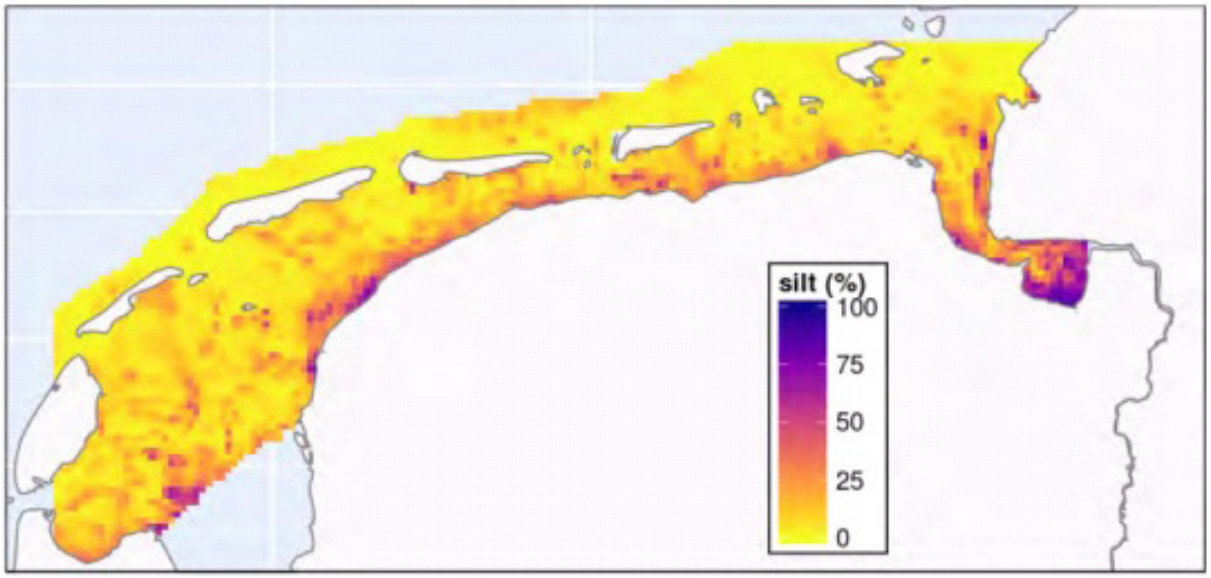


Figuur 3-3. Boven: (Getijstroom gerelateerde) bodemschuifspanning Waddenzee (Kater et al. 2010 via Gotje et al. 2016). Onder: sedimentatie-erosie kaart tussen 1927/1935 - 2005 (Eems-Dollard tussen 1985/1987 - 2005) (Elias et al. 2012).

De hydrodynamiek van het sublitoraal is bepalend voor de lokale korrelgrootte van het sediment en de sedimentatie en erosieprocessen. Door de hoge stroomsnelheid in de geulen (figuur 2-14), waar een hoge bodemschuifspanning is (figuur 3-3 bovenste afbeelding) en veel erosie/sedimentatie (figuur 3-3 onderste afbeelding), is het sediment hier grover en zandiger dan in de ondergedoken platen met lagere dynamische condities. Het grofste sediment slaat over het algemeen als eerste neer en bevat de laagste slibgehaltes (zie ook figuur 3-4; Folmer et al. 2017).



Mediane korrelgrootte, mgs (μm)



Slib gehalte (%)

Figuur 3-4. Gemodelleerde sediment eigenschappen in de Nederlandse Waddenzee (boven: mediane korrelgrootte; onder: slibgehalte; uit Folmer et al. 2017).

In laagdynamische gebieden is er juist sprake van een fijne fractie, voor wat betreft mediane korrelgrootte. Dat beeld wordt nog sterker wanneer we de hele gradiënt beschouwen van diepe zeegaten, geulen, zandige platen tot de slikkige wadplaten vlak voor de Friese kust of in de Dollard. De variatie in korrelgrootte in het sublitoraal loopt uiteen van circa 650 µm in de geulen bij de zeegaten in de westelijke Waddenzee tot circa 20 µm dicht bij de kust (Dekker & Drent 2013). Het slibgehalte van het sediment is het hoogst in deze gebieden voor de kust (zie figuur 3-4). De slibfractie bepaalt, zoals hierboven beschreven, de stabiliteit van sedimentkorrels en daarmee de stevigheid van gegraven gangen en andere benthische structuren. Het slibgehalte bepaalt ook mede het organisch gehalte en de nutriënt- en zuurstofgehaltes van het sediment (Herman et al. 2018). Daarmee beïnvloedt de fractie slib in het sediment de habitatkwaliteit voor sedimentbewonende (benthische) organismen. Ecologische processen (zoals benthische algengroei, vegetatieontwikkeling, ingraven en afzetting van feces door benthische organismen) beïnvloeden op hun beurt het slibgehalte van het sediment, en de stabiliteit van slibafzettingen op lange termijn. Het organisch stof gehalte is in de meest dynamische gebieden zeer laag (<1%) en is sterk gecorreleerd aan de mediane korrelgrootte (Van den Bogaart et al. 2019). In minder dynamische gebieden waar de sedimentsamenstelling relatief fijn is, is het organisch stofgehalte relatief hoog.

Samenvattend - morfologie

Er is weinig systematisch onderzoek gedaan in het sublitorale deel van de Waddenzee naar natuurlijke bodemberoering door golven en stroming. Specifieke morfologische en hydrodynamische gegevens op kleine schaal zijn schaars. Veel beschreven resultaten zijn gebaseerd op modellen. De belangrijkste resultaten tonen aan dat door de hoge dynamiek van golven en getijdestromingen het onderwaterlandschap van de buitendelta's en zeegaten voortdurend verandert. Korrelgrootte en slibgehalte zijn nauw verweven met de stabiliteit en erosiegevoeligheid van het systeem. In hoog dynamische geulen met hoge stroomsnelheden, en een grotere bodemschuifspanning, is er veel erosie/sedimentatie en is het sediment zandiger dan in gebieden met lagere dynamiek. In tabel 3-1 is deze samenhang tussen indicatoren en systeemeigenschappen nog eens weergegeven.

Tabel 3-1. Er is van nature samenhang tussen de indicatoren en systeemeigenschappen uit het afwegingskader (tabel 2-2). Deze samenhang is weergegeven in onderstaande tabel.

		Ondiep	Diep
Hoog Dynamisch	Bodemdynamiek (sedimentatie/erosie)	groot	heel groot
	Sedimenttype	zand	grof zand
	Organisch materiaal gehalte	beperkt	laag
	Bodemschuifspanning	hoog	hoog
	Biomassa	middel	laag
	Dichtheid	middel	laag
	Diversiteit/rijkdom	middel	laag
	Sensitiviteit	middel	laag
	Herstel	middel	snel
Laag Dynamisch	Bodemdynamiek (sedimentatie/erosie)	klein	klein
	Sedimenttype	slib/klei	zand/slib
	Organisch materiaal gehalte	hoog	beperkt
	Bodemschuifspanning	laag	beperkt
	Biomassa	hoog	middel
	Dichtheid	hoog	middel
	Diversiteit/rijkdom	hoog	middel
	Sensitiviteit	hoog	middel
	Herstel	lang	middel

Biotiek

Het uiteindelijke patroon in ruimte en tijd van systeemeigen dynamiek in termen van stroming, erosie en sedimentatie maakt het waddengebied en is ook bepalend voor de verspreiding en dichtheid van epi- en endobenthische gemeenschappen. Stroming, saliniteit (voor gegevens zoutgehalte Waddenzee, zie bijlage 2) en korrelgrootte van het sediment zijn bepalend voor het voorkomen van bepaalde bodemsoorten (Compton et al. 2013; Folmer et al. 2017, Blomert 2002, Zwarts et al. 2004). Daarnaast hebben veel bodemsoorten zelf ook invloed op hun omgeving, zoals sediment invangende zeegrassen, rifvormende schelpdieren en bioturberende wormen, ook wel bekend als 'biobouwers' (Bouma et al. 2009; Van Colen et al. 2009; Van der Heide et al. 2011).

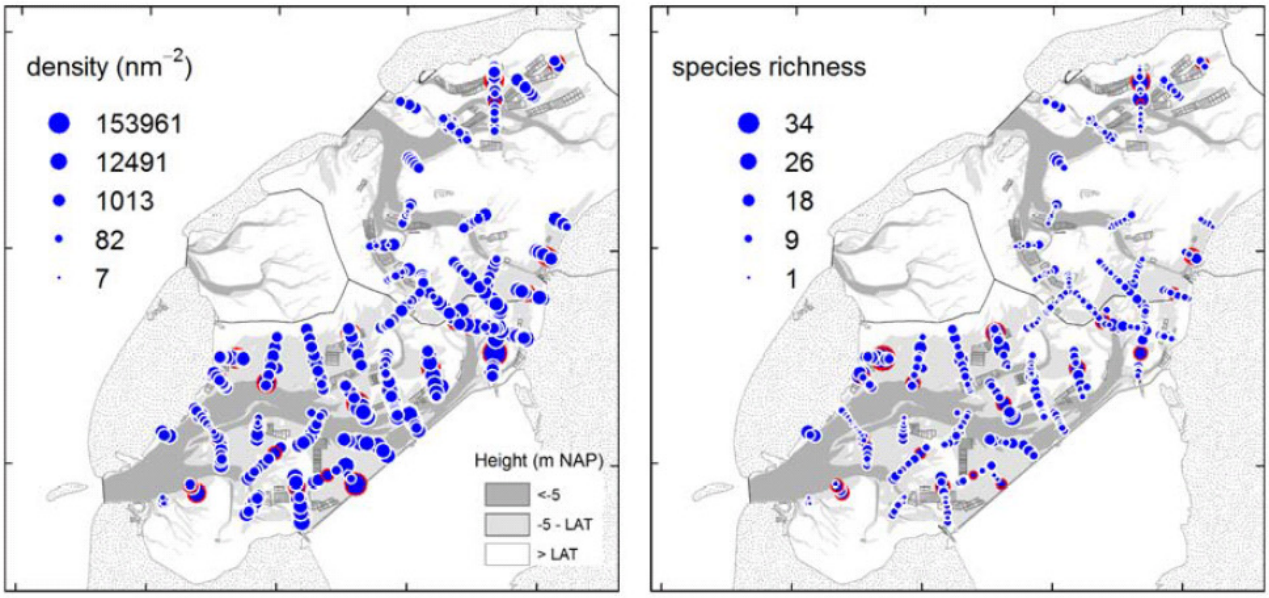
De benthische gemeenschap van hoog dynamische gebieden in het sublitorale deel van de Waddenzee zoals bijv. de zeegaten, is over het algemeen weinig divers (Vergouwen & Holzhauer 2016, van den Bogaart et al. 2019). In deze gebieden met grover sediment en waar golven het sediment regelmatig verstoren, komen voornamelijk kleine kreeftachtigen (o.a. Bathyporeia pelagica, Bathyporeia elegans en Gastrosaccus spinifer) en wormen (o.a. Nephtys cirrosa, Spio martinensis en Scolelepis bonnieri) voor die kenmerkend zijn voor dynamische kustgebieden (Vergouwen & Holzhauer 2016, Wijsman et al. 2018, van den Bogaart et al. 2019). Dit zijn kortlevende opportunistische soorten met een hoge reproductie en snelle verspreiding.

In minder dynamische gebieden waar de sedimentsamenstelling relatief fijn is en het organisch stofgehalte relatief hoog is er meer diversiteit en komen langlevende specialistische soorten voor. Het gaat hierbij om soorten als schelpkokerwormen Lanice conchilega en de schelpdieren Fabulina fabula en Limecola balthica.

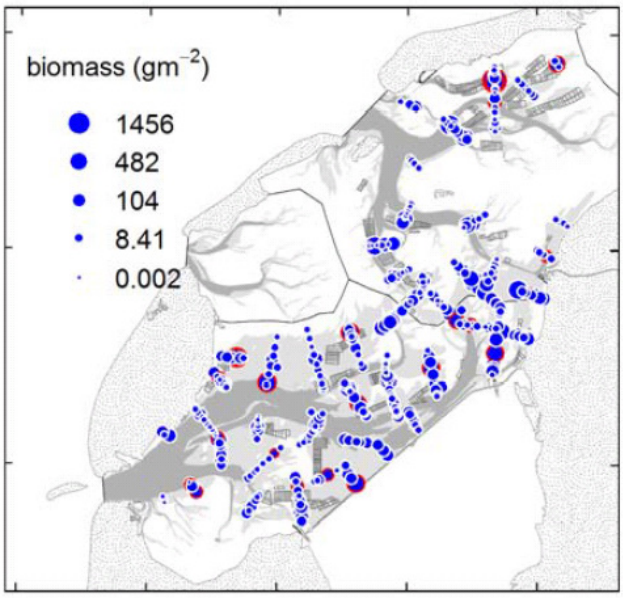
Het sublitoraal van de Nederlandse Waddenzee is (nog) niet uitgebreid bestudeerd wat betreft benthos (met uitzondering van mosselbanken en kweekpercelen). De laatste grote surveys dateren uit 1981/1982 en 2008, toen in het sublitoraal van de westelijke Waddenzee (Marsdiep en Vlie) een benthos onderzoek is uitgevoerd (Dekker & Drent 2013). In 2008 zijn in totaal 100 macrobenthos soorten (>1mm) gevonden in de monsters, waarvan 26 soorten het grootste deel (98%) van de totale biomassa bepaalden. Recent heeft een eerste survey voor Waddenmozaïek plaatsgevonden (zie korte toelichting in H2 en in bijlage 3). Waddenmozaïek zal de komende jaren veel meer gegevens boven water halen om de onderwaternatuur van de Waddenzee in kaart te brengen (Holthuijsen 2019).

Dekker & Drent (2013) vonden duidelijke patronen in dichtheid, biomassa en soortenrijkdom, gerelateerd aan abiotiek en het voorkomen van mosselen/oesters. Van alle soorten tezamen werden de grootste dichtheden gevonden langs de zuidoostelijke oever van de geulen en afname van dichtheden richting de zeegaten (zie figuur 3-5). Dichtheden correleerden negatief met saliniteit (d.w.z. hoger zoutgehalte richting de zeegaten), diepte en stroomsnelheid waarbij het verband met saliniteit het sterkst was (zie voor gegevens over zoutgehalte Waddenzee bijlage 2).

De soortenrijkdom was twee keer hoger op locaties met mosselen, dan op locaties zonder mosselen, alsook in het noordelijke deel van het studiegebied dichterbij de zeegaten (zie figuur 3-5). Het zuidelijke deel van het Vlie en het wantij zijn relatief arm aan soorten bevonden door Dekker & Drent (2013). Op stationniveau was er een toename in soortenrijkdom tot een korrelgrootte rond de 200 µm waarna de rijkdom afnam met toenemende korrelgrootte. Eveneens nam soortenrijkdom af bij stroomsnelheden boven de 0.8 m/s en toenemende diepte (Dekker & Drent 2013). Dit is in lijn met variaties in dynamiek en sedimentsamenstelling van het gebied (zie ook tabel 3-1).



Figuur 3-5. Links: totale dichtheid van alle soorten gevonden soorten benthos samen; rechts: totale soortenrijkdom. Gegevens van de westelijke Waddenzee uit de herfst van 2008 (rood gekleurde symbolen geven aan dat er mosselen in het monster zaten) (uit: Dekker & Drent 2013).



Figuur 3-6. De totale biomassa van alle soorten gevonden soorten benthos samen. Gegevens van de westelijke Waddenzee uit de herfst van 2008 (rood gekleurde symbolen geven aan dat er mosselen in het monster zaten) (uit: Dekker & Drent 2013).

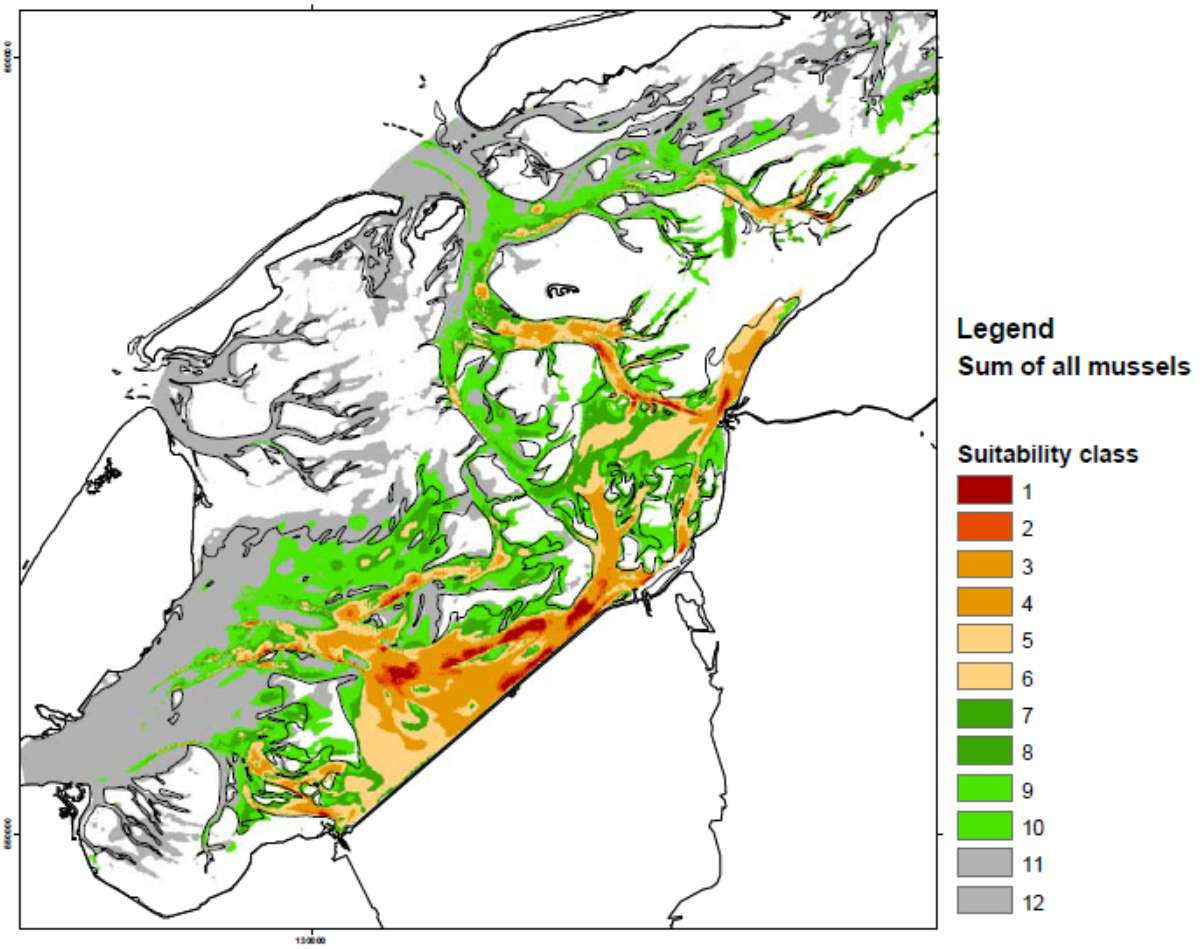
De totale biomassa van het sublitoraal in de Waddenzee lijkt gedomineerd door suspension-feeders (d.w.z. dieren die zwevende voedseldeeltjes uit het water vangen, zoals mosselen, oesters, Amerikaanse zwaardschede en strandgaper; Dekker & Drent 2013). Deze biomassa was relatief hoog langs het wantij en in stations met mosselen en laag in het centrale deel van het Marsdiep (zie figuur 3-6). De biomassa was zwak negatief gecorreleerd met toenemende saliniteit, diepte, stroomsnelheid en korrelgrootte.

De meest algemeen gevonden soorten in 2008 waren de wapenworm (Scoloplos armiger), de worm Spio martinensis, de behaarde glansworm (Aphelochaeta marioni) en de slangpier (Capitella capitata). Het grootste deel van de biomassa werd bepaald door de Amerikaanse zwaardschede (Ensis leei), strandgaper, mossel en Japanse oester. Hetgeen ook door Troost et al. (2019) is gevonden voor dit gebied, voor de periode 1992-2017. De hoogste dichtheden werden gemeten van de gewone groenworm (Marenzelleria viridis) het wadslakje (Peringia ulvae) en de behaarde glansworm (zie voor volledig overzicht Tabel bijlage 3). Nieuwe gegevens van Waddenmozaïek moeten uitwijzen hoe de huidige verspreiding van soorten er in het sublitoraal uit zien, ook voor de gehele Waddenzee.

Voor mosselen geldt dat de ontwikkeling en stabiliteit ook verband houdt met factoren als bodemeigenschappen, diepte, oriëntatie t.o.v. windrichting (welke bepalend zijn voor de kans dat mosselen wegstromen tijdens stormen), het zoutgehalte en de daaraan gerelateerde kans op predatie door zeesterren. In gebieden met een lager zoutgehalte is er minder predatie door zeesterren en een betere overleving van mosselen (Smaal et al. 2014). In deze gebieden is ook een grotere kans om meerjarige mosselen aan te treffen, waardoor deze gebieden als relatief stabiel worden aangeduid.

In 2005 is een stabiliteitskaart opgesteld (Alterra 2005), die met categorieën aangeeft welke gebieden stabiel en instabiel zijn voor mosselen, gebaseerd op bestandsopnamen en ervaringskennis van mosselkwekers. Deze kaart wordt o.m. gebruikt voor het opstellen van visplannen, waarbij in het najaar wordt gevist op nieuw gevormde banken die als relatief instabiel zijn beoordeeld. Smaal et al. (2014) hebben met nieuwe kennis een (kansen)kaart geconstrueerd met de relatieve geschiktheid van gebieden voor mosselbanken (zie figuur 3-7). Dit is gedaan op basis van een habitatmodel, met integratie van abiotische factoren die van belang zijn voor vestiging en overleving van mosselen: diepte, mediane korrelgrootte, golfwerking, stroomsnelheden en bodemschuifspanning, gemiddelde saliniteit en stormfrequenties (ontleend aan bestaande modellen en datasets). Een abiotische factor die moeilijk voorspelbaar is, maar in de praktijk van groot belang kan zijn, is het wegspoelen van mosselen tijdens stormen.

De kansenkaart geeft als meest kansrijke gebieden de gebieden dichtbij de Afsluitdijk (en zoetwater uitlaat) aan, en komt goed overeen met de werkelijke verspreiding van mosselen, maar er zijn ook duidelijke verschillen (Smaal et al. 2014). Bijvoorbeeld dat op locaties die als kansrijk zijn aangeduid in de praktijk geen mosselen voorkomen. Smaal et al. (2014) schrijven deze verschillen toe aan de predatie door zeesterren (die niet in het model is meegenomen). Het huidig bestand aan sublitorale mosselen is in het voorjaar van 2019 op areaal van 1740 ha geschat (Van Stralen 2019). Meer dan de helft van het totale areaal aan mosselbanken ligt in de voor visserij gesloten gebieden (zie figuur bijlage 3).



Figuur 3-7. Kansenkaart voor de totale sublitorale mosselvoorkomens in de Waddenzee. De klasse-indeling in de legenda geeft aan dat op locaties met klasse 1 de kans op voorkomen van mosselen bij de heersende abiotische condities het grootst is, en klasse 12 omvat daarin het minst goede deel van de Waddenzee (Smaal et al. 2014)

Samenvattend - biotiek

Er is nog veel onbekend over de verspreiding van benthossoorten. Vaak zijn de gegevens niet volledig of zijn er maar enkele indicatoren bekend, zoals benoemd in het afwegingskader (zie eind van deze paragraaf). Wat wel bekend is, is dat de verdeling van biota over het substraat een functie is van de dynamiek en de samenstelling van het substraat. Er is een duidelijk verband tussen het voorkomen van soorten en abiotische factoren als saliniteit, diepte, stroomsnelheid en korrelgrootte. Soorten die in de verschillende substraten en dynamische omstandigheden leven en daar thuishoren, zijn optimaal aangepast aan de heersende omstandigheden, in verschijningsvorm, ingraafdiepte, levenswijze, reproductiestrategie, herstelvermogen (kolonisatiesnelheid en –proces) en andere eigenschappen. In de hoog dynamische gebieden is de benthische gemeenschap weinig divers, en bestaat voornamelijk uit kortlevende, opportunistische soorten met een hoge reproductie en snelle verspreiding. In minder dynamische gebieden is er meer diversiteit en komen langlevende specialistische soorten voor.

Tabel 3-2. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van natuurlijke bodemdynamiek door golven en stroming, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst (zie voor referenties bijbehorende tekst in §3.1.1).

GOLVEN, STROMING				
Mate van invasie	Omwoelen, schuren (lichte beroering)			
Frequentie van beroering	Variabel			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Van ruimtelijk lokaal tot Waddenzeebreed			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)	Voortdurende verandering onderwaterlandschap	Klein	Groot	Klein (nagenoeg geen verandering)
Sedimenttype	Grof zand (tot 650 µm), continue beweging	Zand/slib	Zand	Slib/klei (vanaf 20 µm), bezinkt
Organisch materiaal gehalte	Beperkt (< 1%)	Beperkt	Beperkt	Hoog
Bodemschuifspanning	Hoog (tot 4 N/m^2)	Beperkt	Hoog	Laag (vanaf 0,1 N/m^2)
Biomassa	Laag	Middel	Middel	Hoog
Dichtheid	Laag	Middel	Middel	Hoog
Diversiteit/rijkdom	Laag (afname bij hogere stroomsnelheden)	Middel	Middel	Hoog
Sensitiviteit (kwetsbaar)	Laag, met kortlevende opportunistische soorten	Middel	Middel	Hoog, met langlevende specialistische soorten
Herstel	Snel	Middel	Middel	Lang

Kennisleemte: Systeemkennis ontbreekt van het sublitoraal van de Waddenzee of is (deels) aanwezig maar niet in samenhang bijeengebracht. Er is nog veel onbekend over de soortenverspreiding en over natuurlijke bodemberoering door golven/stroming.

Tabel 3-3. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van natuurlijke bodemdynamiek door erosie en sedimentatie, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst.

EROSIE-SEDIMENTATIE				
Mate van invasie	Bedekken, omwoelen, schuren (lichte beroering)			
Frequentie van beroering	Variabel			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Van ruimtelijk lokaal tot Waddenzeebreed			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)	Variërend van -1m tot +1m in drie maanden, uitschuring / aanslibbing	Klein	Groot	Klein (nagenoeg geen verandering)
Sedimenttype	Grof zand (tot 650 µm)	Zand/slib	Zand	Slib/klei (vanaf 20 µm)
Organisch materiaal gehalte	Beperkt (< 1%)	Beperkt	Beperkt	Hoog
Bodemschuifspanning	Hoog (tot 4 N/m^2)	Beperkt	Hoog	Laag (vanaf 0,1 N/m^2)
Biomassa	Laag	Middel	Middel	Hoog
Dichtheid	Laag	Middel	Middel	Hoog
Diversiteit/rijkdom	Laag	Middel	Middel	Hoog
Sensitiviteit (kwetsbaar)	Laag	Middel	Middel	Hoog
Herstel	Snel	Middel	Middel	Lang

Kennisleemte: Systeemkennis ontbreekt van het sublitoraal van de Waddenzee of is (deels) aanwezig maar niet in samenhang bijeengebracht. Er is nog veel onbekend over de soortenverspreiding en over natuurlijke bodemberoering door erosie/sedimentatie.

SAMENVATTING BEVINDINGEN - SYSTEEMEIGEN DYNAMIEK

Natuurlijke dynamiek bestaat uit veel verschillende facetten. Zo is er op dagelijkse schaal sprake van stroming door getij, met daarbij vaak ook door wind aangedreven golven. Deze natuurlijke vormen van dynamiek zijn sterk bepalend voor hoe het sublitoraal eruit ziet, maar ook vice versa (de abiotiek beïnvloedt de biotiek en de biotiek de abiotiek). Daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen hoog en laag dynamische gebieden, o.a. bepaald door de stroomsnelheid van het water in die delen, waarbij hoog dynamische gebieden overwegend diepere gebieden zijn. In de hoog dynamische gebieden is er sprake van een hogere bodemschuifspanning, grotere korrelgrootte van het sediment, lagere slibfractie en meer erosie.

Bodemdieren zijn aan hoog dynamische omstandigheden aangepast door o.a. hun verschijningsvorm (meer robuust) en levenswijze (snel reproducerend, korte levensduur). In termen van sensitiviteit en herstel leven hier dus soorten die laag gevoelig zijn voor verstoring en een korte hersteltijd hebben. In de hoog dynamische gebieden is de bodemdiergemeenschap daarbij weinig divers. In laag dynamische delen van het sublitoraal is een lage bodemschuifspanning aanwezig, een kleinere korrelgrootte, hogere slibfractie en vindt meer sedimentatie plaats. De bodemdiergemeenschap is meer divers en bestaat uit soorten die fragieler (sensitiever) kunnen zijn en een langere levensduur (langere hersteltijd) hebben.

3.2 Effecten van bodemberoering door natuurlijke 'events'

3.2.1 Storm

In tijd en ruimte is storm, een natuurlijk 'event', onvoorspelbaar en variabel qua voorkomen (meestal enkele keren per jaar). Van storm wordt gesproken bij windkracht 9 op de schaal van Beaufort (knmi.nl). Een storm gaat meestal vergezeld van zware tot zeer zware windstoten. Op zee zijn dan hoge golven te zien met volle, witte schuimstrepen. Langs de Waddenkust zijn ooit golven gemeten van 12 m hoog (knmi.nl). In de herfst en winter komen de zwaarste stormen voor. Het deel van de bodem dat onder water beroerd wordt door storm is onder andere afhankelijk van de diepte van het water en de kracht van de storm. Er is nog veel onduidelijk over wat zich tijdens stormen afspeelt op de zeebodem van de Waddenzee. Wat wel zichtbaar is, is bijvoorbeeld het massaal aanspoelen van bodemdieren zoals zeesterren op het strand (zie figuur 3-8 ter illustratie; NB. dit is het Noordzeestrand)

Morfologie

In deze literatuurstudie was het aantal bronnen over effecten van storm op de bodemmorfologie, schaars. Er is geen studie gevonden over de Waddenzee. Er is daarom gebruik gemaakt van een studie over sedimentatieprocessen, waarbij effecten van storm zijn gemeten, in de Oosterschelde, en internationale studies, waaronder één uit Brazilië (litoraal) en één uit de Baltische zee (sublitoraal). Studies over de directe effecten van storm zijn schaars.

De belangrijkste resultaten uit de gevonden bronnen tonen aan dat er met storm, naast door wind gedreven golven aan het oppervlak, sterke stromingen nabij de zeebodem aanwezig zijn. Deze stroming is van invloed op sedimenttransport, met name tijdens en vlak na een storm. Kohsiek et al. (1988) vonden op de Galgeplaat in de Oosterschelde dat het totale zandtransport in een vloed-eb cyclus tijdens een storm drie tot acht keer groter is, en dat het netto sediment transport voornamelijk het systeem uit ging. Het ging daarbij voornamelijk om het fijnere sediment (met kleinere korrelgrootte).



Figuur 3-8. Massaal aangespoelde zeesterren op het Noordzeestrand van Schiermonnikoog, februari 2020 (foto via Omrop Fryslân; M. Talsma)

De meest intense stormerosie treedt op tijdens doodtij, wanneer het verschil tussen hoog- en laagwater minimaal is. Tijdens springtij zijn de waterdieptes op het wad groter, waardoor de golfkracht op de rand van de plaat minder is, daarbij vindt er tijdens springtij juist sedimentatie plaats. Kohsiek et al. (1988) constateren dat de korrelgrootte en de sortering van oppervlakte sediment min of meer de gradiënten van de hydraulische energie in een systeem weerspiegelt.

Op litorale wadplaten in Brazilië was het sediment ruimtelijk meer homogeen verspreid na een periode van storm (hoge golfenergie), al was deze trend statistisch niet significant (Corte et al. 2017). Herkul et al. (2011) onderzochten het effect van fysieke verstoring op wadplaten in de Baltische zee door het verwijderen van 3 cm van het sediment om storm en ijsgang na te bootsen. Het organisch gehalte werd als sedimentparameter gemeten. Er bleek geen significant verschil te zijn in het organisch gehalte vergeleken met controle plots.

Biotiek

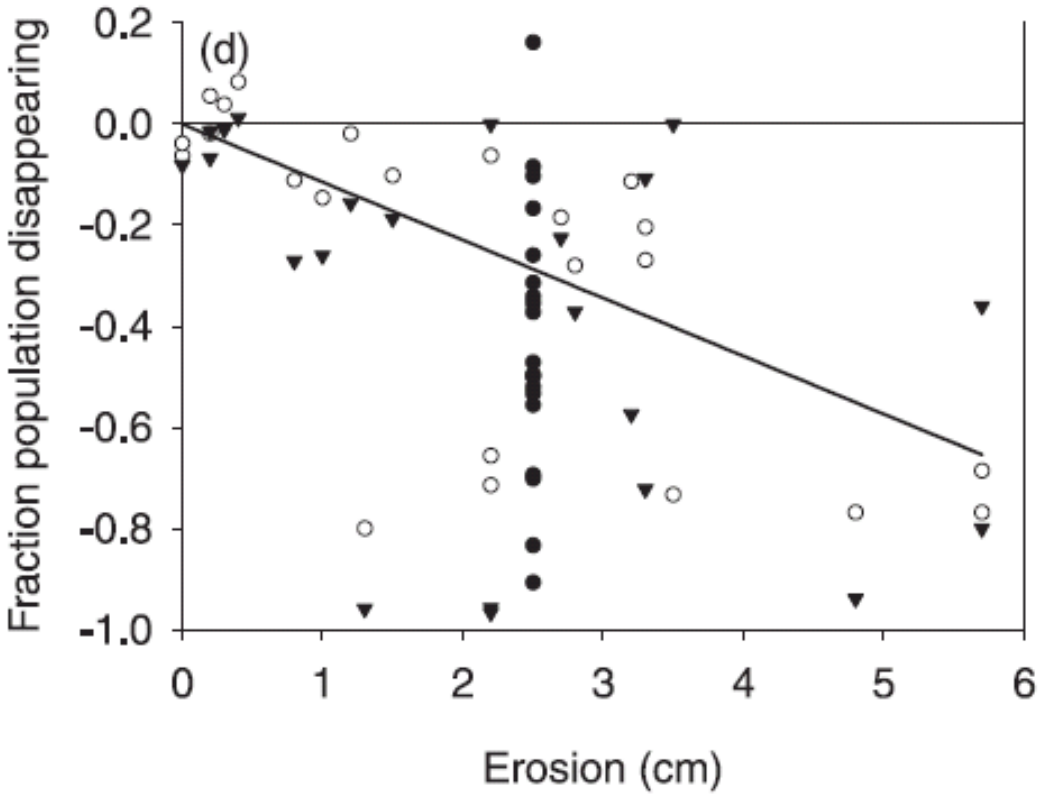
Er zijn drie studies geanalyseerd over effecten van storm op de biotiek, gesitueerd in de Waddenzee (litoraal), Baltische zee (sublitoraal) en Araca Bay, Brazilië (litoraal). Daarnaast is er een modelstudie van Hiddink et al. (2006) meegenomen. Omdat gegevens over effecten op sublitorale systemen schaars zijn, zijn resultaten van litorale studies meegenomen. De belangrijkste resultaten laten zien dat een storm met hoge golfslag een afname van mosselbedekking veroorzaakte (van 28%) bij droogvallende mosselbanken in de Waddenzee (Donker et al. 2015). Het effect van golfslag op mosselen hangt af van de lokale topografie. Mosselbanken die verhoogd waren, bijvoorbeeld als gevolg van eerdere opstuwing door ijsgang, lieten een hogere afname zien.

Voor schelpdieren, kreeftachtigen en borstelwormen, op droogvallende wadplaten in Brazilië, bleek de soortenrijkdom significant lager na een storm met hevige golfslag (Corte et al. 2017). Ook de dichtheid en biomassa waren lager voor schelpdieren en kreeftachtigen na een storm. Borstelwormen namen in aantallen toe na een storm (Corte et al. 2017;

Herkul et al. 2011). De grootte van een effect door storm op biotiek hangt onder andere af van het moment in het seizoen. Herkul et al. (2011) vonden in de Baltische zee, bij experimentele verwijdering van de toplaag van het sediment ter nabootsing van mogelijke stormeffecten, dat zowel de dichtheid als de biomassa van bodemfauna significant afnam direct na verstoring. Verstoring in het voorjaar had een groter effect op de bodemfauna dan verstoring in de zomer.

Sediment bewegingen, als gevolg van golfbeweging door wind en getij, kunnen een oorzaak zijn van sterfte onder bodemdieren en gevolgen hebben voor hogere trofische niveaus (modelstudie met data van de Noordzee, Hiddink et al. 2006). Het verband tussen sediment erosie en benthos sterfte is tegen elkaar uitgezet door Hiddink et al. (2006) (zie figuur 3-9). Het jaarlijks sterftecijfer als gevolg van sedimenterosie is gemodelleerd als erosie mortaliteit = 1 - (1- sterfte per storm)aantal stormen. Een storm werd door Hiddink et al. (2006) gedefinieerd als een gebeurtenis waar de significante golfhoogte meer dan 4 meter was. Hoe meer erosie, hoe groter de fractie van de populatie bodemdieren die verdween. Erosie is in figuur 3-9 weergegeven als gevolg van een orkaan, storm en sedimentbeweging als gevolg van getijstromen (waarbij er bij de laatste m.b.v. experimenteel onderzoek bij een bepaalde mate van erosie verschillende gevoeligheid bleek van de bodemdieren: sommigen spoelden weg, anderen kropen dieper in het sediment).

Indicatoren voor natuurlijk herstel zijn niet in alle studies beschreven. Herkul et al. (2011) beschrijven dat de soortensamenstelling van de bodemgemeenschap sneller herstelde dan de dichtheid en biomassa. Volledig herstel van de bodemfauna is niet vastgesteld, vanwege beperkte duur van de studie (enkele maanden). Droogvallende mosselbanken herstelden na beschadiging niet binnen de twee jaar van het onderzoek, door de combinatie van golven en ijsgang (Donker et al. 2015).



Figuur 3-9. De fractie van de populatie infauna die verdwijnt uitgezet tegen sediment erosie als gevolg van een orkaan (open cirkel), storm (zwarte driehoek) en sedimentbewegingen als gevolg van getijstroom (zwarte cirkel) (uit: Hiddink et al. 2006).

Tabel 3-4. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van natuurlijke bodemdynamiek door storm, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst (zie voor referenties bijbehorende tekst in §3.2.1).

STORM				
Mate van invasie	Van bedekken, omploegen tot schuren (matige beroering)			
Frequentie van beroering	Variabel (sporadisch)			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Waddenzeeschaal			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)	-	-	-	Sedimenttransport door verhoogde stroming
Sedimenttype	-	-	-	Fijner sediment verplaatst, grovere korrel blijft achter
Organisch materiaal gehalte	-	-	-	Geen verschil gevonden
Bodemschuifspanning	-	-	-	Hoog, wanneer golven op ondiepe platen breken
Biomassa	-	-	-	Afname voor schelpdieren/ kreeftachtigen
Dichtheid	-	-	-	Afname voor schelpdieren/ kreeftachtigen
Diversiteit/rijkdom	-	-	-	Afname voor schelpdieren/ kreeftachtigen
Sensitiviteit (kwetsbaar)	-	-	-	-
Herstel	-	-	-	> 2 jaar voor mosselbank

Kennisleemte: Er is geen gedocumenteerde kennis over effecten van storm op het sublitoraal van de Waddenzee (dit afwegingskader is ingevuld met informatie over het litoraal, internationale- of modelstudies).

= n.v.t. ; Morf. = morfologie; Bio. = biotiek; - = onbekend / geen gegevens

SAMENVATTING BEVINDINGEN - STORM

Storm is van invloed op de bodemmorfologie doordat sterke stroming nabij de zeebodem zorgt voor sedimenttransport (vele malen groter dan transport tijdens een vloed-eb cyclus). Met name het sediment met een kleinere korrelgrootte verplaatst / verdwijnt uit het systeem. Storm met hevige golfslag kan sterfte veroorzaken onder bodemdieren, met afname in dichtheid en biomassa van bodemfauna, waarbij het moment in het seizoen bepalend is voor het effect. Met name (ondieper) gelegen mosselbanken zijn gevoelig en herstel na afslag door storm kan jaren duren.

Specifieke kennis, in de vorm van kwantitatieve data, over (directe) effecten van storm op het sublitoraal van de Waddenzee ontbreekt.

3.2.2 IJsgang

In tijd en ruimte komt ijsgang in de Waddenzee met lage frequentie en lokaal voor. IJs op zee is een zeldzaamheid, zeker in de afgelopen decennia. Echter, in de ondiepe delen van de Waddenzee, met weinig golven kan het zoute water ook snel bevriezen. IJsvorming begint bij de zandbanken op het wantij en in de havens, waar het water rustiger is. Het deel van de bodem dat onder water wordt beroerd, is afhankelijk van vastvriezen van ijsschotsen aan de zeebodem bij laagwater. Als de ijsschotsen bij hoogwater weer beginnen te drijven kunnen ze stukken van de wadbodem meenemen, ook in de ondiepe delen van het sublitoraal.



Figuur 3-10. Kruiend ijs bij Zuidoost Lauwers, oostelijke Waddenzee (januari 2013) (foto door Lammert Kwant, wadgids.nl).

Morfologie

Er zijn in deze review vier studies geanalyseerd die effecten van ijsgang op de morfologie beschrijven, waarvan twee in de Waddenzee en twee internationaal (Bay of Fundy Canada en Golf van Riga Baltische Zee).

De belangrijkste resultaten hieruit zijn dat ijsformatie de morfologie van de, in dit onderzoek droogvallende, wadplaat in significante mate kan beïnvloeden door de creatie van microreliëf (ordegrootte 5-10 cm). Hierbij wordt sediment door het ijs opgehoopt en afgezet wanneer het ijs weer gaat smelten (Pejrup & Andersen 2000). Daarnaast kan ijsgang ook zorgen voor netto transport van sediment uit het intergetijdengebied naar de kwelder, waar het wordt ingevangen na smelten. Een ander effect van ijsgang op de morfologie werd onderzocht in de Eems-Dollard, met de focus op interactie tussen algengroei, troebelheid en ijsformatie. Er was vermindering van resuspensie van sediment na ijsbedekking (van 4-6 cm) door consolidatie van sediment (en hierdoor het verhogen van de kritische bodemschuifspanning voor erosie) en het verminderen van hoge golfslag (Staats et al. 2001). De concentratie zwevende deeltjes in de waterkolom werd hierdoor verlaagd en zorgde voor verhoging van het organisch gehalte in het sediment. Effecten van ijsgang zijn niet altijd aan te tonen; zo vonden Herkül et al. (2011) geen effect van fysieke verstoring op wadplaten in de Baltische zee. Ook Gerwing et al. (2015) vonden, na een winter met ijs in de baai van Fundy, geen verandering in het organisch gehalte van het sediment. Pejrup & Andersen (2000) beschrijven dat het door ijsgang afgezette sediment nog zichtbaar was 9 maanden na het smelten van het ijs.

Biotiek

Er zijn in deze bronnenanalyse vier studies geanalyseerd die effecten van ijsgang op de biotiek beschrijven, waarvan er twee in de Waddenzee plaatsvonden en twee internationaal (Bay of Fundy Canada en Golf van Riga Baltische Zee).

De belangrijkste resultaten laten zien dat mechanische verstoring door ijsgang (bedekking van 1-2 m) geen effect had op kokkels of strandgapers op droogvallende platen in het noordelijk deel van de Waddenzee. IJsgang zorgde wel voor een significante afname (- 60% tot - 70%) van het oppervlak van twee mosselbanken (Strasser et al. 2001). Ook Donker et al. (2015) vonden een afname (- 19%) van de mosselbedekking door ijsgang. Dit effect werd veroorzaakt door het schuren van de ijsbedekking door getijdenwerking, wind of golven. De grootste erosieplekken bevonden zich aan de randen van de mosselbank met eromheen een verhoging van samengedrukte mosselen. De combinatie van golfslag en ijsgang veroorzaakten een totale afname van de mosselbank van 39% na ruim twee jaar.

Voor wat betreft de infauna vonden Gerwing et al. (2015) in de baai van Fundy (Canada) slechts geringe veranderingen na een winter met ijsbedekking (van 35-90% en een schuurdiepte van 0.3-1.43 cm). Enkele soorten zoals de vlokreeft namen significant af, maar deze afnamen waren niet gecorreleerd aan ijsbedekking. De onderzoekers benoemen wel dat variabelen gerelateerd aan fysieke verstoring (zoals ijsgang en schuring door ijs) in meer strenge winters wel een invloed zouden kunnen hebben op de structuur van de bodemgemeenschap. Afgezien van effecten op zoöbenthos, vonden Staats et al. (2001) een verhoging van microfytobenthos op de wadplaten in de Eems-Dollard en een algenbloei in de waterkolom in het voorjaar. IJsbedekking had in dit geval een stabiliserende werking op het sediment, waardoor er minder sediment en zwevende deeltjes in de waterkolom aanwezig waren na het smelten van de ijsbedekking.

Indicatoren voor natuurlijk herstel worden gegeven door Donker et al. (2015), waar 19 maanden na beschadiging door ijsgang een minimaal herstel werd waargenomen van de mosselbedekking van 8.3%, welke echter weer teniet gedaan werd door een storm. De mosselbank was na ruim twee jaar (onderzoeksperiode) niet hersteld (Donker et al. 2015).

Tabel 3-4. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van natuurlijke bodemdynamiek door storm, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst (zie voor referenties bijbehorende tekst in §3.2.1).

IJSGANG				
Mate van invasie	Bodemschurend, extractie, bedekking			
Frequentie van beroering	Zeer lage frequente			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Lokaal			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)				Transport van sediment (door ophoping/afzetting), kan tot 9 mnd zichtbaar zijn
Sedimenttype				-
Organisch materiaal gehalte				Verhoging in sediment
Bodemschuifspanning				consolidatie van sediment zorgde voor verhoging kritische bodemschuifspanning
Biomassa				-
Dichtheid				Afname mosselbedekking (kokkels/strandgapers minder gevoelig)
Diversiteit/rijkdom				-
Sensitiviteit (kwetsbaar)				Mosselen zeer gevoelig voor ijsgang
Herstel				> 2 jaar voor mosselbank

Kennisleemte: Kennisleemte: kennis over effecten van ijsgang in ondiepe sublitorale systemen en het herstel is zeer schaars.

= n.v.t.; Morf. = morfologie; Bio. = biotiek; - = onbekend / geen gegevens

SAMENVATTING BEVINDINGEN - IJSGANG

IJsgang kan in ondiepe delen van het sublitoraal van invloed zijn op de bodemmorfologie, doordat sediment door ijs kan worden opgehoopt en afgezet. Consolidatie van sediment zorgt voor een verhoging van de kritische bodemschuifspanning. Van de bodemdieren zijn (droogvallende) mosselbanken erg gevoelig voor schuring door ijsbedekking, waarbij randen van de bank kunnen verdwijnen. Herstel duurt minimaal enkele jaren. Infauna lijkt minder gevoelig.

3.3 Effecten van bodemberoering door omwoeling/schuring (visserij)

3.3.1 Mosselzaadvisserij en –kweek

De mosselcultuur, waarbij mosselzaad afkomstig van natuurlijke wilde mosselbanken wordt opgekweekt voor consumptie, bestaat al meer dan 100 jaar. Hoewel de visserij al plaatsvond in de Waddenzee, zijn sinds 1950 naast Zeeuwse kweekpercelen ook kweekpercelen in het sublitorale deel van de Westelijke Waddenzee geplaatst. Bij mosselzaadvisserij wordt het mosselzaad traditioneel gevangen door met een schelpdierkor over natuurlijke mosselbanken te vissen in het voor- en najaar. De mosselkor glijdt of schraapt over de bodem, waardoor het mosselzaad in de kor terecht komt.
Het mosselzaad uit de volle kor wordt aan boord schoongespoeld van zand en slib. Het mosselzaad wordt vervolgens op kweekpercelen uitgezaaid (Capelle 2019). In 2008 is het mosselconvenant opgesteld voor een stapsgewijze verduurzaming van de mosselsector. Als gevolg hiervan wordt tegenwoordig steeds meer gebruik gemaakt van andere inwinmethodes zoals mosselzaadvanginstallaties (MZI's) in o.a. de sublitorale westelijke Waddenzee. Naast het gehele litoraal is 28% van de sublitorale mosselbanken gesloten voor bodemzaadvisserij.



Figuur 3-11. Het ophalen van mosselkorren na bevissing (Nederlands Mosselbureau, via vistikhetmaar.nl).

Mosselkweek bestaat uit het verplaatsen van mosselzaad naar kweekpercelen, onderhoud, oogsten en schoonvissen van percelen. Hierbij wordt eveneens de bodem oppervlakkig omgewoeld. In de westelijke Waddenzee ligt momenteel circa 7700 ha (7.7% van het sublitoraal) aan kweekpercelen (Smaal et al. 2013; Jansen & Capelle 2018; Van Stralen et al. 2019).

Morfologie

Er zijn voor deze review drie effectenstudies geanalyseerd over effecten van mosselzaadvisserij en -kweek op de bodemmorfologie, alle drie gesitueerd in de Waddenzee. De studie van Van Bemmelen et al. (2012) is onderdeel van het PRODUS onderzoek (PROject DUurzame Schelpdiercultuur) over de effecten van mosselzaadvisserij op natuurwaarden in sublitorale gebieden in de westelijke Waddenzee. Dit PRODUS onderzoek is beschreven in verschillende deelrapporten en een samenvattend eindrapport van Smaal et al. (2013). Jansen & Capelle (2018) beschrijven effecten van mosselkweek op sedimentdynamiek.

De belangrijkste resultaten tonen aan dat mosselzaadvisserij de bovenste sedimentlaag van de bodem schraapt. Dit leidt lokaal tot vertroebeling van het water. Van Bemmelen et al. (2012) vinden in het kader van het PRODUS onderzoek een afname van de slib- en kleifractie in het sediment van beviste gebieden, met name voor de wat zandiger gebieden. Op slibrijke locaties zijn geen effecten van mosselzaadvisserij op het sediment aangetoond (het omgewoelde en uitgespoelde sediment slaat snel weer neer). In de gebieden die gesloten waren voor mosselzaadvisserij werd juist een ophoping van slib gevonden, hetgeen wordt toegeschreven aan de aanwezigheid en activiteit van mosselen (Van Bemmelen et al. 2012). De driedimensionale structuur van de bodem is in het onderzoek van Smaal et al. (2013) in beeld gebracht met behulp van side-scan sonar, waarmee een 3D kaart gemaakt is met ruimtelijke patronen. De bodemstructuren op de sonarbeelden blijken sterk gecorreleerd met mosselbiomassa op de zeebodem. Na mosselzaadvisserij in het voorjaar is er een statistisch significante afname van driedimensionale structuur van de zeebodem te zien. Daar waar mosselen blijven liggen blijft de mate van bodemstructuur hoog (Smaal et al. 2013).

Effecten van mosselkweek op sedimentdynamiek rondom beviste zaadbanken en in de directe omgeving van mosselpercelen, blijken uit een toename van troebelheid in gebieden waar wordt gevist of geoogst (Jansen & Capelle 2018). De sedimentpluim blijft beperkt tot de directe omgeving van de mosselkweekactiviteit (d.w.z. enkele tientallen tot honderd meters); veel van het omgewoelde sediment valt direct weer op het perceel of de zaadbank neer. De mate van troebelheid op zaadbanken en percelen verschilt per gebied, hetgeen afhankelijk kan zijn van verschillende factoren, zoals visserijintensiteit, type activiteit (zaadvisserij versus oogst of schoonvissen), sediment type, diepte en/of stromingspatronen, wind en golfslag.

De hersteltijden van de bodemmorfologie na mosselzaadvisserij en -kweek zijn variabel van enkele minuten tot een jaar. Van Bemmelen et al. (2012) geven geen indicatie van de duur van afname van de slib- en kleifractie in het sediment. Smaal et al. (2013) vonden op langere termijn (een jaar na bevissing) geen waarneembare effecten van een afname van driedimensionale structuur van de zeebodem als gevolg van mosselzaadvisserij in het voorjaar. Jansen & Capelle (2018) vonden dat sedimentpluimen, die ontstaan bij mosselkweek, vrijwel direct na het staken van de oogstactiviteiten niet meer zijn waar te nemen.

Biotiek

Voor deze review zijn twee effectenstudies geanalyseerd: het PRODUS onderzoek over effecten van mosselzaadvisserij op sublitorale natuurwaarden in de westelijke Waddenzee, (beschreven in een samenvattend eindrapport van Smaal et al. 2013) en een studie van Capelle et al. (2017) over de effecten van mosselkweek op de biotiek.

De effecten van mosselzaadvisserij zijn in het PRODUS onderzoek onderzocht middels een BACI opzet, waarbij er een paarsgewijze vergelijking is gemaakt tussen controle gebieden (gesloten voor visserij) en impact gebieden (open voor visserij) met vakken die vóór en na visserij zijn bemonsterd (before - after - control - impact). Bij deze benadering wordt er expliciet rekening gehouden met de natuurlijke dynamiek (aangrenzende open en gesloten proefvakken in stabiele en instabiele gebieden) ter onderscheiding van het effect van visserij, zodat het toegevoegde effect van een menselijke activiteit zichtbaar wordt.

De effecten van mosselzaadvisserij op mosselzaadbanken zelf zijn niet zozeer een reductie van het areaal van de mosselbank, maar een uitdunning (d.w.z. verlaging dichtheden). Er blijft altijd een hoeveelheid mosselzaad achter (als minimale dichtheid voor lonende visserij en door gebruik van grofmazige netten; Smaal et al. 2013).

Op korte termijn, <1 tot 1,5 jaar na de voorjaarsvisserij in stabiele gebieden zijn er effecten van mosselzaadvisserij op de totale dichtheid, aantallen organismen en soortenrijkdom van bodemdieren (exclusief mosselen), deze parameters zijn statistisch significant lager in gebieden die open zijn voor mosselzaadvisserij dan in gesloten gebieden. Voor najaarsvisserij in instabiele gebieden werden deze verschillen niet gevonden. Direct na mosselzaadvisserij komen anemonen in statistisch significant lagere aantallen voor in gebieden open voor mosselzaadvisserij in vergelijking met gesloten gebieden (door beschadiging en/of opvissen met mosselen; Smaal et al. 2013). In het PRODUS onderzoek wordt de abundantie van zeeanemonen ook gebruikt als indicator voor verstoring (hetgeen aansluit bij de opgestelde sensitiviteitsmaat in §2.4.2 en figuur 2-10/2-11). Op de middellange termijn zijn er effecten van mosselzaadvisserij op soortendiversiteit (d.w.z. aantal soorten en Shannon-Wiener index).

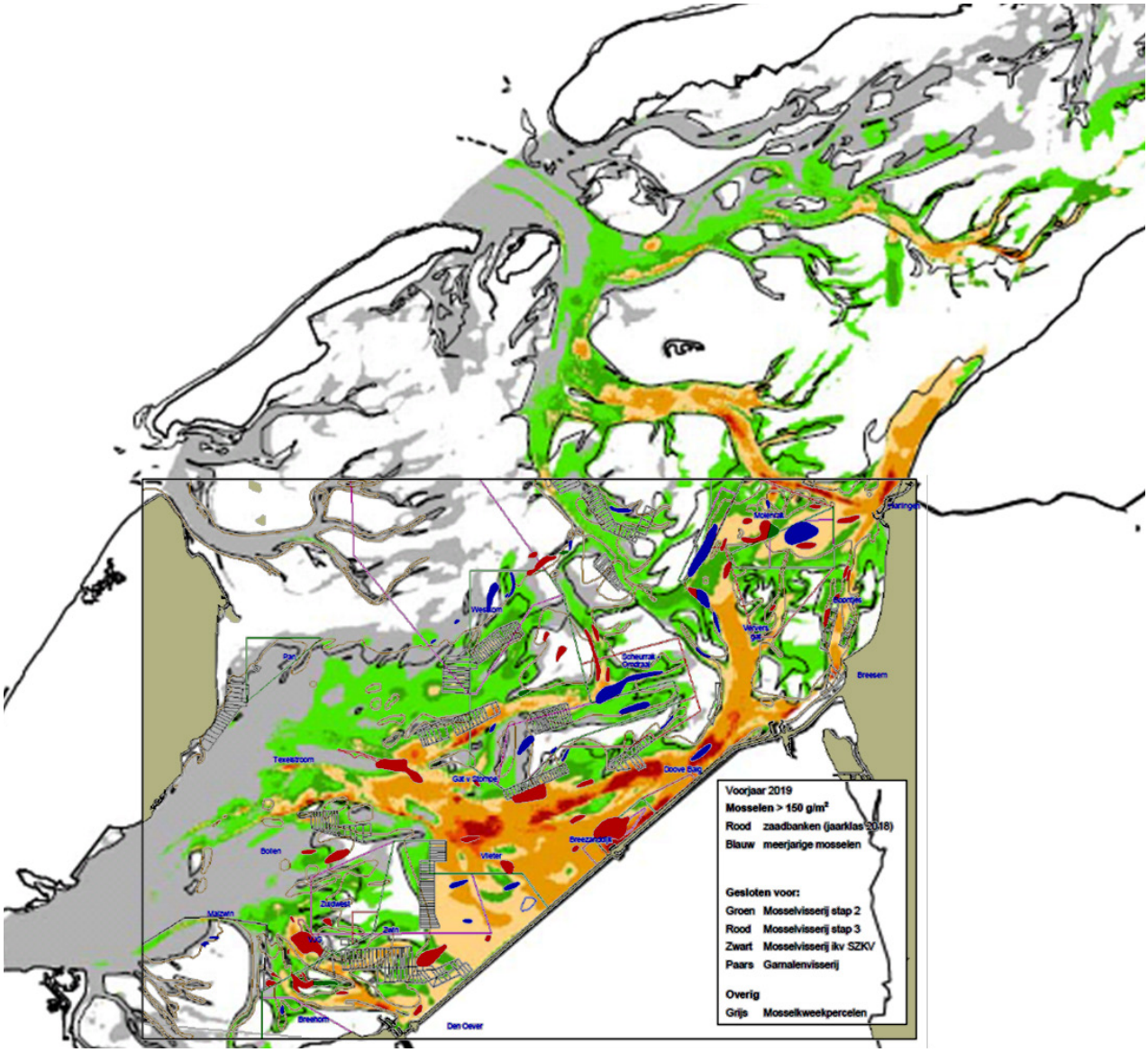
Stabiele en instabiele gebieden zijn in de PRODUS studie apart geanalyseerd (zie voor toelichting stabiele gebieden figuur 3-7 en begeleidende tekst), waarbij de stabiliteit van een gebied gedefinieerd wordt door de mate van lokale hydrodynamiek en de kans op predatie door zeesterren. De instabiele gebieden (over het algemeen de meer dynamische gebieden) worden in het najaar bevist, omdat dit locaties betreft waar de kans groot is dat mosselzaad door natuurlijke factoren, zoals predatie door zeesterren en storm zal verdwijnen in de winter. In het voorjaar mag ook in aangewezen stabiele gebieden worden gevist. Het blijkt dat in deze stabiele gebieden (met over het algemeen een lagere dynamiek) het verschil in biomassa van mosselen statistisch significant lager is in beviste gebieden vergeleken met gesloten gebieden, waarbij een verschil blijft bestaan tussen vakken tot drie jaar na visserij. Voor de instabiele locaties kon er na visserij geen significant verschil tussen beviste en onbeviste vakken worden aangetoond, waarbij geconcludeerd werd dat op deze locaties mosselen inderdaad relatief snel verdwijnen door natuurlijke omstandigheden (Smaal et al. 2013).

Het verschil in soortensamenstelling tussen beviste en onbeviste gebieden was groter na mosselzaadvisserij, vaak als logisch gevolg van hogere dichtheden mosselen in gesloten gebieden en geassocieerde hard substraat soorten (bv. zeepokken, anemonen en strandkrabben) en verschillende wormensoorten. In de totale ontwikkeling van de leefgemeenschap in beviste vakken treedt er verandering op van een door mosselen en mosselpredatoren gedomineerde gemeenschap, naar een waarin dat niet zo is (krabben, anemonen en Amerikaanse zwaardschede nemen significant af) (Smaal et al. 2013).

De belangrijkste resultaten uit het onderzoek van Capelle et al. (2017) naar effecten van mosselkweek wijzen erop dat kweekpercelen leiden tot een toename van mosselbiomassa in de Waddenzee. De kweek van mosselen, inclusief het gebruik van MZIs, heeft gedurende de periode 2004-2012 geleid tot gemiddeld 1,27 keer zoveel mosselen in de westelijke Waddenzee dan in een situatie zonder kweek, ondanks de oogst en afvoer van mosselen naar de Oosterschelde.
Dit wordt verklaard door een grotere overlevingskans van mosselen op kweekpercelen omdat de mosselkweker de bestanden onderhoudt: o.a. door zeesterren te verwijderen, de mosselen in de winter te verplaatsen naar stabiele percelen en het slib van de percelen te verwijderen nadat de mosselen zijn opgevist (Capelle et al., 2017). Uit de vergelijking van wilde banken open voor mosselzaadvisserij met kweekpercelen blijkt dat er op de kweekpercelen in totaal meer soorten zijn aangetroffen dan op wilde banken. Wilde banken en kweekpercelen vertonen duidelijke verschillen in soortensamenstelling, maar vormen beide een habitat voor een soortenrijke bodemdiergemeenschap.

Of er met de in gebruik name van een mosselperceel de kans op ontwikkeling van een natuurlijke wilde bank (op dezelfde locatie) wordt ontzegd is een vraag die gedeeltelijk kan worden beantwoord met de kennis die is opgedaan uit het PRODUS onderzoek (Smaal et al. 2013) en de kennis die bijeen is gebracht voor recente kennisvragen in het kader van de mosseltransitie (Jansen et al. 2019; Capelle & Wijsman 2019). Smaal et al. (2013) beschrijven dat de meeste kweekpercelen dichterbij de Noordzee zijn gelegen (met een hoger zoutgehalte en hogere voedselkwaliteit) in verhouding tot de ligging van natuurlijke wilde banken. Capelle & Wijsman (2019) definiëren dit nader en maken onderscheid tussen verschillende typen percelen: er zijn percelen die geschikt zijn om mosselzaad op te kweken (hoge overleving) en percelen die meer geschikt zijn om consumptiemosselen op te kweken (hoge groei). Daarbij verplaatsen mosselkwekers de mosselen voortdurend tussen percelen.

Wilde banken hebben een hogere overleving in gebieden met een lager zoutgehalte (vanwege de lagere aanwezigheid van de zeester - een mosselpredator), maar groeien minder snel door een bijkomende lagere voedselkwaliteit. Er lijkt dus een 'natuurlijke scheiding' tussen gebieden waar wilde mosselbanken zich vestigen en overleven, en waar kweekpercelen zijn aangelegd. Ter illustratie is hiervoor een combinatie gemaakt van de 'kansenkaart met relatieve geschiktheid van gebieden voor mosselbanken' (figuur 3.7) met een kaart van de 'ligging van recente bestanden mosselzaad en locaties van mosselkweekpercelen' (bijlage figuur 3.3; Van Stralen et al. 2019). Er valt op dat de zaadbanken (jaarklas 2018; rode gebieden) in de meest kansrijke gebieden (oranje) qua relatieve geschiktheid liggen (zie figuur 3.12). Terwijl de ligging van mosselkweekpercelen vooral ook in gebieden is die relatief minder geschikt worden geacht voor de ontwikkeling van mosselzaadbanken (groenere delen). Daarbij loopt er nog een onderzoek naar gebieden waar nieuwe percelen zijn voorzien, en of dit plekken zijn waar van nature veel (rifvormende) schelpdieren voorkomen (Jansen et al. 2019). Op basis van gegevens uit een inventarisatie in 2014 kan al wel geconcludeerd worden dat er geen rifvormende schelpdieren voorkomen op locaties die in dat jaar zijn geïnventariseerd (wel losse mosselen en oesters, maar geen dichtheden om als bank te kunnen worden geclassificeerd). Er loopt nog onderzoek naar gedetailleerde natuurtypering, die plaatsvindt na analyse van de T0 bemonstering.



Figuur 3-12. Combinatie van kansenkaart, mosselvoorkomens en ligging kweekpercelen (gebaseerd op Van Stralen et al. 2019). Blauwe contouren zijn meerjarige mosselbanken, rode contouren zijn zaadbanken (jaarklas 2018). Oranje gebieden duiden op een grotere kans op voorkomen van mosselen, groene gebieden geven de minst kansrijke delen aan.

De hersteltijden voor biotiek na mosselzaadvisserij zijn meer dan 2 jaar voor soortensamenstelling van de bodemgemeenschap (d.w.z. na twee jaar zijn er nog verschillen zichtbaar tussen open en gesloten vakken van de voorjaarsvisserij) (Smaal et al. 2013). Het PRODUS onderzoek toont aan dat op 3 van de 37 locaties aan het eind van de onderzoeksperiode (d.w.z. 6 jaar) nog sublitorale mosselbanken aanwezig waren, met een hogere mosseldichtheid op de niet-beviste vakken. Mosselbanken zijn dynamisch en verdwijnen ook door natuurlijke oorzaken. Langere termijn effecten (>6 jaar) zijn niet bestudeerd en daarom zijn hier geen uitspraken over te doen.

Tabel 3-6. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van menselijke bodemberoering door mosselzaadvisserij en -kweek, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst (zie voor referenties bijbehorende tekst in §3.3.1).Wanneer er in de tabel in een rij dezelfde bevindingen staan (verticale stippellijn) is geen onderscheid te maken tussen de verschillende vormen van dynamiek en diepte.

MOSSELZAADVISSERIJ en -KWEEK				
Mate van invasie	Bodemschuring, omwoeling (matige beroering)			
Frequentie van beroering	Seizoensgebonden (voor- en najaar)			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Ruimtelijk lokaal			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)	Lokale sedimentpluim	Lokale sedimentpluim	Lokale sedimentpluim	Lokale sedimentpluim
Sedimenttype	Afname slibfractie en 3D structuur bodem	Afname slibfractie en 3D structuur bodem	Afname slibfractie en 3D structuur bodem	Afname 3D structuur bodem
Organisch materiaal gehalte	-	-	-	-
Bodemschuifspanning	-	-	-	-
Biomassa	Geen duidelijk verschil tussen bevist en onbevist	Geen duidelijk verschil tussen bevist en onbevist	Geen duidelijk verschil tussen bevist en onbevist	Hogere mosselbiomassa in onbevist gebied
Dichtheid	Lagere dichtheid bodemdieren in beviste gebieden	Lagere dichtheid bodemdieren in beviste gebieden	Lagere dichtheid bodemdieren in beviste gebieden	Lagere dichtheid bodemdieren in beviste gebieden
Diversiteit/rijkdom	Lagere soortenrijkdom bodemdieren in beviste gebieden	Lagere soortenrijkdom bodemdieren in beviste gebieden	Lagere soortenrijkdom bodemdieren in beviste gebieden	Lagere soortenrijkdom bodemdieren in beviste gebieden
Sensitiviteit (kwetsbaar)	Anemonen	Anemonen	Anemonen	Anemonen
Herstel	Morf.: enkele minuten tot een jaar Bio.: > 2 jaar	Morf.: enkele minuten tot een jaar Bio.: > 2 jaar	Morf.: enkele minuten tot een jaar Bio.: > 2 jaar	Morf.: tot een jaar Bio.: > 2 jaar
Kennisleemte: kennis over effecten van ijsgang in ondiepe sublitorale systemen en het herstel is zeer schaars.				

= n.v.t.; Morf. = morfologie; Bio. = biotiek; - = onbekend / geen gegevens

SAMENVATTING BEVINDINGEN - MOSSELZAADVISSERIJ- EN KWEEK

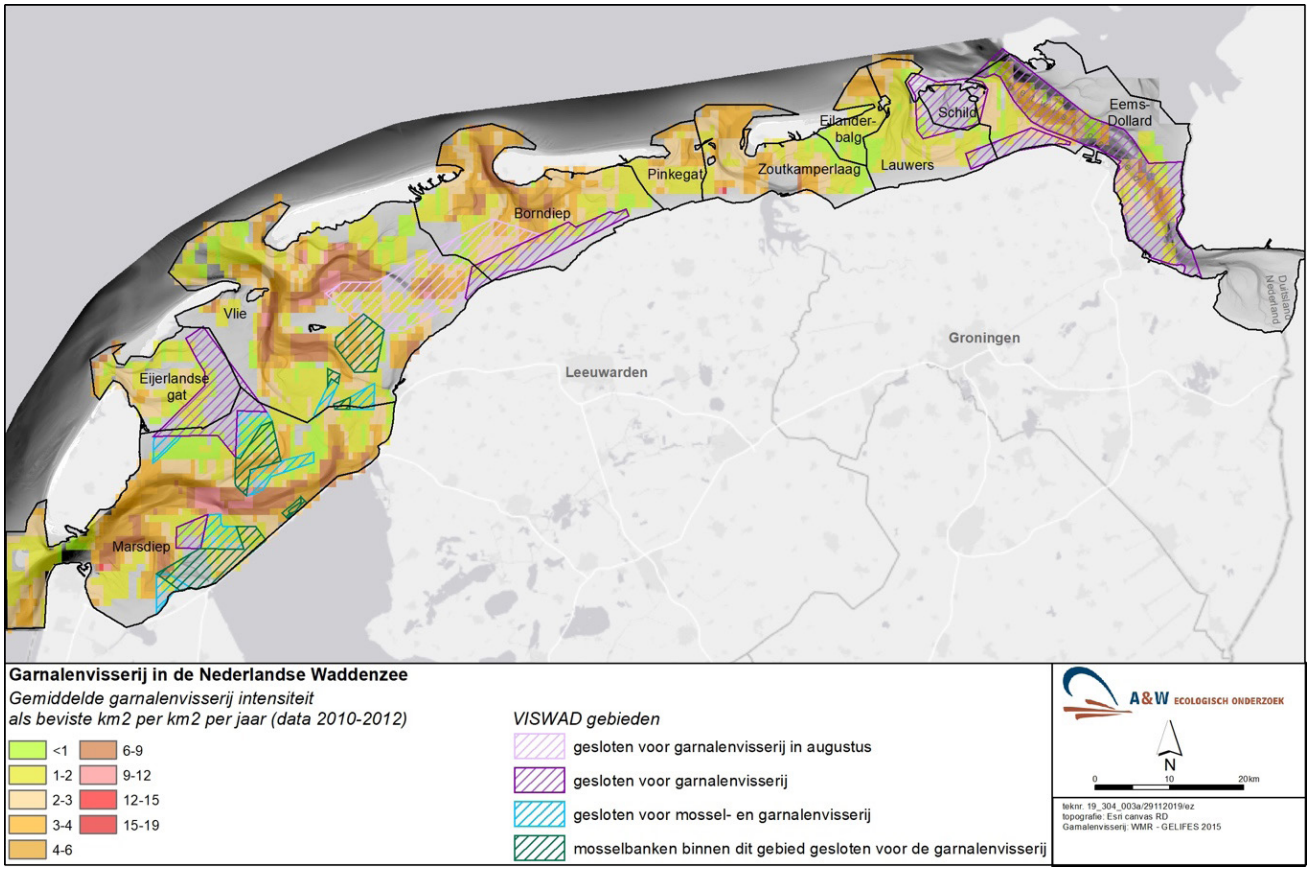
Bodemberoering door mosselzaadvisserij en -kweek leidt tot lokale vertroebeling van het water, waarbij er een afname is van de slib- en kleifractie in het sediment van met name zandiger gebieden. De driedimensionale structuur van de zeebodem, gecorreleerd aan mosselbiomassa, neemt af na mosselzaadvisserij. Hersteltijden zijn variabel van enkele minuten (sedimentpluim) tot een jaar (driedimensionale structuur van de zeebodem). Voor biotiek geldt dat er direct na mosselzaadvisserij in het voorjaar (d.w.z. in stabiele gebieden) een negatief effect is op de totale dichtheid, aantallen en soortenrijkdom van bodemdieren. De hersteltijden voor biotiek na mosselzaadvisserij zijn meer dan 2 jaar voor soortensamenstelling van de bodemgemeenschap (d.w.z. na twee jaar zijn er nog verschillen zichtbaar tussen open en gesloten vakken van de voorjaarsvisserij). Gevoelige soorten zijn met name aangehechte soorten zoals anemonen. Mosselbanken zijn dynamisch en verdwijnen ook door natuurlijke oorzaken. Langere termijn effecten (>6 jaar) zijn niet bestudeerd en daarom zijn hier geen uitspraken over te doen. Mosselkweek leidt tot een toename van mosselbiomassa (met geassocieerde benthossoorten) in de Waddenzee.

3.3.2 Garnalenvisserij

Sinds het eind van de 19e eeuw is de visserij op garnalen opgekomen. Met name het afgelopen decennium is de garnalenvisserij sterk toegenomen. Waar in een lang verleden garnalen nog gevangen werden met kleine sloepjes, zijn kotters in de Waddenzee (tot 300 pk) vandaag de dag uitgerust met een garnalentuig, met aan weerszijden van het schip een boom van 7m tot max. 9m per kant, en een klossenpees die over de zeebodem wordt getrokken. De klossenpees bestaat uit rollende rubberen klossen (zie figuur 3-13), die over de bodem rollen om de garnalen het net in te laten springen. De klossenpees zit vast aan de sloffen, die aan de uiteinden van het garnalentuig zitten. De boom aan de bovenkant van het tuig houdt het net open. Garnalenvisserij is jaarrond mogelijk, maar hangt wel samen met seizoen en weersomstandigheden, waarbij de Waddenzee in het najaar doorgaans intensiever wordt bevist dan in de rest van het jaar. Ruimtelijk bezien wordt er voornamelijk in het westelijke deel van de Waddenzee gevist en in de Noordzeekustzone. In 2014 is het garnalenconvenant (Viswad) gesloten voor de transitie naar een meer duurzame visserij, met maatregelen gericht op vermindering van bodemberoering en bijvangst. Hoewel bijna 15% (33.000 ha, zie figuur 3-14) van de gehele Waddenzee jaarrond gesloten is voor garnalenvisserij, waaronder 5,4% van het sublitoraal (5400 ha), worden delen meer dan 15 keer per jaar bevist. Daarbij vindt de hoogste visserij intensiteit plaats langs de diepe geulen in de westelijke Waddenzee en in de buitendelta's (zie figuur 3-14). Er zijn momenteel in totaal 89 vergunninghouders die op garnalen mogen vissen in de Waddenzee.



Figuur 3-13. Garnalentuig met stalen boom, die aan beide zijden door 'sloffen' wordt ondersteund, met aan de onderzijde van het net rubberen klossen die over de zeebodem rollen (foto door A. Rippen).



Figuur 3-14. Garnalenvisserij in de Nederlandse Waddenzee, met weergave van gesloten gebieden (data 2010-2012; WMR - GELIFES 2015).

Morfologie

Er zijn voor deze review drie studies geanalyseerd die effecten van garnalenvisserij op de morfologie beschrijven, waarvan één 'verkenning slibhuishouding Waddenzee', één modelstudie over de Waddenzee en één studie uit het Duitse deel van de Waddenzee.

De belangrijkste resultaten tonen aan dat van de menselijke activiteiten in de Waddenzee garnalenvisserij, samen met baggerwerkzaamheden, het grootste effect heeft op de slibbalans (Van Duren et al. 2015), maar dat het algehele effect op de morfologie van deze activiteiten relatief klein is. Een modelstudie van Van Kessel (2015) laat zien dat na bevissing door een garnalentuig de slibconcentratie in de bovenste waterlaag licht verhoogd is met 5%. Lokaal zou frequente bevissing kunnen leiden tot een wat slibarme bodem omdat dit steeds wordt opgewoeld door het vistuig (Van Duren et al. 2015). Ook Vorberg (2000) beschrijft de observatie van een sedimentpluim (zonder details over omvang / intensiteit), na passage van een garnalentuig in het Duitse deel van de Waddenzee. Middels beelden van een onderwatercamera was te zien dat wanneer de klossenpees het oppervlak van het rif aanraakte, de bovenste laag van het sediment werd opgewerveld.

Over de hersteltijd van effecten op de morfologie geven de geanalyseerde studies geen kwantitatief overzicht. Sedimentpluimen die ontstaan na opwerveling van sediment door passage van een garnalentuig lijken vaak lokaal en tijdelijk van aard.

Biotiek

Voor deze review zijn zeven effectenstudies geanalyseerd, welke gesitueerd waren in de volgende gebieden: Waddenzee (Nederlandse deel en Duitse deel), Noordzeekustzone, Voordelta, Golf van Biskaje (Frankrijk) en Golf van Mexico. Studies naar effecten van garnalenvisserij op het bodemleven in de Nederlandse Waddenzee of -kustzone zijn schaars. En experimentele studies die gebieden open en gesloten voor visserij (en/of met experimentele bevissing) vergelijken stuiten op moeilijkheden, zoals onbedoelde bevissing in gesloten gebieden (o.a. Schellekens et al. 2014; Tulp et al. 2020).

Tulp et al. (2020) hebben in onderzoek in de Waddenzee en Noordzeekustzone, middels gebieden open en gesloten voor garnalenvisserij, het korte- en middellange termijn effect van garnalenvisserij op de bodemgemeenschap onderzocht. Het onderzoek was tweeledig, en bestond enerzijds uit een onderdeel met BACI ontwerp (1) waarin werd gekeken naar de directe korte termijn effecten (d.w.z. acht weken) op de benthosgemeenschap na een enkele passage van een garnalentuig in 15 verschillende deelgebieden verdeeld over de gehele Noordzeekustzone en Waddenzee (om de natuurlijke variatie in substraat en waterdiepte te omvatten). Bij het tweede onderdeel (2) lag de focus op het bestuderen van de dosis-effect relatie tussen visserijintensiteit en de respons van de benthosgemeenschap. Daarbij werd een specifiek gebied uitgekozen, het Molenrak: een ondiep sublitoraal gebied in het westelijk deel van de Waddenzee, met lage natuurlijke dynamiek, een uniforme sedimentsamenstelling en een relatief soortenrijke bodemgemeenschap. Het oorspronkelijk geplande BACI-ontwerp (onderdeel 1) van het garnalenvisserij experiment van Tulp et al. (2020), kon door onbedoelde bevissing echter niet meer volgens de statistisch gepaarde opzet van het BACI experiment worden geanalyseerd. In plaats daarvan is de actuele visserij-intensiteit (middels AIS en radar gegevens) gecorreleerd aan bodemfauna parameters.

De belangrijkste resultaten uit dit onderzoek zijn:

(1) Directe korte termijn effecten in verschillende deelgebieden (Noordzeekustzone/Waddenzee)

- Er werd een negatief verband gevonden tussen visserijdruk en het aantal benthossoorten van voor en na bevissing (acht weken later), ongerelateerd aan dynamiek.
- Voor de parameters dichtheid en evenness (maat voor de verdeling van individuen over een soort) konden veranderingen in deze deelgebieden niet worden gerelateerd aan visserijdruk.

(2) Dosis-effect relatie benthosgemeenschap laag dynamisch systeem (Molenrak)

- In het gebied met lage natuurlijke dynamiek (Molenrak) werd een negatief verband gevonden tussen (hogere) visserijdruk en de verandering in evenness van voor bevissing, 10 weken later, en acht maanden later.
- De verandering (afname) in evenness wijst erop dat het relatieve aandeel van een individuele soort aan de totale dichtheid, veranderde als reactie op visserij. Bij een hoge evenness zijn er van de aanwezige soorten in een gebied evenveel individuen, terwijl er bij een lage evenness van een bepaalde soort veel individuen zijn en van andere soorten minder individuen (gemeenschap wordt eenvormiger).
- De gevonden verandering in evenness wordt toegeschreven aan het positieve verband (toename) van de Amerikaanse zwaardschede met visserijdruk. Dit wordt door de onderzoekers verklaard door de goede mobiliteit (en lagere gevoeligheid; zie ook §2.3.5) van deze tweekleppige waardoor deze snel nieuwe gebieden kan koloniseren, die verlaten zijn door andere soorten (vanwege verstoring, verwijdering of sterfte).
- In het laag dynamische Molenrak werd daarbij voor acht van de tien onderzochte meest voorkomende macrofauna soorten geen verschil waargenomen in de ontwikkeling gerelateerd aan visserijdruk.
- Voor de zakpijp (hoog gevoelig) en kokkel (gemiddeld gevoelig; zie ook §2.3.5) werd een negatieve relatie gevonden met visserijdruk in het laag dynamische Molenrak. De kokkel ontwikkelde zich in intensiever beviste gebieden minder hard (lagere toename) dan in onbeviste gebieden (Tulp et al. 2020).

Experimenteel onderzoek naar de mogelijke effecten van garnalenvisserij op het bodemleven in de Voordelta (2010-2012) laat geen duidelijke effecten op het bodemleven zien (Schellekens et al. 2014). Dit schrijven de onderzoekers ook hier toe aan (1) verstoring van het experiment door onbedoelde bevissing en (2) de hoge mate van ruimtelijke en temporele variatie van het bodemleven in de Voordelta (hoog dynamisch gebied). Er is daarbij gevonden dat de bodemdiergemeenschappen een duidelijke relatie laten zien met sedimentkarakteristieken en beschutting: hogere dichtheden oligochaeten, bloemdieren en brokkelsterren komen voor in beschutte gebieden met verhoogde slibgehaltes. Terwijl op de minder beschutte proefvakken meer zee-egels en Amerikaanse zwaardschedes werden gevonden. Verschillen (in biomassa, dichtheid, aantal soorten) tussen proefvakken, subvakken en meetmomenten bleken groter dan verschillen tussen beviste en controlegebieden. (3) Mogelijkerwijs zijn door de lange historie van bevissing in dit gebied al vele soorten verdwenen, waarbij overgebleven soorten door een sterke invloed van recruitment op de populatiedynamiek meer resistent zijn geworden tegen visserij.

Ook resultaten uit het Voordelta onderzoek in het kader van PMR NCV (Tulp et al. 2019), geven als belangrijkste uitkomst dat veranderingen in abiotiek (die zeer groot zijn geweest door de aanleg van de Maasvlakte in combinatie met de Deltawerken) belangrijker zijn voor de bodemdiergemeenschap dan visserijintensiteit. Zo blijken effecten van visserij lastig te kwantificeren in grofzandige dynamische gebieden, waar soorten leven die zijn aangepast aan deze omstandigheden (snel reproducerend en kort levend).

Directe effecten van garnalenvisserij op het bodemleven zijn moeilijk aan te tonen en studies naar lange termijn effecten en herstel zijn schaars. Twee studies die de resultaten van gebiedssluiting en herstel van bodemfauna in de Waddenzee beschrijven zijn Glorius et al. (2018) en Troost et al. (2018). Glorius et al. (2018) volgen de ontwikkeling van natuur in de oostelijke Waddenzee in een gebied dat sinds 2005 gesloten is voor bodemberoerende activiteiten (de geulen Schild en Boschwad), in vergelijking met geulen open voor visserij (Spruit en Zuidoost Lauwers). Doordat al voor sluiting is begonnen met bemonsteren kon een 'Before-After', 'Control-Impact' (BACI) analyse worden gedaan. In de loop der jaren is de monitoring uitgebreid en bodemberoerende activiteiten zijn in kaart gebracht (d.w.z. visserij-intensiteit van garnalenvisserij, de voornaamste menselijke activiteit in het gebied). De verwachting was dat in afwezigheid van bodemberoering, door menselijke activiteiten, de bodemfaunagemeenschap zich in de gesloten geulen zou kunnen ontwikkelen naar een rijkere gemeenschap met grotere en langer levende soorten, evenals biogene structuren.

De onderzoekers vonden 11 jaar na sluiting een verhoogde soortenrijkdom in het gesloten gebied Schild en subtiele veranderingen in de bodemdiersamenstelling (bv. verhoogde dominantie van schelpdieren zoals oudere kokkels en nonnetjes) in het gesloten gebied Boschwad. De schelpkokerworm (Lanice conchilega), een hoog gevoelige soort (zie §2.3.5), ontwikkelde zich in mindere mate in gebieden die open waren voor bodemberoerende visserij, ten opzichte van gesloten gebieden (Glorius et al. 2018). Verschillen in bodemfauna tussen de open en gesloten gebieden zijn met name zichtbaar in de meer beschutte delen van de gesloten gebieden. De sluiting heeft (nog) niet geleid tot de vorming van biogene structuren op de zeebodem. Onduidelijk is hoe het gebied zich in de toekomst zal ontwikkelen. De grote natuurlijke dynamiek (van storm en stroming) in de twee open geulen en de gesloten geul 'Schild' speelt een grote rol in (het uitblijven van) verdere ontwikkeling van de bodemdiergemeenschap (waarin effecten veroorzaakt door bodemberoerende visserij wegvallen). De gesloten geul Boschwad ligt meer beschut en kent een lagere natuurlijke dynamiek dan de andere gesloten geul Schild. Het is de verwachting dat de omstandigheden in Boschwad, in tegenstelling tot de meer turbulente omgeving van Schild, gunstiger zijn voor de vestiging en ontwikkeling van soorten die gevoelig zijn voor bodemberoering.

Troost et al. (2018) volgen ook de ontwikkeling van een aantal gesloten gebieden in de westelijke Waddenzee, die recenter (sinds 2014) gesloten zijn in het kader van het convenant mosseltransitie en VISWAD. De bodemfauna is in 2015, 2016 en 2017 gemonitord, om te onderzoeken of de bodemdieren zich in de gesloten gebieden anders ontwikkelen dan in de gebieden open voor visserij. De onderzoekers geven aan dat na een periode van drie jaar (nog) geen verschillen kunnen worden gevonden in ontwikkeling van bodemleven tussen gebieden open en gesloten voor garnalen- en mosselzaadvisserij. Ook in deze studie is mogelijk sprake van onbedoelde bevissing. Verschillen die wel zijn gevonden hangen samen met verschillen in biotiek en abiotiek tussen open en gesloten gebieden bij aanvang van de studie (d.w.z. gesloten gebieden zijn gericht gekozen op plaatsen met hoge natuurwaarden). Troost et al. (2018) benadrukken het belang van het vergelijken van ontwikkelingen in plaats van absolute verschillen, en ook van een ruimtelijk en temporeel referentiekader.

Effecten van garnalenvisserij op een Sabellaria-rif in de Duitse Waddenzee zijn beschreven door Vorberg (2000). Grote schade aan de constructie van het rif zelf na passage van het garnalentuig kon niet worden vastgesteld, al konden er bij laagwater wel sporen worden waargenomen van de slof/schoen van het garnalentuig, waar contact was geweest met de bovenste delen van het rif (onduidelijk is of het net gevuld was tijdens het onderzoek en of het over de bodem sleepte of niet). Echter door de bouwende eigenschappen van de worm waren de sporen van het vistuig enkele dagen later weer verdwenen. Het snelle herstellende vermogen van het rif werd bevestigd door experimentele beschadiging van het Sabellaria rif (d.w.z. er werd 2 cm van het oppervlak afgeknipt), dat er binnen enkele dagen, door aangroei, weer zo uit zag als het onverstoorde rif.

Effecten van garnalenvisserij kunnen ook afhankelijk zijn van het type bodemhabitat, zoals beschreven door Wells et al. (2008) voor de Golf van Mexico (zand vs. schelp habitat). De meer complexe habitats (zoals die met schelp structuren) kunnen gevoeliger zijn voor de effecten van visserijactiviteit. In gebied met schelpstructuren werd een hogere diversiteit en soortenrijkdom aan bodemdieren gevonden in onbeviste gebieden (in vergelijking met beviste gebieden). In deze gebieden in Mexico met een zandige bodem was er een hogere diversiteit en soortenrijkdom in de beviste gebieden (in vergelijking met onbeviste gebieden). De bevinding dat bodemgemeenschappen van zandige zeebodems veerkrachtiger / meer bestand zijn tegen verstorende gebeurtenissen wordt ook door andere onderzoeken bevestigd (o.a. Collie et al. 2000). Daarnaast vonden Wells et al. (2008) dat mobiele ongewervelde soorten, zoals verschillende soorten krab en garnaal, positief gecorreleerd zijn met bodemberoering. Minder mobiele soorten, zoals de zee-egel, slangster, kokerworm en zeester zijn gecorreleerd aan structureel complexe, niet beviste gebieden.

Tabel 3-7. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van menselijke bodemberoering door garnalenvisserij, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst (zie voor referenties bijbehorende tekst in §3.3.2). Wanneer er in de tabel in een rij dezelfde bevindingen staan (verticale stippellijn) is geen onderscheid te maken tussen de verschillende vormen van dynamiek en diepte.

GARNALENVISSERIJ				
Mate van invasie	Bodemschuring, omwoeling (matige beroering)			
Frequentie van beroering	Frequent tot lokaal zeer frequent			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Waddenzeebreed			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)	Lokale sedimentpluim	Lokale sedimentpluim	Lokale sedimentpluim	Lokale sedimentpluim
Sedimenttype	Slibarmere bodem	Slibarmere bodem	Slibarmere bodem	Slibarmere bodem
Organisch materiaal gehalte	-	-	-	-
Bodemschuifspanning	-	-	-	-
Biomassa	-	-	-	-
Dichtheid	Verandering, maar niet gerelateerd aan visserijdruk	Verandering, maar niet gerelateerd aan visserijdruk	Verandering, maar niet gerelateerd aan visserijdruk	Toename Ensis; lagere dichtheden zakpijpen en kokkels
Diversiteit/rijkdom	Afname aantal soorten bij hogere visserijdruk	Afname aantal soorten bij hogere visserijdruk	Afname aantal soorten bij hogere visserijdruk	Lagere evenness[3] bij hogere visserijdruk
Sensitiviteit (kwetsbaar)	-	-	-	-
Herstel	Morf.: sedimentpluimen lokaal en tijdelijk van aard Bio.: onbekend	Morf.: sedimentpluimen lokaal en tijdelijk van aard Bio.: onbekend	Morf.: sedimentpluimen lokaal en tijdelijk van aard Bio.: toename soortenrijkdom in gebied gesloten voor garnalenvisserij (in periode tot 11 jaar na sluiting) in de meer dynamische geul (Schild)	Morf.: sedimentpluimen lokaal en tijdelijk van aard Bio.: toename dichtheid kokkels, verandering populatiestructuur (in periode tot 11 jaar na sluiting) in de meer beschutte geul (Boschwad)

Kennisleemte: weinig kennis over effecten van garnalenvisserij op de bodemmorfologie, er is geen goede referentiesituatie beschikbaar, lange en middellange termijn studies ontbreken, er wordt weinig onderscheid gemaakt bij de beschrijving van resultaten tussen laag/hoog dynamische gebieden, en er is weinig zicht op de effecten van cumulatie en de doorwerking van bodemberoering op systeemniveau (vooral naar de hogere trofische niveaus).

= n.v.t.; Morf. = morfologie; Bio. = biotiek; - = onbekend / geen gegevens

SAMENVATTING BEVINDINGEN - GARNALENVISSERIJ

Garnalenvisserij zorgt ervoor dat na passage van het garnalentuig de slibconcentratie in de bovenste waterlaag licht verhoogd is, en er lokaal een slibarmere bodem ontstaat. Sedimentpluimen zijn vaak lokaal en tijdelijk van aard. Het is gebleken dat effecten door garnalenvisserij op de biotiek moeilijk in kaart zijn te brengen, o.a. omdat experimenteel werk lastig is uit te voeren / te controleren (veel onbedoelde bevissing) en omdat in dynamische gebieden soorten leven die aangepast zijn aan de heersende bodemdynamiek. Qua visserijdruk blijkt dat het aantal soorten op korte termijn afneemt met een hogere visserijdruk (niet gerelateerd aan dynamiek). Op de langere termijn is er in laag dynamisch gebied een afname in evenness gevonden, waarbij het relatieve aandeel van een individuele soort aan de totale dichtheid, veranderde als reactie op hogere visserijdruk.

Aangetoond is dat gevoelige soorten (aangehechte soorten zoals zakpijpen, maar ook schelpkokerwormen) afnemen bij hogere visserijdruk. Mobielere, opportunistische soorten, die minder gevoelig zijn voor verstoring profiteren juist van hogere visserijdruk door bevist oppervlak te rekoloniseren (Amerikaanse zwaardschede). Over herstel is nog veel onduidelijk.

3.4 Effecten van bodemberoering door extractie (winning)

3.4.1 Zandwinning

Sinds 1998 is zandwinning in de Waddenzee niet meer toegestaan, omdat dit schade aan het gebied kan veroorzaken. In de Noordzeekustzone wordt echter wel zand gewonnen wat een toename van de vertroebeling van het zeewater tot gevolg kan hebben met ook doorwerking in de Waddenzee (Arcadis 2017). Tussen de NAP -20 m dieptelijn en de 12-mijlsgrens wordt met behulp van een sleephopperzuiger zand, afhankelijk van de locatie, 2-6 m diep uit de bodem opgezogen en opgeslagen in een schip. Het zand kan vervolgens gebruikt worden als ophoogzand, beton- en metselzand. Naar schatting is de komende tien jaar circa 15 miljoen m3 aan ophoog zand per jaar nodig (Sweco 2017).

Morfologie

Er zijn vier studies geanalyseerd over de effecten van zandwinning op morfologie, waarvan één in de Waddenzee, twee in de Noordzee/Middellandse zee en één in de Baltische zee.

Van der Veer et al. (1985) vonden zowel in litorale als sublitorale gebieden in de Waddenzee waarin zandextracties hadden plaatsgevonden, winputten gevuld met sediment met een hoger slibgehalte en kleinere korrelgrootte dan de omgeving. Deze verschillen waren echter vele malen kleiner voor sublitorale bagger- en controle gebieden. Ook bij zandwinning in de Duitse Bocht en in zandwinningsgebieden in de westelijke Baltische zee was de slibfractie in de putten vele malen hoger dan de omgeving en nam deze toe in de tijd. Daarentegen nam de homogeniteit van het sediment af met de tijd (Mielck et al. 2019; Krause et al. 2010). Door de toename van organisch materiaal en stilstaande watermassa's in de winputten ontstond er zuurstofgebrek in zes tot tien maanden na baggeren in de Baltische zee (Krause et al. 2010).

Resultaten zijn echter ook variabel, zo tonen Van Dalfsen et al. (2000) aan bij een studie aan zandwinning in gebieden in de Noordzee en de Middellandse zee. In de Noordzeegebieden werd geen verschil in korrelgrootte gevonden na zandwinning. Echter op een extractieplek in de Middellandse zee bleek een dikke laag fijn sediment bovenop de oorspronkelijke zandbodem te zijn gevormd. De studie wijdt de verschillen aan mogelijke variatie in hydrodynamische condities op de locaties, als ook de intensiteit van de zandextracties die in de locatie in de Middellandse zee het hoogst en in Denemarken het laagst was.



Figuur 3-15. Het schip Zeezand Express wordt gebruikt om op de Noordzee zand te zuigen dat vervolgens wordt afgeleverd bij de Spaansen-vestiging in Den Helder en de zandzeverij in Harlingen (foto van marinetraffic.com).

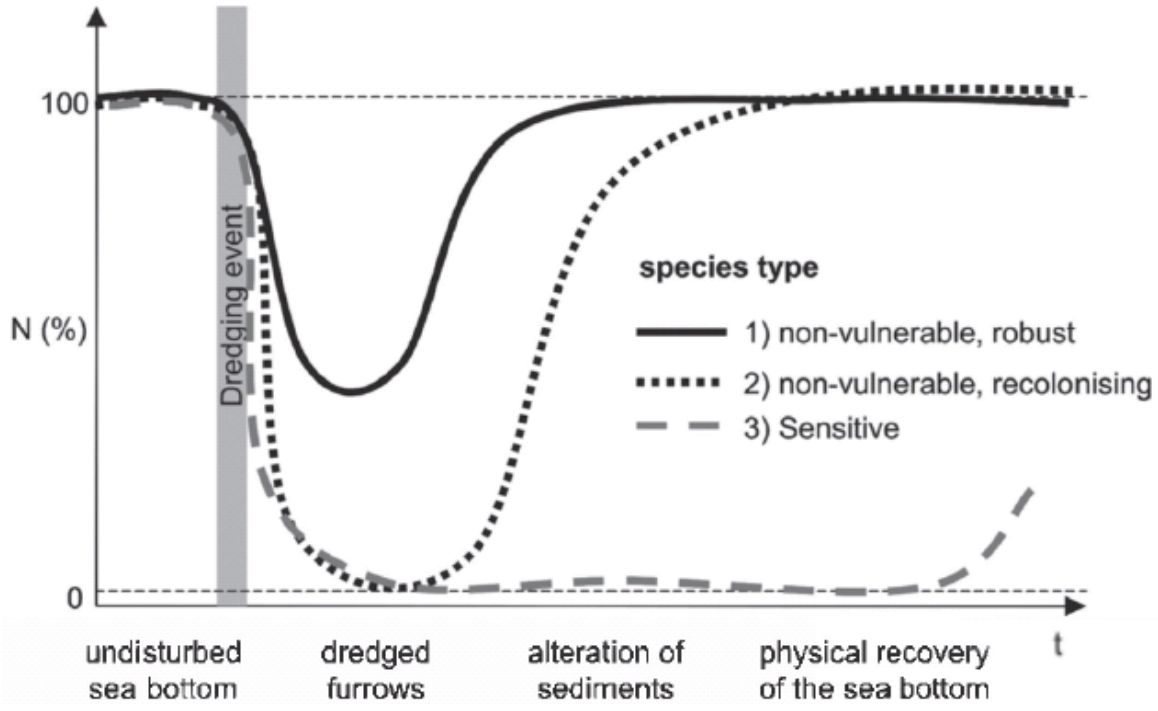
Indicaties voor natuurlijk herstel worden onder andere beschreven door Van der Veer et al. (1985), waarbij de opvulsnelheid van gebaggerde gebieden in het sublitoraal van de Waddenzee tien keer groter was (1-4 jaar) dan in het litoraal (>15 jaar). Krause et al. (2010) vonden langdurige verschillen in sedimenteigenschappen (kleinere korrelgrootte, toegenomen organisch materiaal, zuurstofgebrek) na zandwinning, die niet afnamen tijdens de tien maanden van studie. Ook de dikke laag fijn sediment gevonden door Van Dalfsen et al. (2000) in de extractielocatie in de Middellandse zee was nog zichtbaar na een jaar. Bij zandextracties in de Duitse Bocht zijn opvulsnelheden van 5 meter binnen 7 maanden gevonden (sublitoraal; Mielck et al. 2019). Echter nam de opvulsnelheid af bij zandwinningputten ouder dan een jaar, waardoor het herstel stagneerde en verhoogde slibconcentraties meer dan 30 jaar later nog zichtbaar waren.

Biotiek

De eerder genoemde vier studies hebben ook gekeken naar de effecten van zandwinning op de biotiek. De belangrijkste resultaten tonen aan dat er een negatief effect is van zandwinning op soortenrijkdom, dichtheid en biomassa van de bodemgemeenschap (Van der Veer et al. 1985; Krause et al. 2010) ten opzichte van referentiegebieden. In de Waddenzee zijn er verschillen in grootte van effect tussen litoraal en sublitoraal. Voor biomassa werd geen wezenlijk verschil gemeten in het sublitoraal, terwijl er voor het litoraal 60-100% afname van biomassa in winputten werd gemeten ten opzichte van de referentielocatie. De gevonden verschillen zijn waarschijnlijk sterk gerelateerd aan de verschillen in sedimentsamenstelling, zoals fijner sediment in de winputten ten opzichte van de omgeving (Van der Veer et al. 1985; Krause et al. 2010).

Effecten zijn echter niet altijd eenduidig, zo vermelden Van Dalfsen et al. (2000). In onderzochte Nederlandse en Deense Noordzeegebieden nam soortenrijkdom toe zowel in zandwingebieden- als referentiegebieden wat met name werd bepaald door een verhoogd aantal opportunistische wormensoorten zoals Spio en Spiophanes (laag gevoelige soorten, zie ook §2.3.5). Langlevende soorten zoals de Zeeklit (Echinocardium cordatum) (met een fragiel skelet en in de bodem levend) bleken zeer gevoelig voor zandwinning in de Noordzeekustzone. Het kostte vier jaar om weer op aantallen te komen van in vergelijkbare gebieden zonder zandwinning (Van Dalfsen et al. 2000). Door afname o.a. ook van kreeftachtigen en borstelwormen was er een verlaagde dichtheid bodemdieren op de Nederlandse Noordzee locatie, terwijl door broedval van Spisula sp. de bodemdierdichtheid op de Deense locatie toenam. In de Middellandse zee locatie bleef de soortenrijkdom gelijk drie maanden na extractie maar de diversiteit nam af door overname van enkele opportunistische wormensoorten. Over het algemeen was de bodemgemeenschap structuur in alle studiegebieden sterk veranderd en meer heterogeen ten opzichte van de voorafgaande situatie. De onderzoekers wijten de verschillen per locatie aan de hogere dynamische omstandigheden in Noordzee gebieden ten opzichte van de Middellandse Zee.

Indicaties voor natuurlijk herstel lopen uiteen van een jaar tot meer dan 15 jaar. Zo vonden Van der Veer et al. (1985) dat de biomassa in sublitorale geulen van de Waddenzee 1 tot 3 jaar na baggeren vergelijkbaar was met de referentiegebieden. Herstel van soortenrijkdom duurde langer dan de onderzoeksperiode. Herstel in litorale gebieden na extractie duurde velen malen langer; de bodemfauna was zelfs na 16 jaar niet hersteld (Van der Veer et al 1985). In verschil in herstelsnelheid wordt onderscheid gemaakt door Krause et al. (2010), waar de biomassa, soortenrijkdom en dichtheid van de bodemgemeenschap in de Baltische zee niet herstelde binnen een jaar. Dit effect was sterker voor 'gevoelige' soorten (verschillende soorten borstelwormen, zeepissebedden en de brakwaterkokkel) dan 'niet-kwetsbare' soorten.
Dit wordt toegelicht aan de hand van een conceptueel model (zie figuur 3-16), waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen niet-kwetsbare/robuuste soorten (die in staat zijn om te gaan met directe veranderingen van fysieke omstandigheden na zandwinning), niet-kwetsbare soorten die na zandwinning snel rekoloniseren (als gevolg van hoge reproductiesnelheden) en gevoelige soorten die niet kunnen omgaan met fysieke veranderingen na zandwinning en beperkte migratie- en reproductiecapaciteit hebben (zie ook §2.4.2 en §2.4.3).



Figuur 3-16. Conceptueel model opgesteld door Krause et al. (2010), van verandering in het relatieve voorkomen (N) over de tijd (t) van een (1) niet-kwetsbare/robuuste soort, die in staat is om te gaan met directe veranderingen van fysieke omstandigheden na zandwinning; (2) een niet-kwetsbare soort die na zandwinning snel kan herkoloniseren , als gevolg van hoge reproductiesnelheden; (3) een gevoelige soort die niet kan omgaan met fysieke veranderingen na zandwinning en beperkte migratie- en reproductiecapaciteit heeft. Op de x-as aangegeven: onverstoorde zeebodem, de zandwinactiviteit, zandwinput, verandering van sediment en fysiek herstel van de zeebodem].

De dichtheid van langlevende bodemfauna in de Noordzeegebieden in de studie van Van Dalfsen (2000) was binnen twee jaar hersteld, en herstel van de populatiestructuur duurde vier jaar. De verwachting is dat de hersteltijd langer duurt bij een hogere intensiteit van winning (in oppervlakte, duur en diepte) en wanneer systeemeigen dynamiek laag is.

Tabel 3-8. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van menselijke bodemberoering door zandwinning, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst (zie voor referenties bijbehorende tekst in §3.4.1). Wanneer er in de tabel in een rij dezelfde bevindingen staan (verticale stippellijn) is geen onderscheid te maken tussen de verschillende vormen van dynamiek en diepte.

ZANDWINNING				
Mate van invasie	Extractie, bedekking (zware beroering)			
Frequentie van beroering	Laag (eens in de 10-20 jaar)			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Lokaal			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)	Winput na winning	Winput na winning		
Sedimenttype	Verhoogd slibgehalte bodem winput na zandwinning, geen verschil korrelgrootte op bodem	Verhoogd slibgehalte bodem winput na zandwinning, geen verschil korrelgrootte op bodem		
Organisch materiaal gehalte	Toename	Toename		
Bodemschuifspanning	-	-		
Biomassa	Geen eenduidig effect	Negatief effect		
Dichtheid	Geen eenduidig effect	Negatief effect		
Diversiteit/rijkdom	Geen eenduidig effect	Negatief effect		
Sensitiviteit (kwetsbaar)	Minder robuuste en minder mobiele soorten, beperkte reproductie (afh. van gebied)	Minder robuuste en minder mobiele soorten, beperkte reproductie (afh. van gebied		
Herstel	Morf.: enkele maanden tot tientallen jaren Bio.: enkele jaren	Morf.: enkele maanden tot tientallen jaren Bio.: een jaar tot 15 jaar		

Kennisleemte: weinig onderscheid bij de beschrijving van resultaten, in laag of hoog dynamische gebieden, kan beter.

= n.v.t.; Morf. = morfologie; Bio. = biotiek; - = onbekend / geen gegevens

SAMENVATTING BEVINDINGEN - ZANDWINNING

Effecten van zandwinning op de morfologie van de bodem zijn afhankelijk van de hydrodynamische omstandigheden en de intensiteit van zandextractie. In laag dynamische gebieden werd na zandwinning sediment met een verhoogd slibgehalte gevonden en kleinere korrelgrootte dan de omgeving. Terwijl in hoog dynamische gebieden er geen verschil werd gevonden in korrelgrootte na zandwinning. Herstel van de winput kan enkele maanden tot tientallen jaren duren. Ook voor de biotische indicatoren (biomassa, dichtheid en diversiteit/rijkdom) verschilt het effect van zandwinning per gebied. In laag dynamische gebied is er een duidelijke afname van de indicatoren te zien, terwijl er in hoog dynamisch gebied geen eenduidig effect is. Tot de gevoelige soorten horen de minder robuuste, en minder mobiele soorten, met een langzame reproductie. Herstel kan oplopen van één jaar tot 15 jaar, afhankelijk van de systeemeigen dynamiek van het wingebied en de intensiteit van winning.

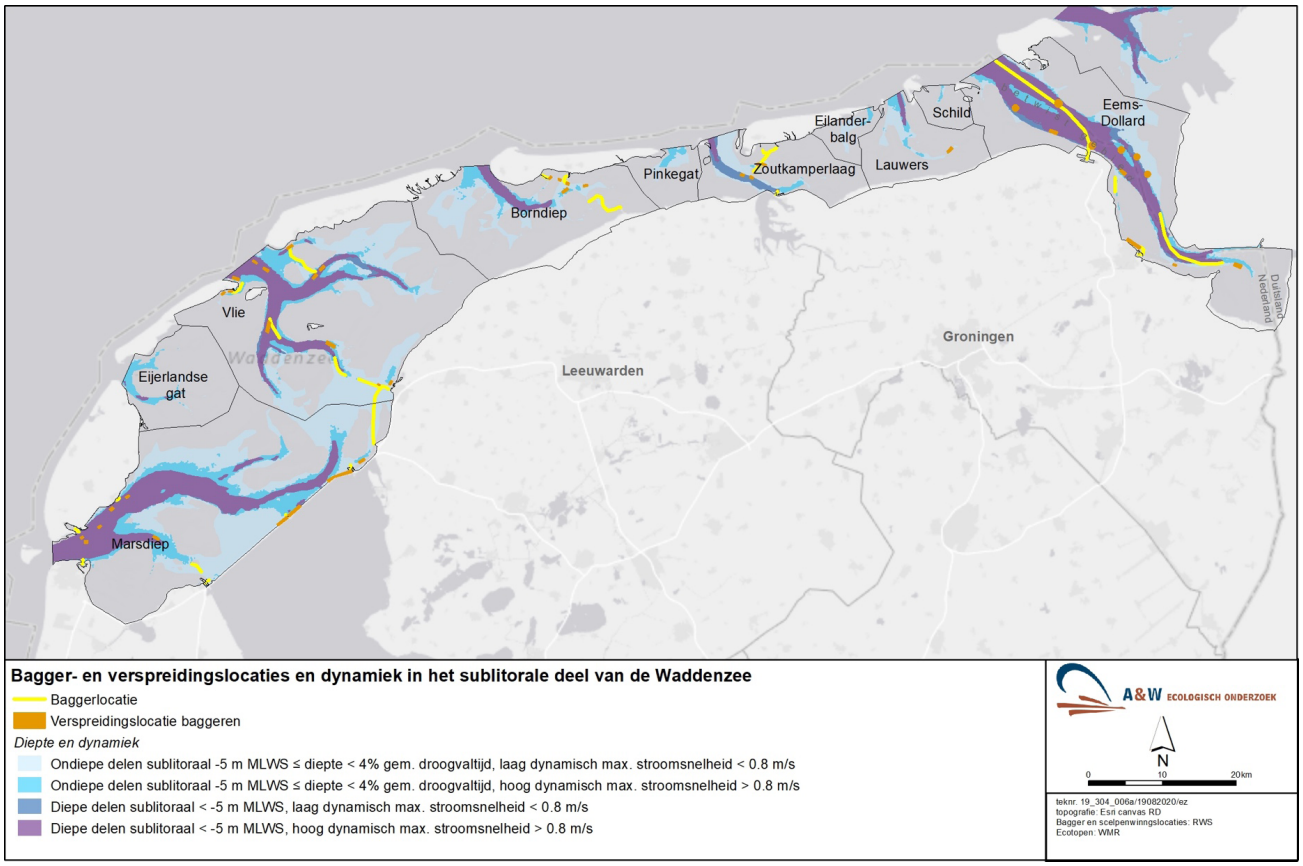
3.4.2 Sedimentextractie

Sedimentextractie, zoals het baggeren van slib in de vaargeulen is toegestaan in de Waddenzee (en aangrenzende havens) om in de bereikbaarheid van scheepvaart te voorzien. Zo moeten havens op een diepte van circa 2-5.25 m onderhouden worden en vaargeulen tussen de 3.5-8 m. Hiervoor worden drie verschillende methodes gebruikt: opzuigen, opwoelen en scheppen met een kraan. De frequentie van baggeren verschilt per gebied van 2 weken per jaar tot het gehele jaar door, zoals op het traject Holwerd-Ameland waar baggeren van de vaarweg een dagelijkse activiteit is. Gemiddeld wordt in totaal per jaar zo'n 3 miljoen m^3 slib gebaggerd in de Waddenzee, waarvan de vaargeul bij Ameland het grootste aandeel bijdraagt (Arcadis 2016).

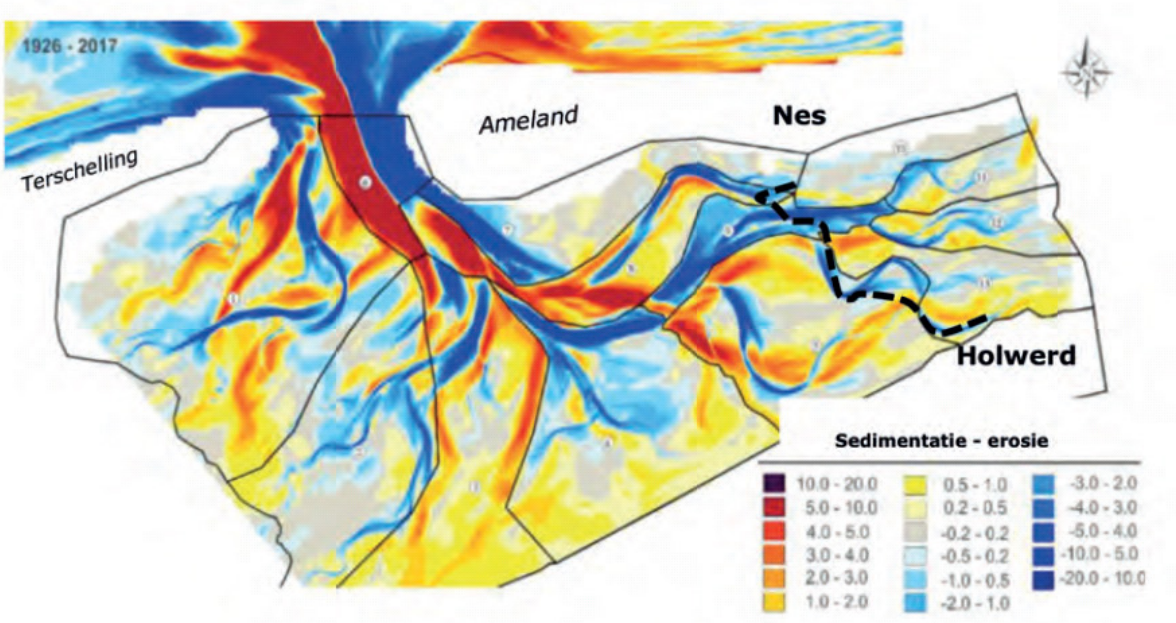
Figuur 3-17 geeft een overzicht van de bagger- en verspreidingslocaties in de Waddenzee. Belangrijke trajecten voor vaarwegonderhoud zijn: de vaarweg Harlingen-Terschelling/Noordzee, de vaarweg naar Ameland, de vaarweg naar Schiermonnikoog en de vaarweg Noordzee-Eems-Dollard. Daarnaast worden ook havens en overige vaarwegen (zoals Boontjes) gebaggerd. Het totale baggervolume voor de Waddenzee laat een stijgende lange termijn trend zien. Deze stijging is vooral het gevolg van een stijging van het onderhoud van de vaarwegen, met daarin een grote bijdrage van de locatie bij Holwerd (vaarweg Ameland-Dantziggat/Kikkertgat). Op dit traject wordt vooral veel slib gebaggerd (tot momenteel ca. 1,7 miljoen m^3 per jaar, hetgeen de helft is van al het baggerwerk van Rijkswaterstaat in de Waddenzee; Rijkswaterstaat 2019). De sterke stijging lijkt de laatste jaren af te nemen. Toch wordt op lange termijn met een verdere stijging rekening gehouden (Mulder 2019). Dit heeft alles te maken met dynamiek en morfologische veranderingen in het gebied. Door sedimentatie (verzanden en dichtslibben) van het vaargeulgebied (zie gele delen in figuur 3-18) en de verzanding van de Waddenzee in het algemeen, neemt het baggervolume toe en moet er steeds meer worden gebaggerd om de vaargeul op afgesproken metingen te houden. Ook is er sprake van sterke uitbochting van de geulen in de vaarroute (waardoor de vaarroute langer wordt) en getijdewater meer weerstand ondervindt en sedimentatie in de geul kan versterken. Eerder in dit rapport is in figuur 3-2 getoond dat er begin 2019 een bochtafsnijding heeft plaatsgevonden in de vaargeul Holwerd-Ameland, o.a. om de doorstroom in het gebied te verbeteren waardoor het baggerwerk kan verminderen.

Baggerwerkzaamheden in de toekomst zijn sterk afhankelijk van hoe de natuurlijke geuldiepte zich ontwikkelt onder invloed van de hydrodynamiek, en hoe de troebelheid van het water (zwevend-stofgehalte) zich ontwikkelt (Mulder 2019).

Zandwinning bij vaargeulonderhoud wordt sinds 2018 jaarlijks met 100.000 m3 afgebouwd; van 500.000 m^3 naar 0 m^3 in 2022. Daarna wordt geheel geen zand meer gewonnen en wordt alle baggerspecie dus verspreid in de Waddenzee.



Figuur 3-17. Bagger- en verspreidingslocaties in relatie tot de hydrodynamiek in het sublitorale deel van de Waddenzee. Vaargeulen en havens worden met regelmaat gebaggerd (gele locaties). Gebaggerd sediment wordt op een aantal vaste locaties verspreid (oranje locaties). De kaart laat zien dat er vooral gebaggerd wordt in de ondiepere delen en havens van de Waddenzee. Op het traject Harlingen-Terschelling en Eems-Dollard wordt ook in de diepe delen gebaggerd. Verspreidingslocaties liggen zowel in laag als hoog dynamische gebieden.



Figuur 3-17. Bagger- en verspreidingslocaties in relatie tot de hydrodynamiek in het sublitorale deel van de Waddenzee. Vaargeulen en havens worden met regelmaat gebaggerd (gele locaties). Gebaggerd sediment wordt op een aantal vaste locaties verspreid (oranje locaties). De kaart laat zien dat er vooral gebaggerd wordt in de ondiepere delen en havens van de Waddenzee. Op het traject Harlingen-Terschelling en Eems-Dollard wordt ook in de diepe delen gebaggerd. Verspreidingslocaties liggen zowel in laag als hoog dynamische gebieden.

Morfologie

In totaal zijn er vier studies geanalyseerd die de effecten op de morfologie van sedimentextractie, door baggerwerkzaamheden hebben beschreven, waarvan voor de Waddenzee een modelstudie en een verkenning van de slibhuishouding in de Waddenzee. Daarnaast zijn ook twee studies, gesitueerd aan de zuidoost kust van Engeland, meegenomen. Voor de beschrijving van resultaten hieruit is ook gebruik gemaakt van de meta-analyse van Cooper et al. (2011).

Naast de natuurlijke bewegingen, die via de zeegaten grote hoeveelheden slib binnen het systeem van de Waddenzee doen opwervelen en weer bezinken, wordt er ook door menselijke activiteiten slib in beweging gebracht. In §3.3.2 (Garnalenvisserij - Morfologie) is reeds besproken dat van de menselijke activiteiten in de Waddenzee garnalenvisserij samen met baggerwerkzaamheden het grootste effect heeft op de slibbalans (Van Duren et al. 2015). Lokaal kan er een effect worden gezien op de slibconcentraties in de bovenste waterlaag, waarbij er tijdens haven- en vaargeulonderhoud een lagere tijdgemiddelde slibconcentratie (lokaal tot 20% lager; Van Kessel 2015) is in/vlakbij de havens (Van Duren et al. 2015). Op de schaal van de Waddenzee is het algehele effect op de morfologie van deze activiteit(en) relatief klein.

Morfologische effecten van baggerwerkzaamheden zijn afhankelijk van lokale hydrodynamische condities, evenals de intensiteit van de extracties. Zo vonden Wan Hussin (2012) en Waye-Barker et al. (2015) dat de manier van extractie waarschijnlijk van invloed is op het uiteindelijke effect van extractie. Zij vonden een toename van grof zand op de locatie van extractie aan de zuidoost kust van Engeland, hetgeen verklaard werd door het effect van 'screening' waarbij tijdens extractie een selectie van sedimentdeeltjes terugvalt op de zeebodem. Echter, de samenstelling van het sediment op de zeebodem kan ook veranderen door opvulling van gebaggerde gebieden met fijner materiaal, door natuurlijke verplaatsing middels stroming, of doordat een teveel aan materiaal tijdens het baggeren als fijn materiaal overboord gaat in suspensie. Ook onderliggend sediment bepaalt welke veranderingen er aan het oppervlak zichtbaar zijn na sedimentextractie (Cooper et al. 2011)

Totaal herstel wordt in veel studies beschreven als geen verschil meer in vergelijking met een referentiesituatie, bijvoorbeeld in sedimentsamenstelling, en kan enkele jaren tot 15 jaar duren (Wan Hussin 2012; Waye-Barker et al. 2015).

Biotiek

Er zijn vier studies geanalyseerd die effecten van sedimentextractie door baggerwerkzaamheden op de biotiek hebben beschreven, waaronder een meta-analyse en een simulatiestudie. Drie studies zijn gesitueerd aan de (zuidoost) kust van Engeland, en één in de Ierse zee.

Wan-Hussin et al. (2012) vonden een afname in biomassa, soortenrijkdom en dichtheid als ook functionele gemeenschapsparameters in gebaggerde gebieden ten opzichte van referentiegebieden. Hoe hoger de intensiteit van extractie, hoe sterker de effecten en hoe langer de hersteltijden (Waye-Barker et al. 2015). In Cooper et al. (2011) komt naar voren dat heersende dynamiek bepalend is voor het effect op de bodemgemeenschap. In een meta-analyse werd gekeken naar het effect van veranderingen in sedimenteigenschappen door baggerwerkzaamheden op benthische gemeenschappen. Bodemgemeenschappen die voorkomen in gebieden met een lage natuurlijke dynamiek en een hoger gehalte aan grind in het sediment zijn gevoeliger voor veranderingen in de sedimentsamenstelling. Hetgeen ook werd gevonden door Wan-Hussin et al. (2012) en Waye-Barker et al. (2015). In een simulatiestudie (met verwijdering van de bovenste 10 cm van het sediment) werd een afname gevonden van dichtheid en soortenrijkdom direct na sedimentextractie (Dernie et al. 2003).

Voor gebieden met lage intensiteit aan extractie waren de biomassa, soortenrijkdom, dichtheid, diversiteit en evenness (gelijkmatigheid) van de bodemfaunagemeenschap hersteld binnen 5-6 jaar. De hersteltijd voor sommige functionele analyses (zoals Biological Trait Analysis) was langer, oplopend tot 7 jaar, hetgeen ook geldt voor gebieden met een hoge intensiteit aan extractie. Daar was de hersteltijd voor biomassa, soortenrijkdom, dichtheid, diversiteit en evenness 11-15 jaar. In de simulatiestudie van Dernie et al. (2003) bleek het herstel van de bodemgemeenschap af te hangen van het sedimenttype en sneller te gaan in een zandig -van nature meer dynamisch- sediment ~7 maanden), dan in een modderige, stabiele omgeving (~11 maanden).

Tabel 3-9. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van menselijke bodemberoering door sedimentextractie, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst (zie voor referenties bijbehorende tekst in §3.4.2). Wanneer er in de tabel in een rij dezelfde bevindingen staan (verticale stippellijn) is geen onderscheid te maken tussen de verschillende vormen van dynamiek en diepte.

SEDIMENTEXTRACTIE				
Mate van invasie	Omwoeling, extractie, bedekking (matige tot zware beroering)			
Frequentie van beroering	Meerdere malen per jaar - jaarlijks			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Lokaal			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)	Opvulling baggerput	Opvulling baggerput		
Sedimenttype	Kan veranderen van grof naar fijn	Kan veranderen van grof naar fijn		
Organisch materiaal gehalte	-	-		
Bodemschuifspanning	-	-		
Biomassa	Afname	Afname		
Dichtheid	Afname	Afname		
Diversiteit/rijkdom	Afname	Afname		
Sensitiviteit (kwetsbaar)	Gemeenschappen minder gevoelig dan laag dynamische	Gemeenschappen minder gevoelig dan laag dynamische		
Herstel	Morf.: /Biot.: enkele jaren tot 15 jaar, maar sneller dan laag dynamische	Morf.: /Biot.: enkele jaren tot 15 jaar, maar sneller dan laag dynamische		

Kennisleemte: geen studies uit de Waddenzee en er is weinig zicht op de effecten van cumulatie en de doorwerking van bodemberoering op systeemniveau (vooral naar de hogere trofische niveaus).

= n.v.t.; Morf. = morfologie; Bio. = biotiek; - = onbekend / geen gegevens

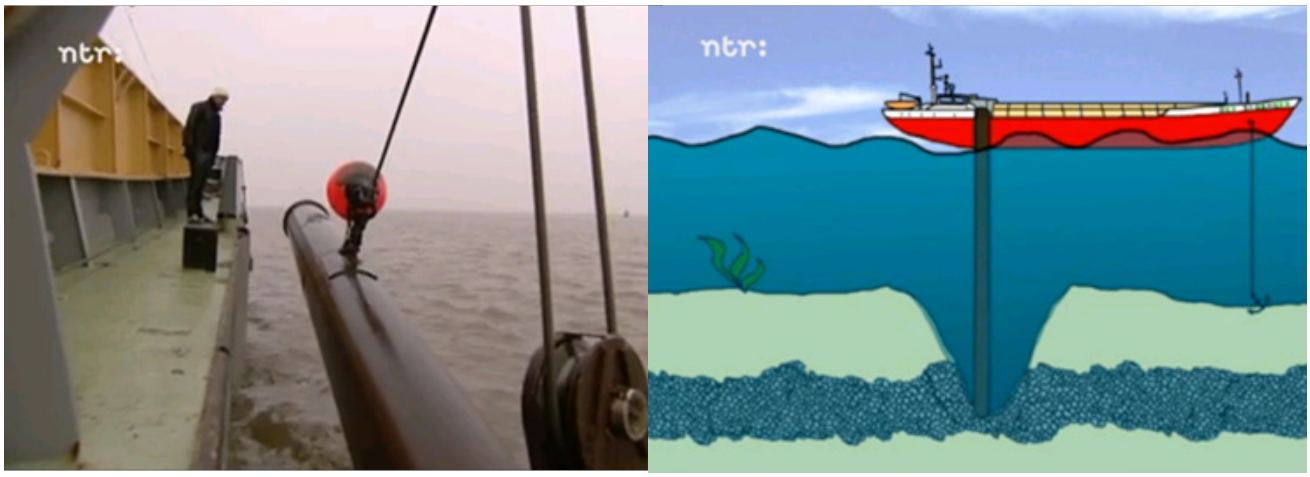
SAMENVATTING BEVINDINGEN - SEDIMENTEXTRACTIE

Na sedimentextractie, zoals baggeractiviteiten, kan er lokaal een effect zijn op de slibconcentraties in de bovenste waterlaag, waarbij er tijdens haven- en vaargeulonderhoud een lagere tijdgemiddelde slibconcentratie (lokaal tot 20% lager) is in/vlakbij de havens. Op de schaal van de Waddenzee is het algehele effect op de morfologie van deze activiteit relatief klein. Uit Engelse studies blijkt dat een effect op de morfologie zichtbaar was door verandering van sedimenttype. Dit kan twee kanten opgaan: van grof naar fijn (hoog dynamisch) en van fijn naar grof (laag dynamisch), afhankelijk van lokale hydrodynamiek, onderliggend sediment en de manier van extractie. Herstel van sedimentsamenstelling na extractie kan meerdere jaren duren. Sedimentextractie kan een afname in biomassa, dichtheid en soortenrijkdom van de bodemdiergemeenschap tot gevolg hebben. Daarbij zijn bodemdiergemeenschappen in gebieden met lage natuurlijke dynamiek gevoeliger en herstel duurt langer dan bij extractie in meer dynamisch gebied. Hersteltijden kunnen oplopen van enkele jaren tot 15 jaar, afhankelijk van de systeemeigen dynamiek in een gebied en de intensiteit van extractie.

3.4.3 Schelpenwinning

Schelpen worden al eeuwen gewonnen en worden tegenwoordig gebruikt voor het aanleggen van paden of ter isolatie. Schelpenwinning vindt o.a. plaats in de Waddenzee en in de Noordzeekustzone tot 50 kilometer uit de kust, vanaf de NAP -5 m dieptelijn. De winning vindt jaarrond plaats vanaf een schip door opzuiging van een mengsel van schelpen in de zeebodem, sediment en water via een zuigbuis. In de Waddenzee zijn alleen steekzuigers toegestaan, waarbij vanaf een vaste plaats tot een diepte van 4 meter in de bodem gewerkt wordt. Schelpenwinning vindt meestal plaats in (dynamische) geulen. In de Noordzeekustzone wordt ook gebruik gemaakt van eerder genoemde sleephopperzuigers. Per jaar worden zo tien tot honderden hectares van de Waddenzee- en Noordzeekustbodem door schelpenwinning beroerd (Verhagen 2013).

Figuur 3-19. Schelpenwinning op de Waddenzee middels steekzuiger (afbeeldingen van klokhuis.nl, uitzending 24-08-2018)



Morfologie

Er is voor deze bronnenanalyse één studie geanalyseerd over schelpenwinning in de Waddenzee en de effecten daarvan op de morfologie. Er zijn binnen deze review geen andere bronnen over dit onderwerp gevonden. De belangrijkste resultaten geven aan dat de geschatte grootte van het aangetaste oppervlak van de winput ongeveer 0,35% van het oppervlak van de geulen in de Waddenzee beneden NAP -5 m betreft (op jaarbasis voor de hele Waddenzee). Bij het schelpen winnen komt ook een hoeveelheid zand (bij 'schone schelpen') of klei ('kleischelpen') mee aan boord, die weer wordt teruggestort. Bij de winning van schone schelpen komt 72% van het teruggestorte materiaal in een laag met een gemiddelde dikte van 0,17 m in de omgeving van de winput op de bodem terecht en blijft daar gedurende korte tijd (ca. 1 maand) liggen (de rest van het materiaal gaat in suspensie; Schans et al. 2003). Wat overboord gaat tijdens de winning van kleischelpen en op de bodem terecht komt is minder (54%) en bestaat uit met slib/klei/zand vermengd proceswater. De rest van het materiaal is zozeer in suspensie dat het relatief gemakkelijk door de stroom kan worden meegenomen en verspreid over grote afstand. De grootte van het aangetaste bodemoppervlak door terugstort wordt ingeschat op ongeveer 1,05% van het geuloppervlak beneden NAP -5 m in de Waddenzee (Schans et al. 2003). De winput verplaatst zich, afhankelijk van de natuurlijke dynamiek ter plaatse, door bovenstroomse aanzanding en benedenstroomse erosie.

Indicaties voor natuurlijk herstel geven aan dat een winput van schone schelpen weer is opgevuld na 7,5 maanden en een winput van kleischelpen weer is opgevuld na 4,5 maanden (Schans et al. 2003). De door de terugstort aangetaste oppervlakten zijn weer verdwenen na één tot enkele maanden.

Biotiek

Er is voor deze bronnenanalyse één studie geanalyseerd over schelpenwinning in de Waddenzee en de effecten daarvan op de biotiek. Er zijn geen andere effectenstudies over dit onderwerp gevonden. De belangrijkste resultaten beginnen met de benoeming van het feit dat schelpenwinning meestal plaatsvindt in dynamische geulen, waar een vrij arme fauna aanwezig is. De bodemdieren in een geul zullen daarbij in meerdere of mindere mate bestand zijn tegen voortdurende erosie en sedimentatie.

Bij het winnen van schelpen treedt sterfte van bodemdieren op door verstikking of door opzuiging samen met de schelpen. Dit gebeurt op de locatie van de winput, waar dieren die in het oppervlak van de zandmassa zitten worden gevangen. De effecten op de omgeving van de schelpenwinput zijn vaak groter dan die in de winput zelf, vanwege bedekking met teruggestort zand (Schans et al. 2003). Alleen zwemmende en lopende fauna (garnalen, strandkrabben en vissen) zullen voor een deel kunnen ontsnappen, en worden dan ook als laag gevoelig getypeerd (zie §2.3.5). Overleving van minder mobiele fauna is afhankelijk van de hoeveelheid (en snelheid waarmee) zand wordt gestort, en de snelheid waarmee ze zich weer kunnen uitgraven. De hoog gevoelige, op de bodem levende soorten slibanemoon, hydroïdpoliep en mosdiertjes zijn zeer gevoelig voor bedekking met (slibrijk) zand, omdat ze zich niet uit zand omhoog kunnen werken bij schelpenwinning (en terugstorten restslib) (Schans et al. 2003). Het gaat hier om sedimentatie door zand, dat als restproduct bij de winning van 'schone schelpen' weer wordt teruggestort. Bij 'kleischelpen' is er veel meer slib/klei opgezogen, wat in suspensie in proceswater over boord gaat en dan verder wordt verspreid.

De grootte van het effect van schelpenwinning is afhankelijk van het seizoen. Omdat in de voorzomer broedval plaatsvindt, is het effect van schelpenwinning in de zomer meer negatief, omdat rekolonisatie van jonge bodemdieren tot het volgende voorjaar moet wachten. De hersteltijd is enkele maanden (voor kort levende, zich snel reproducerende soorten) tot enkele jaren (voor langer levende soorten).

Tabel 3-10. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van menselijke bodemberoering door schelpenwinning, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst (zie voor referenties bijbehorende tekst in §3.4.3).

SCHELPENWINNING				
Mate van invasie	Extractie, bedekking (zware beroering)			
Frequentie van beroering	Laag			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Laag			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)	Teruggestort materiaal op bodem omgeving winput	-		
Sedimenttype	Sedimentatie door zand, slib in suspensie na terugstort	-		
Organisch materiaal gehalte	-	-		
Bodemschuifspanning	-	-		
Biomassa	-	-		
Dichtheid	-	-		
Diversiteit/rijkdom	Afname	-		
Sensitiviteit (kwetsbaar)	Gemeenschappen minder gevoelig dan laag dynamische	-		
Herstel	Morf.: enkele maanden tot een jaar Bio.: enkele maanden tot enkele jaren	-		

Kennisleemte: weinig informatie over de effecten van schelpenwinning, zowel over effecten op morfologie als biotiek.

= n.v.t.; Morf. = morfologie; Bio. = biotiek; - = onbekend / geen gegevens

SAMENVATTING BEVINDINGEN - SCHELPENWINNING

Het effect van schelpenwinning op de morfologie bestaat eruit dat na het opzuigen van schelpen er een winput (gat in de zeebodem) ontstaat en dat er een hoeveelheid zand of klei (meegekomen met de schelpen) wordt teruggestort en op de bodem blijft liggen. De hersteltijd wordt geschat op enkele maanden (teruggestort sediment) tot ruim een half jaar (winput). Voor de biotiek geldt dat er sterfte op kan treden bij bodemdieren door opzuiging (met schelpen) of door bedekking (na terugstort sediment). Daarbij geldt dat sessiele bodemdieren gevoeliger zijn dan mobiele fauna, omdat deze laatste groep voor een deel kan 'ontsnappen'. Herstel duurt enkele maanden tot enkele jaren. Veel is echter nog onbekend, zowel over effecten op biotiek als op morfologie, waarbij ook informatie over effecten in gebieden met verschillende dynamiek ontbreekt.

3.5 Effecten van bodemberoering door bedekking

3.5.1 Zandsuppletie

Bij zandsuppleties wordt een grote hoeveelheid zand op een vooroever, het strand, langs een geulwand of nabij de duinen opgespoten voor de handhaving van de kust en veiligheid. Deze activiteit wordt al enkele decennia uitgevoerd. Dit gebeurt door het zand via een opening in het schip in zee te storten, onder hoge druk het zand op te spuiten of via een drijvende leiding het zand op de locatie te pompen waarna deze wordt verspreid door een bulldozer. De bodem van de suppletielocatie wordt hierdoor bedekt door een laag (mogelijk) gebiedsvreemd materiaal met andere korrelgrootte en/of samenstelling dan uit oorspronkelijk gebied. Gemiddeld vinden suppleties per locatie 1 keer per 4 jaar plaats. In 2018 is in totaal circa 6.9 Mm3 zand gesuppleerd (RWS data; Deltares 2014). In de Waddenzee heeft in 2018/2019 een bijzondere suppletie plaatsgevonden bij de Prins Hendrikdijk op Texel: een unieke wijze van versterking, door zand in combinatie met natuurontwikkeling (figuur 3-20). Omdat er nog geen gegevens zijn die voor deze review kunnen worden gebruikt, wordt voor de effectbeschrijving hieronder gebruik gemaakt van andere studies.

Figuur 3-20. Suppletiewerkzaamheden aan de Prins Hendrikzanddijk op Texel (foto via Jan de Nul)



Morfologie

Er zijn voor deze review drie studies geanalyseerd die de effecten van zandsuppletie op de morfologie beschrijven (met suppletielocaties in Zeeland en Noordzeekustzone). De belangrijkste resultaten tonen aan dat op de locatie van de suppletie de mediane korrelgrootte toeneemt evenals de hoogteligging van het gebied (Hoekstra et al. 1996, Van der Werf et al 2013, Boersema et al 2018). Het zand dat bij suppleties wordt gebruikt is overwegend grof, waardoor de toename in troebelheid beperkt is en kortdurend blijft (Boersema et al 2018). Dit in combinatie met de van nature aanwezige troebelheid in het systeem is de verwachting dat effecten van suppletie op troebelheid relatief klein zijn en van korte duur. Door suppleties met grof zand veranderen platen en banken en migreert sediment tijdelijk in andere richtingen (Hoekstra et al. 1996, Van der Werf et al 2013, Boersema et al 2018). In de Noordzeekustzone wordt fijn, mobieler sediment van de kust af en oostwaarts getransporteerd, grover sediment blijft langer liggen en heeft de neiging naar de kust toe te gaan.

Lokale korrelgrootte en bodempatronen kunnen binnen een periode van maanden tot enkele jaren (2-2,5 jaar) herstellen (Hoekstra et al. 1996). Hydromorfologische processen zijn voor langere tijd veranderd (10-25 jaar), afhankelijk van de berekende levensduur van de suppleties (Van der Werf et al 2013, Boersema et al 2018). Suppleties zoals de Prins Hendrik Zanddijk (Waddenzee), Herstel Griend (Waddenzee), Roggenplaat (Zeeland) en Oesterdam (Zeeland) zijn berekend op een levensduur van 25 jaar of langer. Na die periode kan het suppletiezand grotendeels verspreid zijn en/of zijn de beoogde effecten op hydromorfologie niet meer optimaal werkzaam.

Biotiek

Er zijn voor deze review zeven effectenstudies geanalyseerd over zandsuppletie en biotiek. De belangrijkste resultaten laten zien dat zandsuppletie tot een (tijdelijke) afname kan leiden in biomassa en dichtheden van benthos (Van der Werf et al 2013, Vergouwen & Holzhauer 2016, Boersema et al 2018). Deze afname vindt plaats door twee soorten effecten op benthos, namelijk: (1) soorten worden begraven onder een zandlaag en (2) het habitat van soorten verandert door de introductie van ‘ander’ sediment. Dit beïnvloedt de geschiktheid van een habitat voor bepaalde soorten. Aanvullend op deze studies (over de effecten van zandsuppletie) zijn er voor deze review ook vijf (algemenere) simulatiestudies over bedekking van benthos geanalyseerd. Hieronder worden de effecten nader toegelicht.

(1) Bij begraving door suppletie spelen de volgende factoren een rol:

- diepte van bedekking,
- tolerantie van soorten,
- tijdsduur van begraven,
- samenstelling van zand dat gesuppleerd wordt en
- temperatuur.

De belangrijkste resultaten tonen aan dat sterfte van epibenthos toeneemt wanneer er een langere begravingsduur is (diepere bedekking) en een afname van korrelgrootte (Hendrick et al. 2016; Hutchison et al. 2016; Hinchey et al. 2006; Bolam 2011). Soorten die zich vasthechten, zoals mosselen, of niet mobiel zijn lijken de meeste hinder te ondervinden van bedekking door zandsuppletie. Zo bleken in de studie van Hendrick et al. (2016) de doorschijnende zakpijp en de tweekleppige wijde mantel erg gevoelig en trad al snel complete mortaliteit op tijdens bedekkingstudies (na 1-2 dagen). Daarentegen was de zandkokerworm toleranter, met een laag sterftepercentage, en er trad er bovendien kokergroei op. Soorten die mobiel zijn of zich makkelijk door sediment bewegen, zoals verschillende wormensoorten en Amerikaanse zwaardschedes, ondervinden minder grote effecten (Essink 1999, Vergouwen & Holzhauer 2016). De slangster was het meest mobiel tijdens de begravingsstudie van Hendrick et al. (2016), kende daardoor een hogere overleving en lijkt dus minder gevoelig voor bedekking door suppletie.

Ook Hinchey et al. (2006) tonen het belang van mobiliteit bij macrofauna aan voor verhoogde overleving. Zo had een bedekking, gedurende zes dagen met een 25 cm dikke sedimentlaag, geen significant effect op de overleving en groei van het mobiele in het sediment levende nonnetje. De overleving bij een begraving van de vlokreeft en een minder beweeglijke borstelworm was daarentegen maar een paar procent ten opzichte van de controle. Hinchey et al. (2006) tonen ook verschillen in reactie aan tussen soorten met eenzelfde mobiliteit. Zo bleek er geen significant effect op overleving voor de

Japanse oester, maar wel voor de ronde zakpijp bij bedekking met 1 cm sediment. Dit verschil was volgens de onderzoekers het gevolg van verschil in metabole stress.

Over het algemeen zijn benthische soorten gevoeliger voor begraving met slib dan voor zand en tevens gevoeliger voor bedekking met een ander type sediment dan waar ze in voorkomen (Essink 1999, Smit et al 2006). Een laag van bedekking groter dan 50-60 cm zorgt ervoor dat de meeste soorten bodemdieren doodgaan. Ook kan continue sedimentatie negatieve effecten hebben. Voor sedimentatie en erosie is bijv. Mya arenaria erg gevoelig (tolerantie is max. 2-5 cm per maand). Soorten als kokkels, nonnetjes, wadpieren en zandzagers kunnen een sedimentatiesnelheid aan van gemiddeld ongeveer 20 cm per maand (Bijkerk 1988, Smit et al 2006).

Een bijkomend effect van bedekking is de afname van het zuurstofgehalte in het sediment, hetgeen vaak gepaard gaat met toenemende sulfideconcentraties. Grotere schelpdieren, zoals mosselen, slijkgapers en strandgapers kunnen relatief lang overleven onder lage zuurstof- en hoge sulfide gehaltes, gevolgd door wormen en kreeftachtigen (Essink 1999). Deze laatste twee soortgroepen zijn echter meer mobiel en kunnen makkelijker migreren naar gebieden met betere omstandigheden. Anoxische gebieden bevatten over het algemeen weinig bodemleven met enkele soorten die lage zuurstof- en hoge sulfide gehaltes kunnen verdragen zoals ringwormen (Smit et al. 2006).

Naast de bevinding dat meer mobiele soorten beter bestand zijn tegen begraving, vond Bolam (2011) dat een verhoging van het organisch gehalte daarbij een negatief effect had op de verticale migratiecapaciteit. Zo kon het wadslakje boven komen na een bedekking van 16 cm en ook de grote kustknobbelworm vertoonde enig herstel na bedekking van 6 cm, echter alleen bij een laag organisch gehalte (0.8-1%). Twee soorten borstelwormen vertoonden een slechte verticale migratie hetgeen werd versterkt door een verhoogd organisch gehalte en laag zandgehalte. Ook microfytobenthos ondervindt negatieve effecten van begraving. Larson & Sundback (2012) vonden een afname in biomassa van Chl-a (ten opzichte van de controle) in de bovenste 3 mm van sedimentlaag na begraving van in totaal 1 cm dikte verspreid over 7 dagen. Naast verhoogde mortaliteit bij twee mosselsoorten, door toename van bedekkingsduur en bij fijner sediment, vonden Hutchison et al. (2016) ook een effect van hogere temperatuur als gevolg van verhoogde zuurstofbehoefte. De begraving van mosselen in zomerperiodes zou hierdoor negatieve gevolgen kunnen hebben.

2) Het habitat van soorten verandert bij zandsuppletie of verspreiding van baggerspecie, door introductie van 'ander' sediment. Verandering is o.a. te meten in korrelgrootte, slibgehalte, organisch stofgehalte, doordringbaarheid van het sediment en troebelheid in het water. Verandering in sedimentsamenstelling door suppleties heeft gevolgen voor de organismen die in dit sediment leven (Rodil & Lastra, 2004) en het is daarom een belangrijk aspect in het beoordelen van de ecologische effecten van suppleties. Een geringe afwijking van het suppletiesediment met een grotere kleifractie dan het oorspronkelijke sediment kan problemen opleveren voor het ingraven van strandfauna.

De belangrijkste resultaten over herstel tonen aan dat dit snel kan gaan (maanden tot 1 jaar) als het zand zich snel verspreidt en er sprake is van een tolerante benthische gemeenschap ter plaatse. Opportunistische soorten zoals borstelwormen (o.a. zandzager) kunnen binnen 1 tot 2 jaar na suppletie rekoloniseren en in vergelijkbare aantallen en biomassa's aanwezig zijn als voorafgaand aan de suppletie (Vergouwen en Holzhauer 2016). Voor soorten die niet elk jaar succesvol reproduceren kan het herstel van de biomassa en de normale leeftijdsstructuur langer duren tot 2-5 jaar (Essink 1999; Hoekstra et al. 1996). Ook gaat herstel vaak langzamer als er gebiedsvreemd sediment wordt gebruikt en de habitatcondities heel sterk veranderd zijn (zoals een langdurige verandering van korrelgrootte; Vergouwen en Holzhauer 2016). In dit geval treedt wel faunaontwikkeling op, maar de gemeenschap keert niet terug naar dezelfde samenstelling als die aanwezig was voor de suppletie (Colosio et al. 2007).

Studies aan suppleties in de Oosterschelde op het litoraal laten zien dat 2 à 3 jaar na suppletie bodemdiergemeenschappen nog steeds verschillend zijn in gesuppleerd gebied en referentiegebied, maar dat de biomassa wel weer gelijk is (van der Werf et al. 2013, Boersema et al. 2018). Na één jaar is de soortenrijkdom op de suppleties grotendeels hersteld en zijn de aantallen gelijk of zelfs groter in vergelijking met het centrale slik. In het tweede en derde jaar na suppletie herstelt de soortenrijkdom verder. Boersema et al. (2018) vinden wel significant lagere aantallen in zogenaamde 'coldspots' die gekenmerkt worden door minder hydrodynamische beschutting en meer dynamiek in de sedimentatie en erosie. Kolonisatie van de suppleties verloopt niet homogeen. Tijdens de onderzoeksperiode lieten de kokkel, tapijtschelp en het nonnetje een succesvolle broedval zien op de suppleties, wat heeft bijgedragen aan een snelle kolonisatie van de suppleties.

Tabel 3-11. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van menselijke bodemberoering door zandsuppletie, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst (zie voor referenties bijbehorende tekst in §3.5.1). Wanneer er in de tabel in een rij dezelfde bevindingen staan (verticale stippellijn) is geen onderscheid te maken tussen de verschillende vormen van dynamiek en diepte.

ZANDSUPPLETIE				
Mate van invasie	Extractie, bedekking (zware beroering)			
Frequentie van beroering	Laag (eens in de 10-20 jaar)			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Lokaal			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)			Toename hoogteligging, lokale hydromorfologie verandert	Toename hoogteligging, lokale hydromorfologie verandert
Sedimenttype			Toename mediane korrelgrootte	Toename mediane korrelgrootte
Organisch materiaal gehalte			Verandert	Verandert
Bodemschuifspanning			-	-
Biomassa			Afname na suppletie	Afname na suppletie
Dichtheid			Afname na suppletie	Afname na suppletie
Diversiteit/rijkdom			Afname na suppletie	Afname na suppletie
Sensitiviteit (kwetsbaar)			Sessiele soorten, meer gevoelig bij langere bedekking, fijner sediment hogere temperatuur	Sessiele soorten, meer gevoelig bij langere bedekking, fijner sediment hogere temperatuur
Herstel			Morf.: enkele maanden tot tientallen jaren Bio.: enkele maanden tot 1 jaar (voor opportunistische soorten)	Morf.: enkele maanden tot tientallen jaren Bio.: 2-5 jaar

Kennisleemte: er kan beter onderscheid worden gemaakt in de mate van effect in laag of hoog dynamische gebieden en er is weinig zicht op de effecten van cumulatie en de doorwerking van bodemberoering op systeemniveau (vooral naar de hogere trofische niveaus).ecten op morfologie als biotiek.

= n.v.t.; Morf. = morfologie; Bio. = biotiek; - = onbekend / geen gegevens

SAMENVATTING BEVINDINGEN - ZANDSUPPLETIE

Zandsuppletie heeft een effect op de morfologie door toename van de korrelgrootte (er wordt overwegend grof zand gebruikt) en hoogteligging van het gebied na suppletie. Herstel van lokale korrelgrootte en bodempatronen is er meestal binnen enkele maanden tot een paar jaar. Echter hydromorfologische processen kunnen voor enkele tientallen jaren zijn veranderd. Zandsuppletie kan door het begraven van soorten en verandering van habitat van soorten zorgen voor sterfte onder bodemdieren. Er is afname van biomassa, dichtheid en soortenrijkdom. Met name vastzittende soorten zijn het meest gevoelig, omdat deze zichzelf niet vanonder een laag zand naar boven kunnen werken (capaciteit / tolerantie verschilt per soort) en omdat ze zich niet kunnen verplaatsen naar een ander (meer geschikt) habitat. Herstel kan binnen 1-2 jaar optreden en geldt voor opportunistische soorten. Langzaam reproducerende soorten hebben meerdere jaren nodig om te herstellen.

3.5.2 Verspreiding baggerspecie

Bij de verspreiding van baggerspecie wordt het opgebaggerde sediment (baggerspecie) na het baggeren verspreid op een verspreidingslocatie of aan land gebracht om gebruikt te worden als bouwmateriaal. Bij de verspreiding in zee wordt de bodem van de locatie net als bij zandsuppleties bedekt met een laag (mogelijk gebiedsvreemd) materiaal. In totaal zijn 33 verspreidingslocaties in de Waddenzee in gebruik met een oppervlakte van 3.59 km2 (0.41% van de kombergingsgebieden waarin wordt gebaggerd) (Arcadis 2011; Arcadis 2016). In de Eems-Dollard ligt ongeveer een derde van het totaal aan stortlocaties in de Waddenzee, waar het gebaggerde sediment over het algemeen met schepen over wordt verspreid (behalve het slib uit de haven van Emden, dat binnen de haven verspreid wordt, en een deel van het slib uit de haven van Delfzijl dat met een airjet weggeblazen wordt). De stortlocaties liggen in ondiepe geulen en langs de randen van de vaargeul naar de Noordzee.

Morfologie

Er zijn twee studies naar effecten van verspreiding van baggerspecie op de morfologie meegenomen in deze review, een modelstudie over de Waddenzee en een effectstudie over de Noordzee. De belangrijkste resultaten uit de modelstudie, over effecten van verspreiding van baggerspecie uit haven- en vaargeul onderhoud in de Waddenzee op de slibhuishouding, geven aan dat deze activiteit lokaal 10% verhoging van de slibconcentratie kan geven rondom de verspreidingslocatie voor baggerspecie (Van Kessel 2015). Dit zijn lokale processen. Samen met garnalenvisserij is de bijdrage van baggeronderhoud aan havens en vaarwegen aan de slibconcentratie op jaargemiddeldeconcentraties in de Waddenzee ongeveer 1%. Enkele maanden na het verspreiden van baggerspecie werd geen effect op de bodemmorfologie gevonden in een beschutte baai (Crouch estuarium, zuidoost Engeland). Het gebaggerde materiaal ontwaterde snel, en het watergehalte van het sediment leek al snel weer op dat van het referentiegebied (Bolam 2014). In dezelfde studie was er in een open baai een blijvend hoger slibgehalte en een lager organisch gehalte (Bolam 2014). De onderzoeker geeft geen mogelijke verklaring voor de gevonden verschillen per gebied.

Biotiek

Er is voor deze review een studie geanalyseerd over de effecten van verspreiding van baggerspecie op de biotiek. In twee gebieden waarin baggerspecie was verspreid ten opzichte van referentiegebieden werd een afname gevonden van zowel soortenrijkdom en dichtheid (Bolam 2014). In de beschutte baai werden deze verschillen vanaf één tot twee jaar na de impact zichtbaar en in de open baai gedurende de gehele studie tijd. Daarentegen werd geen trend gevonden in biomassa in beide gebieden en alleen in de beschutte baai waren de individuen over soorten meer gelijk verdeeld. Voor

beide gebieden waren verschillende effecten gevonden voor functionele parameters. Zo was de functionele diversiteit zelfs verhoogd in de beschutte baai en was er een verschil in taxa die bijdragen aan de secundaire productie. Voor beide baaien was er een verschil in de eigenschapsamenstelling, maar geen verschil in productie gedurende de studieperiode.

De belangrijkste resultaten laten zien dat rekolonisatie van litorale habitats, na verspreiding van baggerspecie, snel kan gaan. Bolam (2014) vond na drie maanden alweer hoge dichtheden aan benthos. De mate van herstel verschilde echter wel per type gebruikte parameter (structurele of functionele parameters). De onderzoekers vonden gedurende de 4 jaar durende onderzoeksperiode een consistent minder soortenrijk en minder dicht bevolkte bodemgemeenschap in de gebieden met gestorte baggerspecie, vergeleken met referentiegebieden in het Crouch estuarium (zuidoost Engeland) (Bolam 2014). Functioneel gezien konden de locaties met baggerstort als hersteld worden beschouwd, zo was de gemiddelde functionele diversiteit een paar maanden na baggerstort weer gelijk aan het referentiegebied. Daarentegen werd geen trend gevonden in biomassa in beide gebieden en alleen in de beschutte baai waren de individuen over soorten meer gelijk verdeeld.

Bolam (2014) vond vergelijkbare verschillen in hersteltijden voor structurele en functionele gemeenschapsparameters. Zo varieerde de hersteltijd van 4 maanden tot meer dan 4 jaar voor zowel soortenrijkdom als dichtheid, maar was de functionele diversiteit en de totale productie binnen 3 maanden hersteld. Daarentegen was de eigenschapsamenstelling niet hersteld na de studieperiode van 4 jaar.

Tabel 3-12. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van menselijke bodemberoering door de verspreiding van baggerspecie, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst (zie voor referenties bijbehorende tekst in §3.5.2). Wanneer er in de tabel in een rij dezelfde bevindingen staan (verticale stippellijn) is geen onderscheid te maken tussen de verschillende vormen van dynamiek en diepte.

VERSPREIDEN BAGGERSPECIE				
Mate van invasie	Omwoeling, extractie, bedekking			
Frequentie van beroering	Jaarlijks			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Lokale schaal			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)			Verhoging slibconcentratie	Verhoging slibconcentratie
Sedimenttype			Verlaging van slibconcentratie rondom slibinvangende havens	Verlaging van slibconcentratie rondom slibinvangende havens
Organisch materiaal gehalte			Mogelijk verlaging	Mogelijk verlaging
Bodemschuifspanning			-	-
Biomassa			Geen trend gevonden	Geen trend gevonden
Dichtheid			Afname	Afname
Diversiteit/rijkdom			Afname	Afname
Sensitiviteit (kwetsbaar)			Verschillen in functionele parameters per gebied	Verschillen in functionele parameters per gebied
Herstel			Morf.: enkele maanden Bio.: enkele maanden tot jaren	Morf.: enkele maanden Bio.: enkele maanden tot jaren

Kennisleemte: er is weinig informatie over de effecten van de verspreiding van baggerspecie en weinig zicht op de effecten van cumulatie en de doorwerking van bodemberoering op systeemniveau (vooral naar de hogere trofische niveaus).

SAMENVATTING BEVINDINGEN - VERSPREIDEN BAGGERSPECIE

De verspreiding van baggerspecie kan lokaal (rondom de verspreidingslocatie voor baggerspecie) 10% verhoging van de slibconcentratie als gevolg hebben, terwijl er verlaging kan optreden rondom slibinvangende havens. Effecten op morfologie zijn lokaal en meestal tijdelijk (tot enkele maanden). De bodemdiergemeenschap kan een afname in soortenrijkdom en dichtheid ondervinden als gevolg van de verspreiding van baggerspecie. De totale productie van de bodemdiergemeenschap kan enkele maanden na de verspreiding van baggerspecies weer hersteld zijn (met de functionele diversiteit weer op orde), maar de samenstelling (qua eigenschappen) van de verschillende bodemorganismen kan tot meer dan vier jaar nodig hebben voor herstel.

3.6 Effecten van bodemberoering door obstructie / constructie

3.6.1 Aanleg en onderhoud van kabels en leidingen

De aanleg van kabels en leidingen in de bodem van de Waddenzee en Noordzeekustzone is nodig ten behoeve van de nutsvoorzieningen en datatransport naar de eilanden of op internationaal niveau. Over het algemeen dienen kabels en leidingen een bedekking van minimaal 1 meter te hebben, maar moeten in sommige gevallen, zoals in hoogdynamisch gebied, tot wel 15 meter diep in de bodem worden aangelegd. Op open zee worden kabels en leidingen vaak gelegd met een zogenaamd leg-schip waarop de pijp aan elkaar wordt gelast en vervolgens in de bodem gelegd. Hiervoor moet eerst gebaggerd worden of zijn andere pre-installatie onderzoeken en werkzaamheden nodig (bv. explosieven check).
Op droogvallend areaal kan voor het begraven van kabels en leidingen gebruik worden gemaakt van een kleine graafmachine. Kabels en leidingen dienen volgens het toegangbeperkend besluit van de Noordzeekustzone bij voorkeur gelegd in de periode van 1 april tot 1 november (Arcadis 2013).

Morfologie

Er zijn voor deze review twee effectstudies geanalyseerd die iets zeggen over effecten van kabelconstructie op de morfologie, gesitueerd in de Baltische zee en in de Keltische zee. Voor het effecten overzicht is ook gebruik gemaakt van de (concept) ecologische beoordeling van de NeuConnect kabel (Mielke et al. 2019), omdat in deze beoordeling uitgebreid is beschreven wat mogelijke effecten zijn van kabelaanleg.

Figuur 3-2. Aanleg van het laatste stuk van de onderzeese stroomkabel tussen Denemarken en Nederland: vanuit de Waddenzee komt de COBRA-kabel aan land voor verbinding met het schakelstation (foto Harry Cock, via volkskrant.nl)



Door kabelaanleg wordt ter plaatse de zeebodem verstoord, waarbij het water vertroebeld wordt. Dit leidt tot een tijdelijke, lokale stijging van de concentratie van zwevende deeltjes. Deze sedimentdeeltjes kunnen zich verspreiden onder de invloed van stroming, tot een afstand van enkele honderden meters, en zullen in de directe nabijheid van het kabeltracé neerslaan (bronnen in Mielke et al. 2019). Lewis et al. (2002) vonden na kabelaanleg, in het noordelijk deel van de Keltische zee, dat door het graven van een goot voor de kabel (zo'n 3 m diep) het gehalte aan grove deeltjes in het sediment na aanleg toenam met een % grind van 0 naar 15-20% als gevolg van grote stenen die omhoog waren gehaald bij het graven van de kabelgoot.

Voor wat betreft herstel zijn zes maanden na kabelconstructie in het noordelijk deel van de Keltische zee nog steeds grote stenen en een ruwer oppervlak van het sediment aanwezig, maar het getij begint het gebied ook meer vorm te geven (Lewis et al. 2002). Andrulewicz et al. (2003) zagen op videobeelden dat na kabelconstructie in de Baltische zee de bodem niet veranderd leek een jaar na aanleg. De kabel was bij aanleg onder het sediment begraven en niet zichtbaar aan het oppervlak, behalve op de harde stenen en keien in het oostelijk deel van de kabelroute. Afhankelijk van het gebied waarin de kabelconstructie plaatsvindt, kunnen effecten van troebelheid lokaal en kortdurend zijn (gedurende het fysieke werk, en naar verwachting maximaal een aantal uren daarna).

Biotiek

Er zijn voor deze review vijf effectstudies geanalyseerd over (de aanleg van) kabels en leidingen en effect daarvan op biotiek. Er zijn geen studies gevonden over (veelvuldig) onderhoud en de effecten daarvan op het ecosysteem.
De belangrijkste resultaten over de aanleg van kabels en leidingen tonen aan dat door kabelconstructie een deel van de zeebodem, met aanwezige bodemdiergemeenschappen, zal worden verstoord. Aantallen bodemorganismen zijn aanzienlijk lager op locatie van kabelaanleg dan in een vergelijkbaar controlegebied (Lewis et al. 2003). Daarnaast vonden Andrulewicz et al. (2003) dat na kabelconstructie in de Baltische zee de impact op de bodemdiergemeenschap het meest duidelijk te zien was in het gebied met de lagere bodemdynamiek. Echter een studie van Kogan et al. (2006) naar effecten van een kabel na 8 jaar op de zeebodem vond geen significante verschillen voor de infaunagemeenschap in het kabelgebied en controle locaties. Daarentegen werden significant meer anemonen gevonden op plekken waar de kabel blootlag in het sediment.

Ten aanzien van ongewervelden hebben enkele studies kleine tot niet significante effecten gevonden wat betreft de invloed van elektromagnetische velden door de aanleg van kabels op deze soortgroep. Zo vonden Bochert & Zettler (2004) een hoge overleving van de geteste bodemdieren uit de Baltische zee, die (op experimentele wijze) aan magnetische straling werden blootgesteld. Ook vonden de onderzoekers geen effecten op de ontwikkeling (en fitness) van mosselen. Een recent onderzoek heeft laten zien dat de Amerikaanse zeekreeft wel een subtiele gedragsverandering als reactie op elektromagnetische velden door een zeekabel toont (Hutchison et al. 2018). Vanwege de kleine omvang van de zone waarin elektromagnetische velden effect hebben en het feit dat de sterkte van de velden waaraan organismen worden blootgesteld beperkt zal blijven, is het effect door elektromagnetische velden op populatie niveau van ongewervelden verwaarloosbaar klein.

Uit onderzoek naar de impact van een pijpleidingconstructie in de Keltische zee blijkt dat wormensoorten de locatie van kabelconstructie na enkele maanden tot een jaar hebben gekoloniseerd. Herstel van schelpdieren neemt meer tijd in beslag (>1 jaar) (Lewis et al. 2003). De gemiddelde grootte van de individuen nam toe, terwijl de biomassa af nam, hetgeen impliceert dat de bodemdiergemeenschap na kabelinstructie zich mogelijk heeft hersteld (rekolonisatie) rondom de kabel, maar wel met een verandering in de bodemdiergemeenschap. Andrulewicz et al. (2003) stelden één jaar na de installatie van een zeekabel geen significante effecten op de diversiteit, abundantie of biomassa van macrofauna op de kabelroute of in de directe omgeving vast. Het herstelvermogen heeft met meerdere factoren te maken en volledig herstel van habitat/flora/fauna kan meerdere jaren duren (Taormina et al. 2018).

Tabel 3-13. Samenvattende tabel van literatuurstudie over effecten van menselijke bodemberoering door aanleg en onderhoud van kabels en leidingen, aan de hand van indicatoren uit het afwegingskader. NB. bevindingen in de tabel zijn gebaseerd op lokaal en specifiek onderzoek, zoals beschreven in de hoofdtekst (zie voor referenties bijbehorende tekst in §3.6.1). Wanneer er in de tabel in een rij dezelfde bevindingen staan (verticale stippellijn) is geen onderscheid te maken tussen de verschillende vormen van dynamiek en diepte.

AANLEG EN ONDEHOUD KABELS / LEIDINGEN				
Mate van invasie	Bedekken, omwoelen			
Frequentie van beroering	Laag			
Ruimtelijk lokaal - Waddenzeebreed	Lokaal			
Systeem (dynamiek / diepte)	**Hoog /diep**	**Laag /diep**	**Hoog/ ondiep**	**Laag/ ondiep**
Bodemdynamiek (sedimentatie - erosie)	Lokale vertroebeling	Lokale vertroebeling	-	-
Sedimenttype	Verandering na graven kabelgoot, afh. van onderliggend sediment	Verandering na graven kabelgoot	-	-
Organisch materiaal gehalte	-	-	-	-
Bodemschuifspanning	-	-	-	-
Biomassa	Geen duidelijk effect gevonden	Geen duidelijk effect gevonden	-	-
Dichtheid	Geen duidelijk effect gevonden	Geen duidelijk effect gevonden	-	-
Diversiteit/rijkdom	Lagere aantallen op locatie kabel (m.n. in laag dynamisch gebied te zien)	Lagere aantallen op locatie kabel (m.n. in laag dynamisch gebied te zien)	-	-
Sensitiviteit (kwetsbaar)	Grotere, langzaam reproducerende soorten	Grotere, langzaam reproducerende soorten	-	-
Herstel	Morf.: enkele uren/ dagen Bio.: enkele maanden (wormensoorten tot >1 jr (schelpdieren)	Morf.: enkele uren/ dagen Bio.: enkele maanden (wormensoorten tot >1 jr (schelpdieren)	-	-

Kennisleemte: er is weinig informatie over de effecten van aanleg en onderhoud van kabels/leidingen, evenmin als duidelijk onderscheid tussen hoog/laag dynamisch en wat effecten zijn in ondiepere gebieden.

= n.v.t.; Morf. = morfologie; Bio. = biotiek; - = onbekend / geen gegevens

SAMENVATTING BEVINDINGEN - AANLEG EN ONDERHOUD VAN KABELS / LEIDINGEN

Bij de aanleg van kabels en leidingen kan er lokale troebelheid optreden, door opwerveling van zwevende deeltjes. Het effect is meestal na enkele uren weer verdwenen. De bodemdiergemeenschap zal worden verstoord door het ingraven van een kabel in de zeebodem, waarbij is aangetoond dat aantallen bodemdieren aanzienlijk lager zijn in een gebied waar een kabel is begraven. Effecten lijken sterker in laag dynamisch gebied. Wanneer de kabel aan het oppervlak ligt kunnen vastzittende soorten zoals anemonen (vanuit een larve stadium) het kabeloppervlak koloniseren. Herstel duurt langer voor meer gevoeliger soorten (grotere, langzaam reproducerende soorten). Wormensoorten hebben het gebied van kabelaanleg binnen enkele maanden gekoloniseerd, terwijl bijvoorbeeld schelpdieren minimaal een jaar nodig hebben. Over de effecten van elektromagnetische straling, die de aangelegde kabel uitstraalt, op het bodemleven is nog veel onduidelijk. Maar wel is bekend dat de zone van straling van zo'n kleine omvang is dat er geen effect is op populatieniveau van ongewervelden die op / in de zeebodem leven.

3.7 Belangrijkste bevindingen

- Natuurlijke bodemdynamiek is van grote invloed op de bodemstructuur en (daarmee) de samenstelling van de bodemdiergemeenschap:
  - In hoog dynamische gebieden, met overwegend een hoge bodemschuifspanning, grote korrelgrootte, lage slibfractie en erosie, leven bodemdieren die aan deze omstandigheden zijn aangepast door o.a. hun verschijningsvorm (meer robuust) en levenswijze (snel reproducerend, korte levensduur). In termen van sensitiviteit en herstel leven hier soorten die laag gevoelig zijn voor verstoring en een korte hersteltijd hebben.
  - In laag dynamische delen van het sublitoraal is overwegend een lage bodemschuifspanning aanwezig, een kleinere korrelgrootte, hogere slibfractie en vindt meer sedimentatie plaats. De bodemdiergemeenschap is meer divers en bestaat uit soorten die fragieler (sensitiever) zijn en een langere levensduur (langere hersteltijd) hebben.

- Storm en ijsgang zijn 'natuurlijke events' die bovenop de aanwezige natuurlijke dynamiek komen, zij het met (zeer) lage frequentie, en kunnen zorgen voor sedimenttransport en het wegslaan van schelpdierbanken. Herstel daarvan kan meerdere jaren duren.

- De meeste typen menselijke bodemberoering laten op korte termijn een afname in de dichtheid, soortenrijkdom en biomassa van benthische organismen zien en kort durende veranderingen in morfologie. Op de lange termijn (jaren) zijn deze effecten niet eenduidig en variëren sterk per type habitat en type activiteit.

- Lang levende, sessiele en filterende bodemorganismen (overwegend voorkomend in laag dynamische gebieden) vertonen de sterkste afname in reactie op natuurlijke en menselijke bodemberoering en hebben een langere hersteltijd;

- Van de menselijke bodemberoerende activiteiten hebben extractie en bedekking lokaal de grootste impact, omdat deze de morfologie en biotiek ter plaatse zeer sterk kunnen beïnvloeden, afhankelijk van lokale hydrodynamiek. Herstel van gevoelige soorten duurt lang. Echter, deze activiteiten vinden overwegend met lage frequentie en op kleine schaal plaats, terwijl visserijactiviteiten zoals garnalenvisserij (met een lichtere omwoeling/schuring) een veel hogere frequentie hebben en op veel grotere schaal plaatsvinden. Mogelijk kunnen de lichtere vormen van menselijke bodemberoering daarom netto toch evenveel of meer impact op de sublitorale zeebodem hebben dan extractie en bedekking.

- Door het gebruik van het afwegingskader met daarin een logische ordening van de indicatoren is het mogelijk gebleken om tot een beschrijving van effecten te komen op basis van de beschikbare literatuur. Bij de uitwerking is gebleken dat het onderscheid in het afwegingskader tussen diep en ondiep in de literatuur relatief weinig gemaakt wordt terwijl het onderscheid tussen hoog en laag dynamisch vaker gemaakt wordt. Tegen deze achtergrond zullen we in het vervolg van de analyses dit onderscheid tussen hoog en laag dynamisch als leidend hanteren.

4. Natuurlijke vs. menselijke bodemberoering

In het voorgaande hoofdstuk is een overzicht gegeven van de effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering op de morfologie en de biotiek in de Waddenzee en vergelijkbare kustgebieden. In dit hoofdstuk maken we, voor zover dat volgens ons zinvol is, een vergelijking tussen de effecten van menselijke beroering en de natuurlijke bodemdynamiek. Uit de literatuurstudie blijkt namelijk dat niet alle vergelijkingen gemaakt kunnen worden, die theoretisch gezien bedacht kunnen worden. We beginnen daarom eerst met een aantal algemene beperkingen die we zijn tegen gekomen en uiteindelijk ook vermelden als disclaimer bij de uitkomsten. Vervolgens beschrijven we de bevindingen. Daarna zoomen we in op een specifieke casus.

4.1 Beperkingen bij de vergelijking

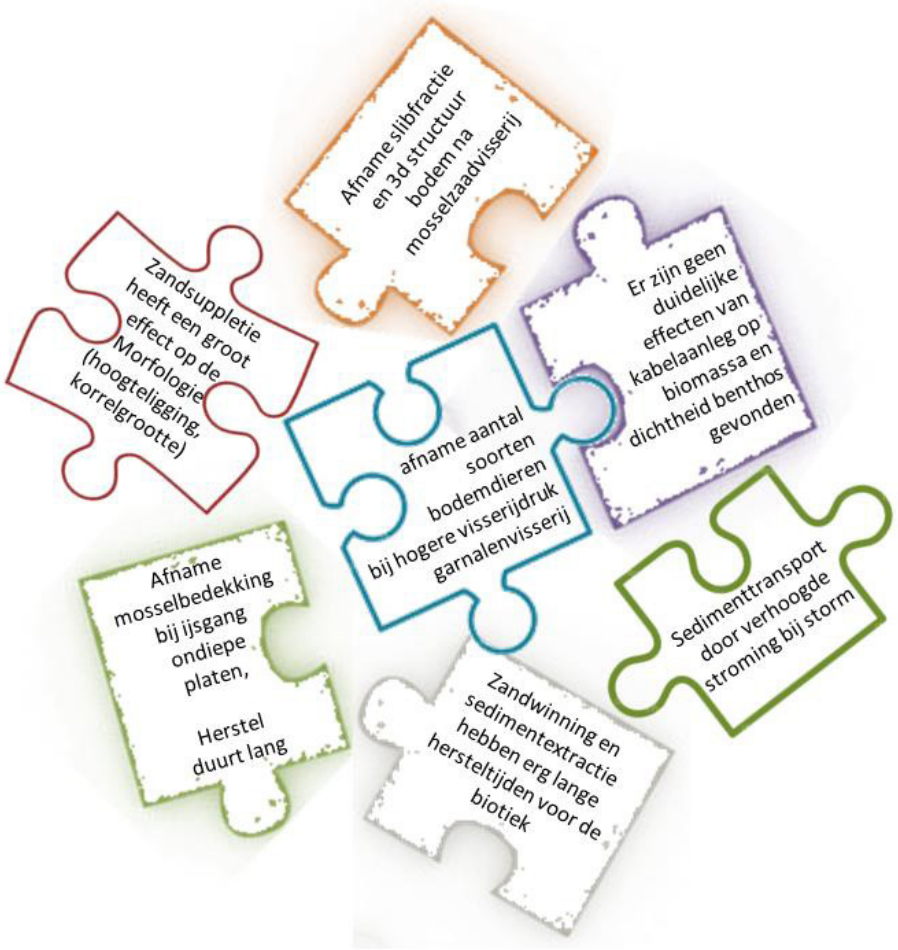
Voordat we de effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering gaan vergelijken willen we nogmaals kort benoemen welke onderzoeksmatige beperkingen bij deze vergelijkingen ons parten spelen:

Onvoldoende referenties van de ongestoorde situatie

In de Nederlandse Waddenzee is maar een enkel gebied waar geen enkele vorm van menselijke bodemberoering in het sublitoraal plaatsvindt en dat ook al langere tijd wordt gevolgd in ontwikkeling (d.w.z. referentiegebied Rottum; Glorius et al. 2018). In de Duitse en Deense Waddenzee zijn ook enkele 'zero-use' gebieden, maar gegevens over de natuurlijke ontwikkeling in deze gebieden zijn schaars (CWSS 2017). Hierdoor is er geen goede referentie voor de ongestoorde situatie beschikbaar. In de Waddenzee en daarbuiten kan ook geen historische referentie worden gebruikt uit een periode vóór dat er menselijke bodemberoering is gaan optreden omdat natuurlijke bodemdynamiek en ook een aantal typen menselijke bodemberoering met een hoge frequentie al decennia plaatsvinden. Hierdoor is een klassieke BACI proefopzet (before, after, control, impact) niet mogelijk en zijn alle studies in feite beschrijvend en correlatief van aard. Het is wel mogelijk om in een vervolgonderzoek de effecten langs een glijdende schaal te onderzoeken (bijv. van lage dynamiek naar hoge natuurlijke dynamiek en van lage intensiteit naar hoge intensiteit bodemvisserij) of gebruik te maken van modelstudies.

Onvoldoende gebruik van vaste set van indicatoren: puzzel moeilijk te leggen

De beschrijving van effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering is gedaan aan de hand van een afwegingskader met een vaste set van indicatoren. Uit onze analyse van de literatuur komt naar voren dat in iedere studie vaak maar één of enkele indicatoren uit het afwegingskader onderzocht zijn. Helaas worden per studie steeds weer andere indicatoren uit het afwegingskader gebruikt. Dit is op zich ook begrijpelijk. Er is namelijk geen regie op de keuze van indicatoren in marien onderzoek. Het staat onderzoekers vrij om zelf te kiezen welke indicatoren ze willen gebruiken. Hierdoor is een gedegen vergelijking van effecten aan de hand van de indicatoren evenwel lastig. De studies kennen daarbij nog meer beperkingen. Het gaat bijvoorbeeld vaak om relatief korte studies in een specifiek gebied onder één geldende hydrodynamische conditie. Het zijn daardoor veel kleine stukken van informatie (zie visualisatie figuur 4-2), die moeilijk te vergelijken zijn omdat onderzoeken niet systematisch vanuit een integraal perspectief zijn opgezet met voldoende onderscheidend vermogen. Daarbij zijn er, zoals ook al in hoofdstuk 3 is aangegeven, nog onvoldoende studies gedaan in alleen de Waddenzee, hetgeen we hebben ondervangen door ook literatuur uit andere gebieden te beschouwen. Van alle genoemde indicatoren zijn de bodemschuifspanning, sensitiviteit en hersteltijd het meest bepalend. Daarom zullen we de vergelijking met name doen aan de hand van deze drie meer integrale indicatoren.



Figuur 4-1. Puzzelstukjes aan informatie worden door het afwegingskader duidelijk, maar zijn moeilijk te combineren, omdat het losstaande onderzoeken betreft.

Alleen vergelijking van het toegevoegde effect van menselijke beroering

Het is bij de vergelijking niet mogelijk om gebieden met alleen menselijke beroeringen te vergelijken met gebieden met alleen natuurlijke beroering. Natuurlijke beroering vindt immers overal plaats en is niet uit te sluiten. De vergelijking is dus altijd tussen een systeem met natuurlijke bodemberoering en een systeem met natuurlijke bodemberoering en menselijke bodemberoering. De schaal, impact en/of frequentie van menselijke beroering kunnen er toe leiden dat er extra waarneembare morfologische en ecologische effecten zijn, ondanks de al van nature aanwezige beroering. De 'toegevoegde' effecten van menselijke bodemberoering kunnen daarmee de drempel van de veerkracht in een natuurlijk systeem overschrijden. Of, waar en wanneer dit aan de orde is, is de hamvraag.

Doordat specifiek en voldoende solide uitgevoerd onderzoek naar deze toegevoegde effecten ontbreekt, zijn de beschouwingen in de volgende paragrafen kwalitatief van aard.

4.2 Bevindingen vergelijking natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering

Effect van bodemberoering op morfologie en biotiek

Natuurlijke bodemdynamiek (golven, stroming door getij, erosie en sedimentatie) is continu aanwezig in het sublitorale deel van de Waddenzee, en van invloed op de bodemstructuur en de samenstelling van de bodemdiergemeenschap (§3.1). Natuurlijke 'events' zoals storm en ijsgang (§3.2) komen daarbij met (zeer) lage frequentie voor. Storm en ijsgang kunnen een effect hebben op sedimenttransport door verhoogde stroming (storm) of afzetting (ijs). Met name gevoelige soorten, zoals de mossel, kunnen lokaal verdwijnen en hebben een lange hersteltijd. De meeste typen menselijke bodemberoering laten op korte termijn een afname zien in de dichtheid, soortenrijkdom en meestal ook in biomassa van benthische organismen (§3.3 - §3.6). Soorten met een hoge sensitiviteit (zoals anemoon, schelpkokerworm, mossel en oester) kunnen hierdoor lokaal verdwijnen en herstel duurt lang. Veranderingen in morfologie na menselijke bodemberoering zijn o.a. verandering in hoogteligging, verandering in korrelgrootte en slibfractie. De hersteltijd van morfologie loopt sterk uiteen, afhankelijk van type menselijke activiteit en systeemeigen dynamiek van het gebied.

Effecten van bodemberoering afhankelijk van dynamiek in een systeem

In een hoog dynamisch systeem leven veelal soorten die zijn aangepast aan omstandigheden met grof zand, veel stroming en dynamiek (erosie), o.a. door hun verschijningsvorm (meer robuust) en levenswijze (snel reproducerend, korte levensduur, grote mobiliteit) (zie §3.1.1 Biotiek). In termen van sensitiviteit en herstel leven hier soorten die laag gevoelig zijn voor verstoring en een korte hersteltijd hebben (zie ook info in tabel 4-1). De soorten die in hoog dynamische gebieden leven worden als 'veerkrachtig' gezien en zijn daardoor beter bestand tegen menselijke bodemberoering (Collie et al. 2000; Wells et al. 2008).

In laag dynamische delen van het sublitoraal leven soorten die zijn aangepast aan een lage bodemschuifspanning, een kleinere korrelgrootte, hogere slibfractie en sedimentatie. De bodemdiergemeenschap is meer divers en bestaat uit soorten die fragieler (sensitiever) zijn, sessiel, een langere levensduur en langere hersteltijd hebben. Deze soorten vertonen een sterke afname in reactie op (aanhoudende) menselijke bodemberoering en hebben een lange hersteltijd (o.a. Van Dalfsen et al. 2000; Schellekens et al. 2014; Tulp et al. 2019; Glorius et al. 2018).

In zowel laag als hoog dynamische gebieden zal in een natuurlijke situatie (zonder menselijke bodemberoerende activiteiten) de geassocieerde bodemdiergemeenschap zich zo hebben aangepast dat ze bestand en veerkrachtig is om in dat type gangbare niveau van dynamiek te overleven. In voorkomende gevallen kan er een sterke impact zijn van events (storm en ijsgang), maar de frequentie is zo laag, dat er vaak ruimte is voor natuurlijk herstel ook al duurt dat soms lang (Donker et al. 2015; Van der Meer et al. 2018).

Zoals in hoofdstuk 3 is beschreven, laten meerdere studies zien dat de effecten van menselijke bodemberoering op de bodemdiergemeenschap hoger zijn in gebieden met lage natuurlijke bodemdynamiek, dan in gebieden met hoge natuurlijke bodemdynamiek (bv. Tulp et al. 2020; Van Dalfsen et al. 2000; Cooper et al. 2011; Collie et al. 2000). Er zijn echter maar een paar (model)studies die dit systematisch onderzoeken op een grote ruimtelijke schaal én in gebieden met voldoende onderscheid in dynamiek (echter niet in de Waddenzee). In deze studies is de bodemschuifspanning als maat gebruikt voor de natuurlijke bodemdynamiek zodat er onderscheid gemaakt kan worden tussen gebieden met lage natuurlijke bodemdynamiek en hoge visserijdruk en vice versa.

Zoals aan het begin van hoofdstuk 3 is aangekondigd wordt in bijlage 5 nader ingegaan op de 'overige bodemberoerende activiteiten' (zoals boomkorvisserij met wekkerkettingen), waarbij studies laten zien dat bodemvisserij en natuurlijke bodemdynamiek benthische gemeenschappen op vergelijkbare manieren kunnen beïnvloeden (Tillin et al. 2006, Van Denderden et al .2015, Diesing et al .2013, Hiddink et al. 2006, Rijnsdorp et al. 2018): zowel bodemvisserij als hogere natuurlijke bodemdynamiek veroorzaakten een achteruitgang in langlevende, filterende organismen met een exoskelet. Gezien de vergelijkbare effecten was er geen waarneembaar effect van bodemvisserij op gemeenschappen die voorkwamen in gebieden met hoge natuurlijke bodemdynamiek. Omgekeerd, in gebieden met een lage natuurlijke

bodemdynamiek, werden wel effecten op benthos door bodemvisserij vastgesteld. Reiss et al. (2009) vonden echter dat ook in zwaar beroerd gebied, bodemdiergemeenschappen nog gevoelig kunnen reageren op bodemberoering en er schade aangericht kan worden bij een verdere intensivering van bodemvisserij.

Tabel 4-1. geeft als samenvatting de gangbare karakteristieken nogmaals weer, van laag en hoog dynamische gebieden in de Waddenzee. Daarbij is geen onderscheid (meer) gemaakt tussen diep en ondiep (zoals in alle samenvattende resultaattabellen wel werd gedaan), omdat uit de literatuurstudie en de beschrijving van de resultaten in H3 is gebleken dat er te weinig informatie over beschikbaar is.

	Laag dynamisch	**Hoog dynamisch**
Ligging	Ondiepe en enkele diepe delen	Diepe geulen en zeegaten
Natuurlijke stroming	Laag	Hoog
Bodemdynamiek (sedimentatie/ erosie)	Klein	Groot
Sedimenttype	Slib / klei (vanaf 20 µm) / zand	Grof zand (tot 650 µm)
Bodemschuifspanning	Laag (vanaf 0,1 N/m2)	Hoog (tot 4 N/m2)
Sensitiviteit benthos gemeenschap	Hoog	Laag
Hersteltijd benthos gemeenschap	Lang (1-15 jr)	Snel (<1 jr)
Gevoeligheid voor hoog frequente bodemberoering	Hoog	Laag
Gevoeligheid voor incidentele bodemberoering	Matig tot hoog	Laag

Effect afhankelijk van intensiteit, frequentie, schaal van de beroering

De intensiteit waarmee menselijke bodemberoerende activiteiten plaatsvinden is bepalend voor het effect. Activiteiten met een hoge mate van invasie, zoals extractie door zandwinning (§3.4.1) en bedekking door zandsuppletie (§3.5.1), kennen na de ingreep een lange hersteltijd voor de bodemdiergemeenschap (die kan oplopen tot tientallen jaren). De frequentie waarmee deze activiteiten voorkomen is echter laag (eens in de zoveel jaar) en het betreft vaak ook een lokaal gebied. Daarentegen vindt garnalenvisserij met een veel hogere frequentie (meerdere malen per jaar) en op grotere schaal (Waddenzeebreed) plaats, maar is de intensiteit van de orde 'matige beroering' (oppervlakkige omwoeling / schuring). In hoofdstuk 3 is beschreven dat effecten van garnalenvisserij afhankelijk zijn van de visserijdruk: hoe vaker eenzelfde stuk wordt bevist, hoe zichtbaarder een effect op de bodemdiergemeenschap (d.w.z. afname soortenrijkdom; Tulp et al. 2020). Daarbij is het effect sterker zichtbaar in een laag dynamisch gebied (waar een enkele mobiele, opportunistische soort als de Amerikaanse zwaardschede sterk toenam, terwijl gevoeliger soorten als zakpijp afnamen).

Ook de facetten van natuurlijke dynamiek kennen een verschillende mate van intensiteit, frequentie en schaal van beroering. Zo is er op dagelijkse, grote schaal sprake van golven, stroming door getij, erosie en sedimentatie. In hoog dynamische gebieden is de intensiteit ervan hoog (d.w.z. bepalend voor de bodemstructuur en -samenstelling en de aanwezige bodemdieren, zie ook §3.1). In laag dynamische gebieden gaat het in dit geval om lichte beroering. Het natuurlijke 'event' storm kan meerdere malen per jaar op grote schaal voorkomen, waarbij sprake is van matige beroering met lokale effecten (§3.2.1). IJsgang is een natuurlijk 'event' dat met lage frequentie (eens in de zoveel jaar) plaatsvindt en vaak ook een lokaal gebied betreft, maar niet in het diepere sublitoraal voorkomt. De intensiteit van

ijsgang is in de orde van zwaardere beroering, omdat sediment getransporteerd kan worden en er afslag van mosselbanken kan plaatsvinden, waarbij herstel meerdere jaren duurt (§3.2.2).

In tabel 4-2 zijn de verschillende vormen van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering nog eens weergegeven, ingedeeld op mate van beroering (intensiteit), frequentie en schaal. Deze indeling is van belang voor het maken van een vergelijking tussen de verschillende typen bodemberoering (zie volgende kopje over de 'vergelijking van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering per type systeem en aard van de beroering').

Tabel 4-2 laat in een oogopslag ook zien dat de tendens van gevoeligheid van de bodemdieren en hersteltijden in laag dynamische gebieden in het algemeen hoger is dan in hoog dynamische gebieden. De hersteltijden van biota zijn overigens indicatief en kennen een grote onzekerheidsmarge.

Tabel 4-2. Natuurlijke bodemdynamiek (cursief/blauw) en menselijke bodemberoering, ingedeeld op mate van beroering (intensiteit), frequentie en schaal en de impact op de bodemdiergemeenschap in een laag dynamisch systeem vs. een hoog dynamisch systeem.

Mate van de bodemberoering (Frequentie x schaal x Intensiteit)	**Type bodemberoering**	**Impact op bodemdiergemeenschap**	
		Laag dynamisch systeem	**Hoog dynamisch systeem**
Dagelijks, grote schaal, lichte beroering in laag dynamische gebieden, Dagelijks grote schaal, hoge mate van beroering in hoog dynamische gebieden.	*Golven, stroming*	Inherent*	Inherent
	Erosie-sedimentatie	Inherent	Inherent
Meerdere malen per jaar, grote schaal, matige beroering (omwoeling/ schuring)	Garnalenvisserij	Klein tot groot	Niet waar te nemen of te kort gemonitord
	Stormen	Klein tot groot	Onbekend
2-Jaarlijks, lokale schaal, matige beroering	Mosselzaadvisserij en -kweek	Lokaal aanzienlijk	Beperkt
Jaarlijks, lokale schaal, zware beroering	Verspreiding van baggerspecie	Groot	Klein
	Sedimentextractie (baggeren)**	Groot	Klein
	Schelpenwinning	nvt	Klein beperkt
Eens in de 5-20 jaar, lokale schaal, zware beroering (extractie/bedekking)	Zandwinning	Groot	Beperkt tot groot
	IJsgang	Groot	nvt
	Zandsuppletie	nvt	Beperkt tot groot
	Kabels- en leidingen	Groot	Klein

groot = > 2 jr (oplopend tot 15 jr); beperkt = max. 2 jr; klein = < 1 jr
* Inherent aan locatie waar de golven/stroming, erosie/sedimentatie plaatsvindt
** Uitzondering hierop is bijvoorbeeld het baggeren in de vaargeul bij Ameland, dat frequenter plaatsvindt

Samenvattend is uit tabel 4-2 af te leiden dat een aantal typen menselijke activiteiten extra aandacht verdienen bij vervolgonderzoek omdat ze op 1) grote tot middelgrote schaal plaatsvinden en in laag dynamisch en dus kwetsbaar gebied voorkomen, en 2) met hoge frequentie voorkomen. Het gaat hierbij om de garnalenvisserij en tracés waar intensief gebaggerd wordt en in mindere mate om de mosselzaadvisserij, periodiek baggeronderhoud en storten van baggerspecie. Ook kabels en leidingen komen meer en meer voor, en hebben een grote impact in laagdynamische gebieden. Deze activiteiten zouden in relatie tot de natuurlijke dynamiek getoetst kunnen worden (zie ook aanbevelingen hoofdstuk 5).

Vergelijking natuurlijke en menselijke beroering per type systeem en aard van de beroering

Natuurlijke bodemberoering in de vorm van stroming, golven, erosie en sedimentatie is inherent aan het systeem op een bepaalde locatie. De effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering zijn daardoor verweven met elkaar. Uit de literatuurstudie blijkt dat de vergelijking tussen natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering op twee manieren zinvol kan zijn:

1. de effecten van menselijke beroering onderzoeken in zowel gebieden met lage als hoge natuurlijke bodemdynamiek ingedeeld op basis van stroming, golven, erosie-sedimentatie (d.w.z. laag versus hoog dynamisch).

2. de effecten van menselijke beroering en natuurlijke bodemdynamiek (in de vorm van het 'event' storm) onderzoeken binnen hetzelfde type habitatsubsysteem (hoog/laag dynamisch). Hierbij wordt rekening gehouden met het feit dat de habitatsubsystemen onderling sterk verschillen en ook anders reageren.

Bij beide vergelijkingen is het ook van belang om rekening te houden met de aard van de beroering. Om te voorkomen dat er een onjuiste vergelijking wordt gemaakt ('appels en peren vergelijken') is het van belang alleen een vergelijking te maken van typen natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering die met een vergelijkbare frequentie plaatsvinden, in hetzelfde type systeem aangrijpen en een zelfde mate van impact hebben op de bodem (voor zover dat te bepalen is). De clustering, van zowel aard als type habitatsubsysteem, is hiervoor reeds besproken en weergegeven in tabel 4-2.

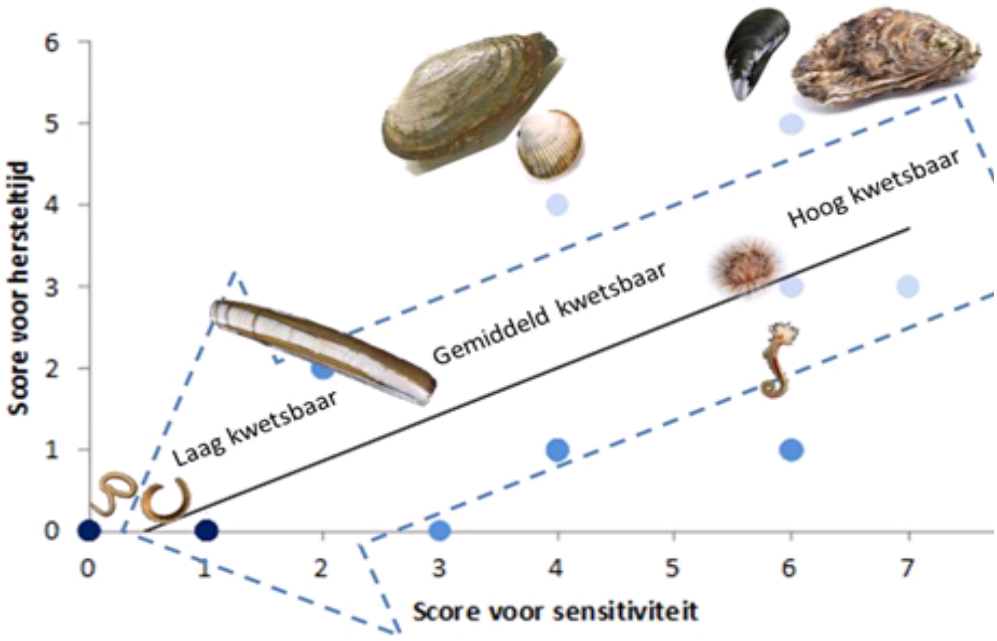
Uit tabel 4-2 blijkt dat niet alle vergelijkingen zomaar kunnen worden gemaakt. Zandsuppleties en zandwinning vinden bijvoorbeeld grotendeels plaats in gebieden met hoge natuurlijke bodemdynamiek en worden op beperkte schaal en frequentie uitgevoerd, terwijl een mogelijke natuurlijke 'tegenhanger' in de vorm van ijsgang (ook met lage frequentie en lokaal gebied) enkel in (ondiep) laag dynamisch gebied voorkomt. Een vergelijking is ook lastig omdat de aard van de verstoring ook maakt dat er relatief weinig goed onderzoek is gedaan en het onderzoek meer exploratief beschrijvend van aard is.

Uit tabel 4-2 blijkt dat er één vergelijking tussen een natuurlijke vorm van bodemberoering ('event') en een menselijke vorm bij uitstek gemaakt kan worden en dat is die tussen storm en garnalenvisserij. Stormen zijn matig invasief, met een frequentie van meerdere malen per jaar op grote schaal (met lokale effecten). Garnalenvisserij kent ook een matige vorm van beroering met (oppervlakkige) omwoeling/schuring van de bodem, en komt op grote schaal voor, met variabele frequentie (met delen minder dan 1 keer bevist per jaar en delen tot meer dan 15 keer bevist per jaar). Zowel effecten van stormen als garnalenvisserij kunnen binnen één subsysteem onderzocht worden waardoor de verhouding tussen menselijke bodemberoering en natuurlijke bodemdynamiek inzichtelijker wordt. Deze vergelijking is bovendien een relevante, omdat er vaak gesproken wordt over het vergelijkbare effect dat storm en garnalenvisserij op de bodem zouden hebben. In de volgende paragraaf (§4-3) wordt deze vergelijking verder uitgewerkt.

Box. 4.1 Aanhoudende bodemberoering zorgt voor verschuiving in soortensamenstelling

Zoals hierboven beschreven is de mate van bodemberoering (intensiteit), met frequentie en schaal bepalend voor de mate van het effect. Zo ook voor het effect op sensitieve soorten en herstel. Herhaaldelijke bodemberoering kan tot een afname leiden van gemeenschappen met kwetsbare soorten. Omdat er voor de Waddenzee geen lange termijn studies beschikbaar zijn over het effect en herstel van lichte vs. zware en herhaaldelijke bodemberoering op bodemdiergemeenschappen is hiervoor teruggegrepen op informatie over de bodemvisserij in de Noordzee(kustzone), beschreven in bijlage 5.

Bij toenemende frequentie van bodemvisserij nemen hoog kwetsbare (sensitieve en langzaam herstellende) soorten, zoals filterende schelpdieren en sessiele organismen, steeds verder af, terwijl minder kwetsbare soorten (zoals aaseters en zich ingravende organismen) geen trend laten zien (Tillin et al. 2006). Aanhoudende menselijke bodemberoering, zoals in dit geval bodemvisserij, in een gebied met hoog kwetsbare soorten kan daardoor leiden tot een verschuiving naar een bodemgemeenschap met laag kwetsbare soorten (die zijn aangepast aan hoge natuurlijke dynamiek en een korte hersteltijd hebben) (zie figuur 4-2, waarbij de pijl staat voor aanhoudende bodemberoering). Ook natuurlijke bodemdynamiek kan, bijvoorbeeld in een jaar met veel stormen, leiden tot een verandering in soortensamenstelling van de bodemdiergemeenschap, doordat bijvoorbeeld mosselbanken -met geassocieerde fauna- uit een bepaald gebied verdwijnen (Smaal et al. 2013 & 2014).



Figuur 4 2 Relatie tussen hersteltijd (hoge score, lange hersteltijd, laag herstellend vermogen) en sensitiviteit (hoge score, hoge gevoeligheid) voor bodemberoering voor de meest voorkomende soorten in het sublitoraal van de Waddenzee. NB. sommige punten staan voor meer dan één soort (gelijke scores). In kleur is de relatie met natuurlijke dynamiek weergegeven. In donkerblauw soorten die in een gemiddeld tot hoog dynamisch gebied leven, in blauw soorten die leven in een gemiddeld dynamisch gebied en in lichtblauw soorten die kunnen leven in een laag tot gemiddeld dynamisch gebied. Onder invloed van aanhoudende menselijke dan wel natuurlijke beroering (pijl) wordt verwacht dat de soortensamenstelling verschuift langs de lijn van hoog kwetsbare naar minder kwetsbare soorten met een kortere hersteltijd.

De soortensamenstelling van een bodemdiergemeenschap verandert dus over een glijdende schaal onder invloed van de mate van beroering in het systeem (figuur 4-2). De beroering kan zowel van menselijke activiteiten als van natuurlijke bodemdynamiek afkomstig zijn. Daarbij is er een logische samenhang tussen sensitiviteit en hersteltijd. Hoog kwetsbare gemeenschappen (in een laag tot gemiddeld dynamisch gebied) hebben relatief veel tijd nodig om te herstellen. Een vergelijkbaar conceptueel model is in §3.4.1 getoond (figuur 3-15), waarbij Krause et al. (2010) laten zien dat na verstoring van de bodem (in dit geval zandwinning) verschillende soortgroepen op een verschillend tempo herstellen. De hoog kwetsbare soorten hebben daarbij de langste hersteltijd en de niet-kwetsbare soorten herstellen het snelst. Aanhoudende bodemberoering kan de soortensamenstelling doen verschuiven van hoog kwetsbare naar laag kwetsbare soorten met een korte hersteltijd (zie bijvoorbeeld §3.1.1 Biotiek; §3.3.2 Tulp et al. 2020; §3.4.1 Van Dalfsen et al. 2000, Krause et al. 2010).

4.3 Vergelijking storm versus garnalenvisserij[4]

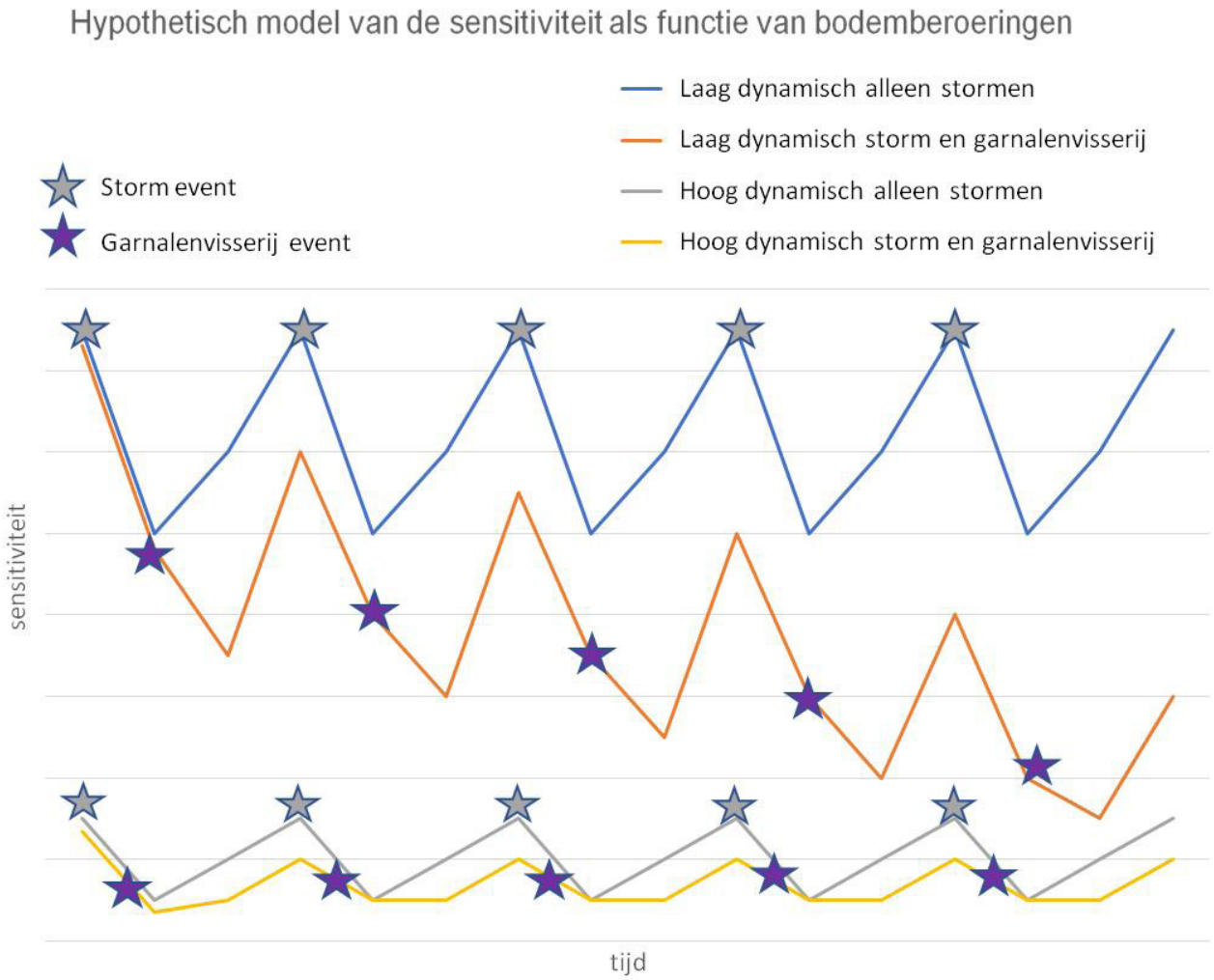
In deze paragraaf doen wij een beschouwelijke exercitie om de effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering met elkaar te vergelijken. Zowel stormen als garnalenvisserij kunnen meerdere malen per jaar en op grote schaal voorkomen, waarbij sprake is van matige beroering. Het gaat er met deze vergelijking puur om inzichtelijk te maken hoe menselijke beroering zich kan verhouden tot natuurlijke bodemdynamiek in de Waddenzee en wat voor invloed frequentie (in combinatie met intensiteit) en mogelijk ook cumulatie daarop hebben. In dit kader is het van belang om niet naar het effect van een incidentele beroering te kijken, maar naar het effect van een aantal beroeringen over een langere periode van tijd.

Zowel na een storm (§3.2.1) als na garnalenvisserij (§3.3.2) is er sprake van een afname van de biomassa, met name van sensitieve soorten als mosselen en aangehechte soorten zoals zakpijpen en anemonen. Opportunistische soorten, zoals borstelwormen, kunnen juist in aantallen toenemen na een storm (Corte et al. 2017; Herkul et al. 2011). Ook na garnalenvisserij blijken opportunistische, mobiele soorten, zoals de Amerikaanse zwaardschede, het beviste gebied te kunnen koloniseren (Tulp et al. 2020). Er is bekend dat bij een toename in frequentie van de bodemberoering de sensitieve soorten steeds verder afnemen (zie voorgaande paragraaf). Ecologisch gezien is er door bodemberoering (door menselijke of natuurlijke oorzaak) sprake van een verschuiving naar een pionierecosysteem. Hoewel er nog veel kennis ontbreekt over hersteltijden is het duidelijk dat zowel na storm als na garnalenvisserij er sprake is van enige tijd die nodig is om te herstellen.

In figuur 4-3 is het hypothetisch, kwalitatief model weergegeven van de vergelijking tussen het effect van storm en van garnalenvisserij, uitgedrukt in sensitiviteit (d.w.z. aanwezigheid van gevoelige soorten) in verschillende habitats (gebaseerd op informatie uit H2 en H3). In de figuur is met een ster een 'event' aangeduid: een blauwe ster voor een storm en een paarse ster voor garnalenvisserij (d.w.z. passage met garnalentuig). De verschillende lijnen in figuur 4-3 geven het verloop van de sensitiviteit van de bodemdiergemeenschap weer, verdeeld in een laag dynamisch systeem (blauwe en oranje lijn) en een hoog dynamisch systeem (grijze en gele lijn).

Wanneer de informatie uit figuur 4-3 gecombineerd en geïnterpreteerd wordt, is te zien dat er met regelmatige tussenpozen (bijvoorbeeld elke winter) sprake is van een storm 'event'. De sensitiviteit van de bodemdiergemeenschap neemt als gevolg daarvan af, maar herstelt na verloop van tijd ook weer (sensitiviteit neemt weer toe). Wanneer er naast dat storm 'event' ook sprake is van garnalenvisserij (paarse ster) is er in feite een toegenomen frequentie van beroering van de zeebodem (cumulatie). Als gevolg daarvan neemt de sensitiviteit verder af (oranje lijn) en duurt het langer voor het systeem weer is hersteld. Wanneer de bodemberoering door storm en garnalenvisserij na een bepaald tijdsinterval steeds weer terugkeren, zal er op enig moment niet meer voldoende tijd zijn voor het systeem om weer volledig te herstellen. In plaats daarvan zal het systeem langzaam aan veranderen in een pionierachtige fase met een lagere sensitiviteit (en opportunistische, mobiele, snel reproducerende soorten). Dit fenomeen zal in laag dynamische systemen (blauwe en oranje lijn) sterker spelen dan in hoog dynamische systemen, die al een lage sensitiviteit en korte hersteltijd hebben (grijze en gele lijnen in figuur 4-3). Hierdoor valt in hoog dynamische gebieden de impact van stormen en garnalenvisserij mogelijk binnen de natuurlijke bandbreedte van de dynamiek. Het hoog dynamisch systeem in dit hypothetisch model kan iedere keer weer voldoende herstellen.

[4] De review van de Waddenacademie (zie bijlage 1) zegt het volgende: “De deskundigen plaatsen vraagtekens bij de vergelijking van de impact van garnalenvisserij versus het effect van stormen. Zij hebben moeite met de wijze waarop de conclusie wordt geformuleerd maar hebben ook twijfels over het nut van de vergelijking omdat het vaak juist om cumulatieve effecten zal gaan”.



Figuur 4 3. Hypothetisch model van de sensitiviteit (= aanwezigheid van kwetsbare soorten) irt beroeringen in verschillende habitats. De blauwe en oranje lijn staan voor laag dynamische systemen, de grijze en gele lijn voor hoog dynamische. De grijze sterren geven stormen aan; de paarse sterren visserij activiteit (garnalenvisserij). Op de y-as staat de sensitiviteit van het systeem, waarbij de 'begin sensitiviteit' lager is in hoog dynamisch gebied.

Bij dit hypothetisch model is een kanttekening echter op zijn plaats: hoewel het belangrijk is om de effecten van menselijke beroering in de juiste context te plaatsen, garandeert dit niet dat extra verstoring door de menselijke beroering geen tot weinig consequenties heeft in hoog dynamische gebieden, omdat de menselijke beroering wel degelijk een toegevoegde bron van sterfte kan zijn. Dit sluit aan bij enkele bevindingen in de literatuur. Er zijn studies die laten zien dat elke verdere intensivering van de bodemvisserij, in een toch al zwaar beroerd gebied, weinig extra effect heeft op de benthische gemeenschap (bv. Hiddink et al. 2007). Er zijn echter ook studies die laten zien dat ook dan gemeenschappen nog gevoelig kunnen reageren op beroering (Reiss et al. 2009). Hoewel het dus waarschijnlijk is dat menselijke beroering vooral negatieve gevolgen zal hebben voor habitats en gemeenschappen in gebieden met lage natuurlijke beroering, zou het onjuist zijn om negatieve effecten als gevolg van menselijke beroering in gebieden met een hoge natuurlijke dynamiek uit te sluiten.

Dus, storm en garnalenvisserij hebben vergelijkbare effecten. Echter, hoewel beide typen beroering meerdere malen per jaar en op grote schaal voor kunnen komen, waarbij sprake is van matige beroering, is de bodemberoering door garnalenvisserij additioneel aan de natuurlijke bodemberoering. Door deze 'cumulatie' kan garnalenvisserij ervoor zorgen dat het bodemleven onvoldoende tijd heeft te herstellen en bij herhaling met name gevoelige bodemdiergemeenschappen in laag dynamische gebieden kan veranderen in een pioniergemeenschap (met opportunistische, kortlevende soorten), waarbij o.a. langlevende schelpdierbanken verdwijnen.

4.4 Belangrijkste bevindingen

- Aanhoudende menselijke bodemberoering kan op een vergelijkbare manier (dus qua type effect) inwerken op een systeem als natuurlijke bodemberoering: beide typen beroering faciliteren opportunistische soorten. De impact hangt af van de frequentie en mate van aanwezige dynamiek van de beroering.

- Effecten van menselijke bodemberoering zijn groter in laag dynamische gebieden dan in hoog dynamische gebieden, daarbij is het effect ook afhankelijk van de intensiteit, frequentie en ruimtelijke schaal van beroering.

- Het is zinvol om natuurlijke en menselijke bodemberoering te vergelijken die qua ruimtelijke schaal en frequentie met elkaar overeenkomen. In een beschouwelijke exercitie is uitgelegd dat de meest betekenisvolle vergelijking die tussen natuurlijke storm en menselijke garnalenvisserij is.

- Een hypothetische koppeling van de sensitiviteit (aanwezigheid van kwetsbare soorten) aan bodemberoering in verschillende habitats, suggereert dat een steeds terugkerende menselijke bodemberoering, additioneel aan de natuurlijke beroering van storm, in een laag dynamisch systeem kan leiden tot een verschuiving van een sensitieve naar een minder sensitieve levensgemeenschap en daardoor ook tot het verlies van karakteristieke soorten (zoals schelpdierbanken) die een lange hersteltijd hebben, en dus een verarming van de bodemfauna kan bewerkstelligen.

- Er is nog weinig feitelijk experimenteel onderzoek gedaan waarbij de effecten van natuurlijke bodemdynamiek als storm en menselijke bodemberoering als garnalen visserij zijn gemeten en onderling zijn vergeleken. De belangrijkste beperking is dat er nauwelijks plekken zijn waar geen menselijke bodemberoering is, en waar natuurlijke 'achtergrond' condities vergelijkbaar zijn (d.w.z. zelfde sedimenttype, stroming e.d.).

5. Kennisleemten en onderzoeksaanbevelingen

De voorliggende review heeft als doel het opstellen van een overzicht van bestaande kennis over de primaire effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering op de morfologie en biotiek in de sublitorale Waddenzee, evenals het vergelijken van de verschillende typen bodemberoering. De review bestaat uit verschillende onderdelen, die in separate hoofdstukken zijn behandeld. In dit hoofdstuk benoemen we de kennisleemten en de daaruit voortvloeiende onderzoeksaanbevelingen.

5.1 Kennisleemten

Naar ons inzicht ontbreekt er gedegen kennis op de volgende punten:

- Er is tot op heden onvoldoende experimenteel onderzoek gedaan in de Waddenzee om een gedegen vergelijking te kunnen maken tussen de effecten van menselijke bodemberoering versus natuurlijke bodemdynamiek. Vaak zijn er maar enkele parameters uit ons afwegingskader onderzocht met een beperkte ruimtelijke en temporele schaal.

- Systeemkennis van het sublitoraal van de Waddenzee is schaars of is (deels) aanwezig maar niet in samenhang bijeengebracht. Er is nog veel onbekend over de soortenverspreiding (kwantitatieve data), maar ook over de natuurlijke bodemdynamiek. Vaak zijn de gegevens niet volledig, alleen modelmatig berekend of zijn maar enkele parameters, zoals wij die hebben benoemd in ons afwegingskader, onderzocht.

- Referentiegebieden in de Waddenzee ontbreken. Er is weinig bekend over de situatie zonder bodemberoering, d.w.z. er is geen goede referentiesituatie beschikbaar in de Waddenzee, omdat de Waddenzee een lange geschiedenis kent van bodemberoering. Wel is het mogelijk om te onderzoeken wat effecten zijn in gebieden met een lage versus hoge intensiteit van menselijke bodemberoering en in laag en hoog dynamische gebieden in de Waddenzee, maar dit is tot op heden (nog) niet veel gedaan.

- Over sommige activiteiten is relatief veel gedegen wetenschappelijke kennis (o.a. boomkorvisserij met wekkerkettingen, mosselzaadvisserij en -kweek), over andere juist weinig (garnalenvisserij, schelpenwinning en verspreiding van baggerspecie). Het zijn vaak ook bepaalde locaties (zoals Noordzee) waar veel studies zijn uitgevoerd, terwijl op bepaalde locaties weinig studies zijn (Waddenzee). Kennis van deze activiteiten op verschillende locaties ontbreekt.

- In studies over effecten van menselijke bodemberoering op de Waddenzee wordt (bijna) geen onderscheid gemaakt tussen gebieden die laag of hoog dynamisch zijn, terwijl dit sterk de impact kan beïnvloeden.

- Lange en middellange termijnstudies zijn schaars of ontbreken. Dergelijke studies zijn wel nodig om te begrijpen of en waarom effecten optreden, en hoe die effecten doorwerken in het systeem en hoe herstel optreedt. Dergelijke studies zijn ook alleen mogelijk als de kennisstructuur aanwezig is.

- Er is weinig zicht op de effecten van cumulatie en de doorwerking van bodemberoering op systeemniveau (secundaire effecten: vooral naar de hogere trofische niveaus).

- Voor wat betreft effecten van bodemberoering op de planktonhuishouding lag daar in deze review niet de focus op. Toch is er bij de bespreking van effecten door ijsbedekking en bij simulatiestudies over bedekking door sediment kort benoemd dat beroering zowel positieve als negatieve effecten op het fytoplankton kan hebben. Ook hier kan sprake zijn van een kennisleemte.

Algemeen geldende conclusies, zoals hierboven benoemd, zijn op basis van de voorliggende review alleen met gepaste voorzichtigheid te trekken. De ruimtelijke en temporele variatie in de effecten is te groot om specifieke conclusies voor deelgebieden te trekken of om kwantitatieve vergelijkingen van de effecten te maken.

In onze aanbevelingen sluiten wij aan op deze kennisleemten om met de kennis die er al wel is concrete vervolgstappen te maken of om inzichtelijk te maken welke kennis nog extra nodig is. Op basis van deze kennis kunnen vervolgens maatregelen worden genomen.

Daarbij benoemen we dat allereerst een duidelijke visie (of streefbeeld) van de onderwaternatuur in de Waddenzee nuttig is, omdat deze -wanneer breed gedragen- kan bijdragen aan beleid en beheer. Naast goed onderzoek en monitoring kan een duurzame visie het wellicht mogelijk maken in de praktijk bezig te gaan, met als focus de kracht van de natuur zelf: 'leren door laten' (d.w.z. niet teveel zelf proberen te herstellen op kleine schaal, maar de Waddenzee de rust en ruimte te gunnen om te herstellen).

5.2 Aanbevelingen

We weten dat de Waddenzee een dynamisch gebied is, waar van nature beroering is van de bodem door verschillende natuurlijke factoren. Er vinden complexe interacties plaats tussen soorten, hun natuurlijke omgeving en menselijk gebruik. Deze interacties variëren sterk in tijd en ruimte waardoor oorzaak-gevolg relaties moeilijk vast te stellen en te kwantificeren zijn. Stroming door getij en wind, erosie en sedimentatieprocessen, bodemschuifspanning en korrelgrootte zijn o.a. door modellen in kaart gebracht. Het is echter lastig deze gegevens te koppelen aan daadwerkelijke 'effecten' en invloeden van natuurlijke bodemdynamiek op de morfologie en biotiek. Daar liggen onzekerheden. Om die onzekerheden weg te nemen zou de huidige kennis van het sublitoraal, die er wel is, beter bijeen kunnen worden gebracht op ruimtelijke en temporele schaal (aanbeveling 1). Modellen zouden daarbij getoetst kunnen worden met veldwaarnemingen. Daarbij kunnen gegevens nog inzichtelijker worden door middel van statistische modellen (habitat mapping / suitability modellen), waarbij kaartgegevens kunnen worden gecombineerd, zodat zichtbaar wordt waar hoog gevoelige soorten leven, waar verschillende leefgebieden zijn en waar huidige bodemberoerende activiteiten plaatsvinden (aanbeveling 4). Vragen als wat de effecten zijn van menselijke bodemberoering bovenop de al van nature aanwezig bodemberoering en hoe ze zich tot elkaar verhouden, zijn middels het samenvoegen van informatie wellicht ook beter te beantwoorden.

Er is enerzijds veel bekend over effecten van menselijke bodemberoerende activiteiten, omdat er over bepaalde onderwerpen / gebieden veel studies zijn gedaan. Zo is bodemberoering door bodemvisserij (met wekkerkettingen) op de Noordzee veelvuldig bestudeerd evenals mosselzaadvisserij in de Waddenzee. Maar anderzijds liggen er onzekerheden bij bodemberoerende activiteiten die minder veelvuldig zijn bestudeerd, zoals schelpenwinning en de verspreiding van baggerspecie, of bij bodemberoerende activiteiten waarbij er een matige vorm van bodemberoering is en het effect sterk lijkt en/of niet goed los te koppelen is van de natuurlijke bodemdynamiek (zoals garnalenvisserij). Om onzekerheden te verminderen zou meer onderzoek naar deze activiteiten kunnen plaatsvinden, met een goede proefopzet (aanbeveling 5), in gebieden met verschillende dynamiek (aanbeveling 2) en van langere duur, in ook gesloten gebieden zodat ook herstel en doorwerking naar hogere trofische niveaus bestudeerd kunnen worden (aanbeveling 3).

In deze review blijkt op basis van het hypothetisch model (H4) van de sensitiviteit (aanwezigheid van kwetsbare soorten) in relatie tot bodemberoeringen in verschillende habitats, dat de steeds terugkerende bodemberoering door garnalenvisserij, additioneel aan storm in een laag dynamisch systeem bijdraagt aan de verschuiving van een sensitieve naar een minder sensitieve levensgemeenschap en het bijbehorende verlies van karakteristieke soorten (zoals schelpdierbanken), die een lange hersteltijd hebben.

Hieronder volgt een nadere toelichting bij elke aanbeveling:

1. Huidige (nog niet gepubliceerde) kennis van het sublitoraal bijeen brengen op een ruimtelijke en temporele schaal

Er is nog veel onbekend over het sublitorale deel van de Waddenzee, maar er is ook veel al wel bekend. Recent is bijv. door het NIOZ het sublitorale bodemleven in de gehele Waddenzee in kaart gebracht (Waddenmozaïek) en er zijn meerdere modelstudies die de abiotiek (deels) op een rij hebben gezet. Ook zijn er visserij gerelateerde studies (gaande), zoals die van WMR (o.a. Innopro -onderzoek naar innovatie en rendementsverbetering mosselproductie; en andere kennisvragen omtrent mosselkweek), die nieuwe inzichten opleveren. Deze kennis is nog niet volledig gepubliceerd en daarom nog niet in onze review meegenomen. Daarnaast zijn er ook relatief veel gegevens van het menselijke gebruik in de Waddenzee, zoals de visserijdruk. Deze kennis ligt echter verspreid bij verschillende instituten en bedrijven. Door het bijeen brengen van alle beschikbare kennis ontstaat er een beter overzicht van welke gegevens nog missen of waar bijv. modelstudies nog kunnen worden aangevuld en gevalideerd met veldmetingen. Deze gegevens kunnen vervolgens gebruikt worden voor het beantwoorden van meerdere vragen: hebben er bijvoorbeeld verschuivingen plaatsgevonden in de bodemvisserij in ruimte en tijd en wat is de relatie tussen de bodemschuifspanning en het voorkomen van benthos in de Waddenzee? Daarnaast kunnen monitoringsgegevens worden gebruikt voor habitat mapping en habitat suitability analyses en voor vergelijkingen tussen menselijke en natuurlijke bodemberoering (zie ook aanbeveling 3 en 4).

2. Effecten van bodemberoering bestuderen in gebieden met verschillende dynamiek

Om de conclusies uit deze review beter te kunnen onderbouwen is meer onderzoek nodig naar effecten van verschillende typen bodemberoering in verschillende dynamische systemen. Daarvoor hoeven er niet eens perse nieuwe onderzoeken te worden opgestart, maar moeten gegevens wel op een onderscheidende manier worden / zijn verzameld. Zo is er van de zandsuppletie bij de Prins Hendrikzanddijk (aangehaald in §3.5.1) bekend dat ontwikkeling van het gebied na suppletie verschillend verloopt op locaties met laag vs. hoge natuurlijke dynamiek. Echter hier is nog geen (grijze) literatuur van verschenen, maar dit is wellicht voor vervolgonderzoek wel bruikbaar.

Voor baggeren geldt dat In de toekomst de uitvoeringswijze mogelijk geoptimaliseerd kan worden, zowel om het baggervolume als het effect op de ecologie te beperken. Daarbij spelen innovaties in de scheepvaart ook een belangrijke rol (door bijvoorbeeld ondieper te varen is een deel van het baggeren wellicht niet nodig). Afhankelijk van de aanwezige dynamiek, kan mogelijk het gebruik van verschillende baggertechnieken de effecten op ecologie reduceren (bijv. hoog dynamisch-opwoelen en op stroom gezet, laag dynamisch-opzuigen en verspreiding in hoog dynamisch gebied). Hetzelfde geldt voor het storten van sediment/slib. Verspreidingslocaties zijn momenteel strak vastgelegd maar mogelijk zijn er, afhankelijk van de dynamiek, voor de natuur betere oplossingen. Dit dient nader onderzocht te worden.

Ook van reeds verzamelde gegevens van bijvoorbeeld het NIOZ (SIBES / Waddenmozaïek) en MWTL-data (Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands) van Rijkswaterstaat zou bekeken kunnen worden of deze onderscheidend genoeg zijn om meer te zeggen over de verspreiding van soorten gekoppeld aan dynamiek en dit op kaart zichtbaar te maken.

3. Grootschalige en langdurige monitoring, met onderzoek naar hogere trofische niveaus

Meerdere studies over de effecten van bodemberoering laten zien dat vooral ecologische processen langzaam kunnen verlopen of dat levensgemeenschappen lange tijd nodig hebben om te herstellen met daarbij veel (ruimtelijke) variatie. Daarbij grijpen effecten in op het systeem en werken ook door op hogere trofische niveaus. Het is daarom belangrijk om monitoring op grote ruimtelijke schaal plaats te laten vinden en langdurig vol te houden (om ook kennis over cumulatie van effecten in beeld te krijgen), evenals het gesloten houden van gebieden waar onderzoek plaatsvindt. Het gesloten

houden van gebieden voor menselijke bodemberoering is ook noodzakelijk voor behoud van verschillende natuurwaarden in verschillende (hoog / laag dynamische) gebieden, zoals o.a. het Natura 2000 beheerplan Waddenzee en PAGW behoud en herstel van onderwaternatuur beogen.

Een goede mogelijkheid om de doorwerking van effecten naar hogere trofische niveaus helder te krijgen zijn bijvoorbeeld de lange termijn studies naar vogels die het wad exploiteren en gelden als 'sentinels' voor systeemveranderingen. Lange termijn studies van het gebruik van de Waddenzee in tijd en ruimte gekoppeld aan demografische parameters van de betrokken populaties kunnen inzicht verschaffen in veranderingen in het systeem, gekoppeld aan bepaalde gebeurtenissen. Het is van groot belang dergelijke studies aan te gaan om systeemveranderingen tijdig te signaleren, en te kunnen begrijpen.

4. Systematische benadering d.m.v. statistische modellering en toetsing met waarnemingen

Monitoring en modellering van de abiotiek en biotiek kunnen gebruikt worden om een beter begrip te krijgen van de effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke beroering in de Waddenzee. Figuur 5-1 geeft een voorbeeld van een kaartoverzicht van de gegevens die gebruikt kunnen worden om statistische modellen op te stellen om de relaties tussen de verspreiding van benthos, de plaatselijke natuurlijke dynamiek en de intensiteit van menselijke bodemberoering te onderzoeken.

Met behulp van modellen kan een theoretische referentiesituatie zonder menselijke beroering berekend worden, bijv. voor de bodemschuifspanning. En aangezien bodemschuifspanning gecorreleerd is aan de aanwezigheid van benthos (zie hoofdstuk 3), kan ook zonder kennis van het geassocieerde bodemleven onderzocht worden of de invloed van menselijke beroering op het bodemleven de mate van natuurlijke beroering overstijgt in frequentie en 'beroerd' areaal. Dit kan helpen omdat in veel gebieden in de Waddenzee al decennia lang gevist wordt en niet meer is te achterhalen wat de originele samenstelling is van de benthische gemeenschap.

Maar bij dergelijke modellen wordt veelvuldig gebruik gemaakt van aannames en in de modellen kunnen complexe interacties vaak niet worden meegenomen (Diesing et al. 2013). Het verdient daarom de aanbeveling om modeluitkomsten, voor zover mogelijk, te valideren met empirische data (bijv. met soortverspreiding en abiotische condities in het veld in gebieden waar met zekerheid te zeggen is dat er al lange tijd geen menselijke bodemberoering plaatsvindt).

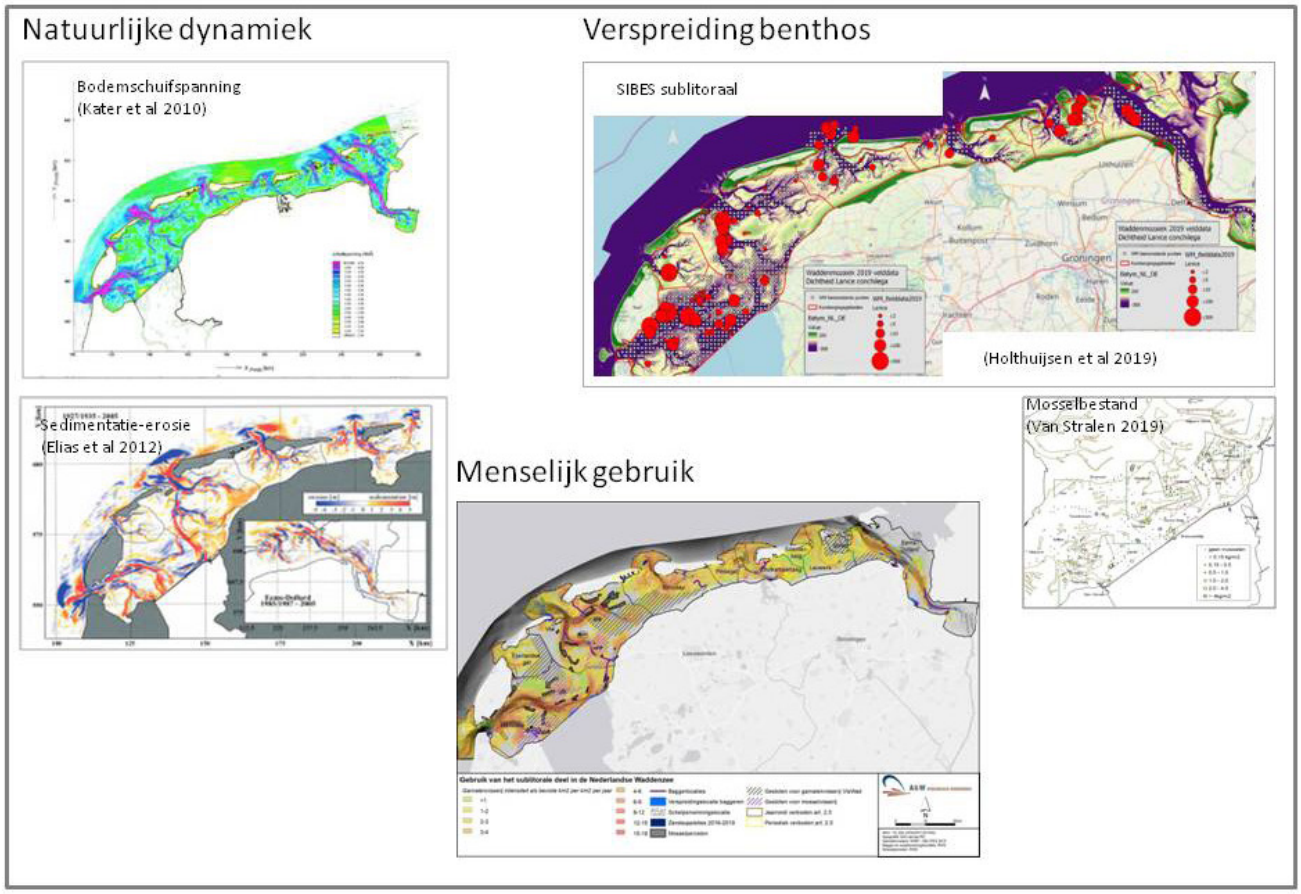
Statistische modellen kunnen vervolgens op verschillende manieren gebruikt worden:

1. Met behulp van habitat mapping en habitat suitability modellen kan in kaart worden gebracht waar waardevolle en sensitieve gebieden liggen en waar geschikte leefgebieden voor waardevolle en sensitieve soorten liggen (o.a. Hiddink et al. 2007, Lauria et al. 2015, Folmer et al. 2017, Rijnsdorp et al. 2018; Van der Zee et al. 2017). In 2017 hebben Van der Zee et al. (2017) een online viewer ontwikkeld (in opdracht voor Programma naar een Rijke Waddenzee) met daarin verschillende aanklikbare kaartlagen voor potentiële regio's voor sublitorale natuurwaarden. Er blijkt al veel informatie bij veel verschillende onderzoekers / instituten te zijn, maar door dit te combineren en te visualiseren, wordt het product bruikbaarder (https://natwad.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=9aa558eae6034819b40bd61590b0c68f). Deze viewer zou heel goed uitgebreid kunnen worden, ook met de bodemberoerende activiteiten die in de Waddenzee plaatsvinden. Het kan inzicht geven in waar in de huidige 'door mensen beroerde' situatie waardevolle gebieden liggen, maar het kan ook inzicht geven in waar kansen liggen voor waardevolle natuur om zich te ontwikkelen en herstellen als menselijke bodemberoering wordt uitgesloten of beperkt.

2. De verspreiding van benthos kan ruimtelijk vergeleken worden in gebieden met lage en hoge dynamiek (bijv. d.m.v. de gemodelleerde bodemschuifspanning). Vervolgens kan binnen die gebieden een vergelijking gemaakt worden van de verspreiding van benthos bij een lage frequentie en hoge frequentie van menselijke

bodemberoering (bijv. d.m.v. van de garnalenvisserij-intensiteit) (o.a. van Denderen et al. 2015, Diesing et al. 2013). Door de range aan menselijke beroerings-intensiteiten en natuurlijke beroering-intensiteiten te vergelijken, kan er een inschatting gemaakt worden van de kans dat menselijke bodemberoering de natuurlijke beroering overschrijdt.

Hiermee ondersteunen dergelijke studies de ontwikkeling van ruimtelijke beheerplannen in de Waddenzee, zoals (evaluatie van) Natura 2000 beheerplan en PAGW (Programmatische Aanpak Grote Wateren) herstel onderwaternatuur.



Figuur 5-1. Overzicht van enkele voorbeelden van data die gebruikt kunnen worden voor statistische analyses ter ontwikkeling van het begrip van de effecten van natuurlijke en menselijke beroering op de abiotiek en biotiek in de Waddenzee.

5. Gebruik maken van BACI studies

Om effecten van menselijke en natuurlijke beroering beter te kunnen duiden, wordt aanbevolen om experimenten op te zetten waarbij oorzaak-gevolg relaties in detail worden onderzocht. Hierbij is het belangrijk dat deze experimenten op dezelfde ruimte- en tijdsschaal worden opgezet als de ecologische en abiotische processen die bestudeerd worden. Naast wetenschappelijke experimenten, kunnen ook al geplande ingrepen in de Waddenzee bijdragen aan kennisontwikkeling. Het is hierbij van belang om geplande ingrepen (o.a. zandsuppleties, kabels aanleggen, zoutwinning etc.) op te zetten volgens het zogenaamde BACI-principe: Before-After Control-Impact. Hierbij worden metingen voor en na de uitvoering van de ingreep gecombineerd met metingen in representatieve controlegebieden. Op deze manier kan er geleerd worden van ingrepen, maar kan er anderzijds ook geëxperimenteerd worden met sluitingen van gebieden en kan er geleerd worden van sluitingsmaatregelen. Voorwaarde hiervoor is wel dat dergelijke studies voldoende onderscheidend vermogen moeten hebben (grote ruimtelijke schaal met voldoende controle en impact gebieden), een vaste set aan indicatoren bevatten en moeten ze lang genoeg gemonitord worden om effecten te kunnen detecteren.

6. Bevindingen

Volgend uit hoofdstuk 2:

- In totaal zijn voor deze review 210 bronnen geselecteerd en opgeslagen met relevante onderwerpen voor de huidige studie, waaronder 97 effectstudies, 6 meta-analyses, 21 modelstudies, 36 reviews en 53 bronnen vallende onder een andere categorie (d.w.z. beschrijvende studie, proefschrift, notitie, boek). Voor de 'evidence based' analyse zijn 60 studies geselecteerd (zie uitleg hierboven) op basis van onderwerp, impact factor en betrouwbaarheid en relevantie; waaronder 56 effectstudies, 2 meta-analyse en 2 modelstudies.

- Uit de inventarisatie van de beschikbare literatuur blijkt dat er te weinig studies met voldoende onderscheidend vermogen zijn gedaan in de Waddenzee om alleen voor dit gebied een gedegen vergelijking van natuurlijke bodemdynamiek vs. menselijke bodemberoering te maken (zie ook figuur 2-8). Dat was op voorhand al enigszins verwacht. Het is om die reden dat ook de literatuur uit andere gebieden onderzocht is. Het betekent helaas wel dat wij een algemene vergelijking in deze review niet kunnen baseren op kennis die alleen over de Waddenzee gaat.

- Uit de inventarisatie van de beschikbare literatuur blijkt dat er geen vaste set van indicatoren is die in alle studies is bekeken. Doordat er in iedere studie weer andere indicatoren zijn gebruikt bestaat het risico dat er 'appels en peren' vergeleken worden.

- Door het gebruik van het afwegingskader met daarin een logische ordening van de indicatoren is het toch mogelijk om tot een beschrijving van effecten te komen op basis van de beschikbare literatuur. In het afwegingskader is speciale aandacht gegeven aan drie overkoepelende indicatoren: bodemschuifspanning, sensitiviteit en herstel.

- Er is een integrale overzichtkaart gemaakt waarin is aangegeven waar welke type menselijke bodemberoering in de Waddenzee optreden. Sommige gebieden worden tot wel 20 keer per jaar beroerd.

- Er is een overzichtskaart gemaakt van de locatie van verschillende onderzoeken (uit door ons geanalyseerde bronnen) in de Waddenzee naar de effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering.

Volgend uit hoofdstuk 3:

- Natuurlijke bodemdynamiek is van grote invloed op de bodemstructuur en (daarmee) de samenstelling van de bodemdiergemeenschap:

    - In hoog dynamische gebieden, met overwegend een hoge bodemschuifspanning, grote korrelgrootte, lage slibfractie en erosie, leven bodemdieren die aan deze omstandigheden zijn aangepast door o.a. hun verschijningsvorm (meer robuust) en levenswijze (snel reproducerend, korte levensduur). In termen van sensitiviteit en herstel leven hier soorten die laag gevoelig zijn voor verstoring en een korte hersteltijd hebben.

    - In laag dynamische delen van het sublitoraal is overwegend een lage bodemschuifspanning aanwezig, een kleinere korrelgrootte, hogere slibfractie en vindt meer sedimentatie plaats. De bodemdiergemeenschap is meer divers en bestaat uit soorten die fragieler (kwetsbaarder) kunnen zijn en een langere levensduur (langere hersteltijd) hebben, zoals meerjarige mosselbanken.

- Storm en ijsgang zijn 'natuurlijke events' die bovenop de aanwezige natuurlijke dynamiek komen, zij het met (zeer) lage frequentie, en kunnen zorgen voor sedimenttransport en het wegslaan van schelpdierbanken. Herstel daarvan kan meerdere jaren duren.

- De meeste typen menselijke bodemberoering laten op korte termijn een afname in de dichtheid, soortenrijkdom en biomassa van benthische organismen zien en kort durende veranderingen in morfologie. Op de lange termijn (jaren) zijn deze effecten niet eenduidig en variëren sterk per type habitat en type activiteit.

- Lang levende, sessiele en filterende bodemorganismen (overwegend voorkomend in laag dynamische gebieden) vertonen de sterkste afname in reactie op natuurlijke en menselijke bodemberoering en hebben een langere hersteltijd;

- Van de menselijke bodemberoerende activiteiten hebben extractie en bedekking lokaal de grootste impact, omdat deze de morfologie en biotiek ter plaatse zeer sterk kunnen beïnvloeden, afhankelijk van lokale hydrodynamiek. Volledig herstel van gevoelige soorten duurt lang (>meerdere jaren). Echter, deze activiteiten vinden overwegend met lage frequentie en op kleine schaal plaats, terwijl visserijactiviteiten (met een lichtere omwoeling/schuring) een veel hogere frequentie hebben en op veel grotere schaal plaatsvinden. Mogelijk kunnen de lichtere vormen van menselijke bodemberoering daarom netto toch evenveel of meer impact op de sublitorale zeebodem hebben dan extractie en bedekking.

- Door het gebruik van het afwegingskader met daarin een logische ordening van de indicatoren is het mogelijk gebleken om tot een beschrijving van effecten te komen op basis van de beschikbare literatuur. Bij de uitwerking is gebleken dat het onderscheid in het afwegingskader tussen diep en ondiep in de literatuur relatief weinig gemaakt wordt terwijl het onderscheid tussen hoog en laag dynamisch vaker gemaakt wordt. Tegen deze achtergrond zullen we in het vervolg van de analyses dit onderscheid tussen hoog en laag dynamisch als leidend hanteren.

Volgend uit hoofdstuk 4:

- Aanhoudende menselijke bodemberoering kan op een vergelijkbare manier (dus qua type effect) inwerken op een systeem als natuurlijke bodemberoering: beide typen beroering faciliteren opportunistische soorten. De impact hangt af van de frequentie en mate van aanwezige dynamiek van de beroering.

- Effecten van menselijke bodemberoering zijn groter in laag dynamische gebieden dan in hoog dynamische gebieden, daarbij is het effect ook afhankelijk van de intensiteit, frequentie en ruimtelijke schaal van beroering.

- Het is zinvol om natuurlijke en menselijke bodemberoering te vergelijken die qua ruimtelijke schaal en frequentie met elkaar overeenkomen. In een beschouwelijke exercitie is uitgelegd dat de meest betekenisvolle vergelijking die tussen natuurlijke storm en menselijke garnalenvisserij is.

- Een hypothetische koppeling van de kwetsbaarheid van soorten aan bodemberoering in verschillende habitats, suggereert dat een steeds terugkerende menselijke bodemberoering, additioneel aan de natuurlijke beroering door het event storm, in een laag dynamisch systeem kan leiden tot een verschuiving van een sensitieve naar een ander en minder sensitieve levensgemeenschap en daardoor ook tot het verlies van karakteristieke soorten (zoals schelpdierbanken) die een lange hersteltijd hebben, en dus een verarming van de bodemfauna kan bewerkstelligen

- Er is nog weinig feitelijk experimenteel onderzoek gedaan waarbij de effecten van natuurlijke bodemdynamiek als storm en menselijke bodemberoering als garnalenvisserij zijn gemeten en onderling zijn vergeleken. De belangrijkste beperking is dat er nauwelijks plekken zijn (als referentie) waar geen menselijke bodemberoering is, en waar natuurlijke 'achtergrond' condities vergelijkbaar zijn (d.w.z. zelfde sedimenttype, stroming e.d.).

Volgend uit hoofdstuk 5:

- Over bepaalde bodemberoerende activiteiten en van specifieke gebieden is er veel kennis over de impact op de bodem. Er is echter ook nog veel onbekend. Kennisleemten hebben met name betrekking op de systeemkennis van de Waddenzee; er is onvoldoende kennis en de kennis die er is is niet goed bijeengebracht.

- Daarbij wordt in studies aan menselijke bodemberoering in de Waddenzee (bijna) geen onderscheid gemaakt tussen gebieden die laag of hoog dynamisch zijn, terwijl dit sterk de impact kan beïnvloeden.

- Vaak worden maar enkele indicatoren uit ons afwegingskader onderzocht met een beperkte ruimtelijke en temporele schaal.

- Goede referentiegebieden in de Waddenzee ontbreken en er is weinig bekend over de situatie zonder bodemberoering. Lange en middellange termijnstudies zijn schaars of ontbreken. Er is weinig zicht op de effecten van cumulatie en de doorwerking van bodemberoering op systeemniveau (vooral naar de hogere trofische niveaus).

- Aanbevelingen (voor vervolgonderzoek) laten zich vatten in de volgende punten:

    1. Huidige kennis van het sublitoraal bijeen brengen op een ruimtelijke en temporele schaal
    2. Effecten van bodemberoering bestuderen in gesloten gebieden met verschillende dynamiek
    3. Grootschalige en langdurige monitoring, met onderzoek naar hogere trofische niveaus
    4. Systematische benadering d.m.v. statistische modellering en toetsing met waarnemingen
    5. Gebruik maken van BACI studies

7. Literatuur

Agonus Fisheries Consultancy (2018). Passende beoordeling Ensisvisserij Natura 2000 gebieden Noordzeekustzone, Voordelta, Vlakte van de Raan en Westerschelde. November 2018.

ALTERRA (2005). Passende Beoordeling sublitorale mosselzaadvisserij in de westelijke Waddenzee, najaar 2005. Alterra-Texel, RIVO-Yerseke.

Andrulewicz, E., D. Napierska & Z. Otremba (2003). The environmental effects of the installation and functioning of the submarine SwePol Link HVDC transmission line: A case study of the Polish Marine Area of the Baltic Sea. In Journal of Sea Research (Vol. 49, pp. 337–345).

Arcadis (2011). Passende beoordeling voor het baggeren en verspreiden van baggerspecie in de Waddenzee. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rijkswaterstaat, Dienst Noord-Nederland, Waterdistrict Waddenzee.

Arcadis (2013). Milieueffectstudie kabels en leidingen Waddengebied. Ministerie van Economische zaken.

Arcadis (2016). Baggeren en verspreiden in de Waddenzee. Passende beoordeling - Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rijkswaterstaat.

Arcadis (2017). Zandwinning Noordzee 2018-2027. Nadere verdieping effecten Natura 2000. Arcadis & Wageningen Marine Research

Baptist, M.J., Van der Wal, J.T., De Groot, A.V., & Ysebaert, T.J.W. (2016). Ecotopenkaart Waddenzee volgens de ZES.1 typologie. Wageningen University & Research, Wageningen Marine Research rapport C103/16.

Baptist, M.J., Van der Wal, J.T., Folmer, E.O., Gräwe, U., Elschot, K. (2019). An ecotope map of the trilateral Wadden Sea. Journal of Sea Research, 152: 101761.

Beukema, J. J. & R. Dekker (2018). Effects of cockle abundance and cockle fishery on bivalve recruitment. Journal of Sea Research 140: 81-86

Bijkerk, R. (1988). Ontsnappen of begraven blijven. De effecten op bodemdieren van een verhoogde sedimentatie als gevolg van baggerwerkzaamheden. Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren.

Blomert, A. M., 2002. De samenhang tussen bodemgesteldheid, droogligtijd en foerageerdichtheid van vogels binnen de intergetijdenzone. A&W-rapport 330. Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek bv, Veenwouden

Bochert, R. & M.L. Zettler (2004). Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields. Bioelectromagnetics 25: 498-502

Boersema, M.P., J.N. Salvador de Paiva, A.M. van den Brink, L. Soissons, B. Walles, T.J. Bouma, P. Lodewijk, M. de Vet & T.J.W. Ysebaert (2018). Oesterdam sand nourishment. Ecological and morphological development of a local sand nourishment. Centre of expertise delta technology.

Bolam, S.G. (2011). Burial survival of benthic macrofauna following deposition of simulated dredged material. Environmental Monitoring and Assessment 181: 13-27

Bolam, S. G. (2014). Macrofaunal recovery following the intertidal recharge of dredged material: A comparison of structural and functional approaches. Marine Environmental Research 97: 15-29

Bouma, T.J., Olenin, S., Reise, K., Ysebaert, T. (2009). Ecosystem engineering and biodiversity in coastal sediments: posing hypotheses. Helgoland Marine Research, 63, 95-101.

Boyd, S.E., D.S. Limpenny, H.L. Rees & K.M. Cooper (2005). The effects of marine sand and gravel extraction on the macrobenthos at a commercial dredging site (results 6 years post-dredging). Ices Journal of Marine Science 62. 145-162.

Brinkman, A.G., B.J. Kater, G. Aarts & J.M.DD. Baars, (2004). Invloed van kokkelvisserij op mosselzaadval en ontwikkeling van mosselbanken in de Waddenzee. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 901. 132 p.

Buhs, F. & K. Reise (1997). Epibenthic fauna dredged from tidal channels in the Wadden Sea of Schleswig-Holstein: spatial patterns and a long-term decline. Helgolander Meeresuntersuchungen 51: 343-359

Callaway, R., G.H. Engelhard, J. Dann, J. Cotter, H. Rumohr (2007). A century of North Sea epibenthos and trawling: Comparison between 1902-1912, 1982-1985 and 2000. Marine Ecology Progress Series 346: 27-43

Capelle, J.J., M.R. Van Stralen, J.W.M. Wijsman, P.M.J. Herman, A.C. Smaal (2017). Population dynamics of subtidal blue mussels Mytilus edulis and the impact of cultivation. Aquaculture environment interactions 9: 155-168

Capelle, J. (2019). Passende Beoordeling mosselzaadvisserij zuidwestelijke Delta 2019-2022. Wageningen University & Research rapport C020/19.
Capelle, J.J. & J.W.M. Wijsman (2019). Perceelgebruik en kweekrendement mosselkweek in de Waddenzee. Helpdeskvraag KD-2019-015. Wageningen Marine Research rapport C035/19
Carvalho, S., R. Constantino, F. Pereira, R. Ben-Hamadou, M.B. Gaspar (2011). Relationship between Razor Clam Fishing Intensity and Potential Changes in Associated Benthic Communities. Journal of Shellfish Research 30(2): 309-323
Christianen, M.J.A., Holthuijsen, S., Van der Zee, E.M., Van der Eijk, A., Govers, L.L., Van der Heide, T., de Paoli, H., Olff, H. (2015). Ecotopen- en Kansrijkdomkaart van de Nederlandse Waddenzee. Waddenfondsproject Waddensleutels. Rapportnummer 2015.04.01. 106 pp.
Christianen, M.J.A., Middelburg, J.J., Holthuijsen, S.J., Jouta, J., Compton, T.J., Van der Heide, T., Piersma, T., Sinninghe Damsté, J.S., Van der Veer, H.W., Schouten, S., Olff, H. (2017). Benthic primary producers are key to sustain the Wadden Sea food web: stable carbon isotope analysis at landscape scale. Ecology, 98(6): 1498-1512.
Compton, T.J., Holthuijsen, S., Koolhaas, A., Dekinga, A., Ten Horn, J., Smith, J., Galama, Y., Brugge, M., Van der Wal, D., Van der Meer, J., Van der Veer, H.W., Piersma, T. (2013). Distinctly variable mudscapes: Distribution gradients of intertidal macrofauna across the Dutch Wadden Sea. Journal of Sea Research 82, 103-116.
Collie, J.S., S.J. Hall, M.J. Kaiser & I.R. Poiner (2000). A quantitative analysis of fishing impacts on shelf-sea benthos. Journal of Animal Ecology 69: 785-798
Colosio, F., M. Abbiati & L. Airoldi (2007). Effects of beach nourishment on sediments and benthic assemblages. Marine Pollution Bulletin 54: 1197-1206
Cooper, K M, M. Curtis, W.M.R. Wan Hussin, C.R.S. Barrio Froján, E.C. Defew, V. Nye & D.M. Paterson (2011).'Implications of dredging induced changes in sediment particle size composition for the structure and function of marine benthic macrofaunal communities. Marine Pollution Bulletin 62: 2087-2094
Corte, G.N, T.A. Schlacher, H.H. Checon, C.A.M. Barboza, E. Siegle, R.A. Coleman, A.C.Z. Amaral (2017). Storm effects on intertidal invertebrates: increased beta diversity of few individuals and species. PeerJ, DOI 10.7717/peerj.3360
CWSS (2017). Introduction. In: Wadden Sea Quality Status Report 2017. Eds.: Kloepper S. et al., Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany. Last updated 01.03.2018. Downloaded 20-05-2020. qsr.waddensea-worldheritage.org/reports/introduction
Dankers, N., H. Kühl & W.J. Wolff (1981). Invertebrates of the Wadden Sea. Stichting Veth, Balkema, Rotterdam, pp. 1–221.
Dannheim, J. & H. Rumohr (2012). The fate of an immigrant : Ensis directus in the eastern German Bight The fate of an immigrant : Ensis directus in the eastern German Bight. Helgolander Marine Research 66: 307-317
De Jonge, V.N., Essink, K., Boddeke, R. (1993). The Dutch Wadden Sea: a changed ecosystem. Hydrobiologia, 265, 45–71.
De Juan, S., S. F. Thrush & M. Demestre (2007). Functional changes as indicators of trawling disturbance on a benthic community located in a fishing ground (NW Mediterranean Sea). Marine Ecology Progress Series 334: 117-129
Dekker, R. & Drent, J. (2013). The macrozoobenthos in the subtidal of the western Dutch Wadden Sea in 2008 and a comparison with 1981-1982. NIOZ-Report 2013-5.
Deltares (2014). Ecologische effecten suppletie Ameland 2009-2012. Interim rapportage ihkv KPP B&O Kust Ecologie. Projectnummer 1207723-000-ZKS-0013. 211 p.
Dernie, K.M., M.J. Kaiser & R.M. Warwick (2003). Recovery rates of benthic communities following physical disturbance. Journal of Animal Ecology 72 (6): 1043-1056
Diesing, M., D. Stephens & J. Aldridge (2013). A proposed method for assessing the extent of the seabed significantly affected by demersal fishing in the Greater North Sea. ICES Journal of Marine Science 70(6) 1085-1096
Donker, J.J.A. (2015). Hydrodynamic processes and the stability of intertidal mussel beds in the Dutch Wadden Sea. PhD thesis, Faculty of Geosciences Utrecht University. ISSN 2211-4335. 134 pp.
Donker, J.J.A., M. van der Vegt & P. Hoekstra (2015). Erosion of an intertidal musselbed by ice- and wave-action. Continental Shelf Research 106: 60-69
Duran-Matute, M., T. Gerkema, G.J. De Boer, J.J. Nauw, U. Gräwe (2014). Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. Ocean Science, 10, 611–632.
Eigaard, O.R., F. Bastardie, M. Breen, G.E. Dinesen, N.T. Hintzen, P. Laffargue, L.O. Mortensen, J.R. Nielsen, H.C. Nilsson, F.G.O. Neill, C. Smith, T.K. Sørensen, H. Polet, D.G. Reid, A. Sala, M. Sko, O. Tully, M. Zengin, A.D. Rijnsdorp (2016). Estimating seabed pressure from demersal trawls, seines, and dredges based on gear design and dimensions. CES Journal of Marine Science 73: i27-i43
Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B. De Ronde, J. (2012). Morphodynamic development and sediment budget of the

Dutch Wadden Sea over the last century. Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw 91(3): 293 - 310
Elias, E. (2019). Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Deltares. Kenmerk 1203683-001-ZKS-0002
Essink, K. (1999). Ecological effects of dumping of dredged sediments; Options for management. Journal of Coastal Conservation 5: 69-80
Foden, J. S.I. Roger & A. P. Jones (2011). Human pressures on UK seabed habitats: a cumulative impact assessment. Marine Ecology Progress Series 428:33-47.
Folmer, E., Dekinga, A., Holthuijsen, S., Van der Meer, J., Mosk, D., Piersma, T., Van der Veer, H. (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. NIOZ-rapport, 2017(3). NIOZ: Texel. 114 pp.
Gerwing, T.G., D. Drolet, M.A. Barbeau, D.J. Hamilton, A.M. Allen (2015). Resilience of an intertidal infaunal community to winter stressors. Journal of Sea Research 97: 40-49
Glorius, S.T., I.Y.M. Tulp, A. Meijboom, L.J. Bolle and C. Chen (2018). Developments in benthos and fish in gullies located in an area closed for human use in the Wadden Sea; 2002–2016.
Gotje, W., J. Cleveringa, & M. F. De Jong (2016). Rijke onderwaterbestortingen Waddenzee. Arcadis & Programma naar een Rijke Waddenzee.
Gräwe, U., Flöser, G., Gerkema, T., Duran-Matute, M., Badewien, T.H., Schulz, E., Burchard, H. (2016). A numerical model for the entire Wadden Sea: skill assessment and analysis of hydrodynamics. Journal of Geophysical Research: Ocean. 121, 5231–5251.
Guerra-García, J.M., J. Corzo & J. Garcia-Gomez (2003). Short-term benthic recolonization after dredging in the harbour of Ceuta, North Africa. Marine Ecology 24: 217-229.
Hall, S.J., D.J. Basford & M.R. Robertson (1990). The impact of hydraulic dredging for razor clams Ensis sp. on an infaunal community. Netherlands Journal of Sea Research 27(1): 119-125.
Hendrick V.J., Z.L. Hutchison & K.S. Last (2016). Sediment Burial Intolerance of Marine Macroinvertebrates. PLoS ONE 11(2): e0149114. doi:10.1371/journal.pone.0149114
Herkül, K., J. Kotta, M. Pärnoja (2011). Effect of physical disturbance on the soft sediment benthic macrophyte and invertebrate community in the northern Baltic Sea. Boreal Environment Research 16: 209-219
Herman, P.M.J, T. van Kessel, J. Vroom, P. Dankers, J. Cleveringa, B. de Vries & N. Villars (2018). Mud dynamics in the Wadden Sea. Towards a conceptual model. Deltares. Kenmerk 11202177 -000-ZKS-0011
Hewitt, J., K. Julian & E.K. Bone (2011). Chatham–Challenger Ocean Survey 20/20 Post-Voyage Analyses: Objective 10 – Biotic habitats and their sensitivity to physical disturbance. New Zealand Aquatic Environment and Biodiversity Report No. 81
Hiddink, J. G., S. Jennings, M.J. Kaiser, A.M. Queirós, D.E. Duplisea & G.J. Piet (2006). Cumulative impacts of seabed trawl disturbance on benthic biomass, production, and species richness in different habitats. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 63: 721-736
Hiddink, J. G., S. Jennings & M. J. Kaiser (2007). Assessing and predicting the relative ecological impacts of disturbance on habitats with different sensitivities. Journal of Applied Ecology 44(2): 405-413
Hinchey, E.K., L.C. Schaffner, C.C. Hoar, B.W. Vogt & L.P. Batte (2006). Responses of estuarine benthic invertebrates to sediment burial : the importance of mobility and adaptation. Hydrobiologia 556: 85-98
Hiscock, K. & H. Tyler-Walters (2006). Assessing the Sensitivity of Seabed Species and Biotopes – The Marine Life Information Network (MarLIN). 10.1007/1-4020-4697-9_27.
Hoekstra, P., K.T. Houwman, A. Kroon & B.G. Ruessink (1996). Morphodynamic behaviour of the Terschelling shoreface nourishment; morphological changes in response to hydrodynamical and sediment transport processes and sediment characterics. Report NOURTEC. Institute for Marine and Atmospheric Research
Holthuijsen (2019). Cruise report bemonstering sublitoraal Nederlandse Waddenzee 2019. Waddenmozaïek. Cruise report nummer: 2019.06.20.01
Hunt, H. & R. Scheibling (1997). Role of early post-settlement mortality in recruitment of benthic marine invertebrates. Marine Ecology progress Series 155: 269-301
Hutchison Z.L., V.J. Hendrick, M.T. Burrows, B. Wilson & K.S. Last (2016). Buried Alive: The Behavioural Response of the Mussels, Modiolus modiolus and Mytilus edulis to Sudden Burial by Sediment. PLoS ONE 11(3): e0151471. doi:10.371/journal.pone.0151471
Jansen, H.M. & J.J. Capelle (2018). Het effect van mosselkweek op de sedimentdynamiek in de Waddenzee - Lokale effecten van mosselzaadvisserij en oogst op percelen op troebelheid en sedimentatie aan de hand van case studies.

Marine Research rapport C047/18.
Jansen, H., J. Perdon & C. Zweeden (2019). Verkenning van de aanwezigheid van rifvormende schelpdierbanken op locaties voor nieuwe mosselpercelen. Helpdeskvraag 2b in het kader van mosseltransitie (KD-2019-028). Wageningen University & Research rapport C037/19
Jennings, S. & M.J. Kaiser (1998). The effects of fishing on marine ecosystems. Advances in Marine Biology 34: 202-212
Jung, A.S., Brinkman, A.G., Folmer, E.O., Herman, P.M.J., Van der Veer, H.W., Philippart, C.J.M. (2017). Long-term trends in nutrient budgets of the western Dutch Wadden Sea (1976-2012). Journal of Sea Research, 127: 82-92.
Kaiser, M.J. & B.E. Spencer (1996). The Effects of Beam-Trawl Disturbance on Infaunal Communities in Different Habitats. Journal of Animal Ecology 65(3) 348-358
Kaiser, M.J. (1998). Significance of bottom-fishing disturbance. Conservation biology 12(6): 1230-1235
Kaiser, M. J., K. Ramsay, C. A. Richardson, F. E. Spence & A. R. Brand (2000). Chronic fishing disturbance has changed shelf sea benthic community structure. Journal of Animal Ecology 69(3): 494-503.
Kaiser, M. J., K. R. Clarke, H. Hinz, M. C.V. Austen, P. J. Somerfield & I. Karakassis (2006). Global analysis of response and recovery of benthic biota to fishing. Marine Ecology Progress Series 311: 1-14
Kater, B., Snoek, R., G., H., 2010. De relatie tussen abiotiek en macrobenthos in de Waddenzee.
Kenchington E.L., T.J. Kenchington, L-A. Henry, S. Fuller & P. Gonzalez (2007). Multi-decadal changes in the megabenthos of the Bay of Fundy: the effects of fishing. Journal of Sea Research 58: 220- 240.
Kenny, A.J. C. Jenkins, D. Wood, S.G. Bolam, P. Mitchell, C. Scougal, A. Judd (2018). Assessing cumulative human activities, pressures, and impacts on North Sea benthic habitats using a biological traits approach. ICES Journal of Marine Science 75: 1080-1092
Kogan, I., C.K. Paull, L.A. Kuhnz, E.J. Burton, S. Von Thun, H.G. Greene & J.P. Barry (2006). ATOC/Pioneer Seamount cable after 8 years on the seafloor: Observations, environmental impact. Continental Shelf Research 26: 771-787
Kohsiek, L.H.M., H.J. Buist, R. Misdorp, J.H. Berg & J. Visser (1988). Sedimentary Processes on a Sandy Shoal in a Mesotidal Estuary (Oosterschelde, The Netherlands). 10.1007/978-94-015-7762-5_16.
Krause, J.C., M. Diesing & G. Arlt (2010). The Physical and Biological Impact of Sand Extraction: a Case Study of the Western Baltic Sea. Journal of Coastal Research (special Issue) 51: 215-226
Larson, F. & K. Sundbäck (2012). Recovery of microphytobenthos and benthic functions after sediment deposition. Marine Ecology Progress Series 446: 31-44
Lauria V., A.M. Power, C. Lordan, A. Weetman & M.P. Johnson (2015). Spatial Transferability of Habitat Suitability Models of Nephrops norvegicus among Fished Areas in the Northeast Atlantic: Sufficiently Stable for Marine Resource Conservation? PLoS ONE 10(2): e0117006. doi:10.1371/journal.pone.0117006
Leopold, M.F., E.M. Dijkman, J.S.M. Cremer, A. Meijboom & P.W. Goedhart, (2004). De effecten van mechanische kokkelvisserij op de benthische macrofauna en hun habitat; Eindverslag EVA II (Evaluatie Schelpdiervisserij tweede fase. Deelproject C1/3. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 955. 146 p.
Lewis, L. J., J. Davenport & T.C. Kelly (2002). A study of the impact of a pipeline construction on estuarine benthic invertebrate communities Estuarine, Coastal and Shelf Science 55(2): 213-221
Lotze, H. K., K. Reise, B. Worm, J. van Beusekom, M. Busch, A. Ehlers, D. Heinrich, R.C., Hoffmann, P. Holm, C. Jensen, O.S. Knottnerus, N. Langhanki, W. Prummel, M. Vollmer & W. Wolff (2005). Human transformations of the Wadden Sea ecosystem through time: A synthesis. Helgoland Marine Research 59:84-95
Lotze, H.K. (2007). Rise and fall of fishing and marine resource use in the Wadden Sea, southern North Sea. Fisheries Research 87: 208-218
Mielck, F., H.C. Hass, R. Michaelis, L. Sander, S. Papenmeier & K.H. Wiltshire (2019). Morphological changes due to marine aggregate extraction for beach nourishment in the German Bight (SE North Sea). Geo-Marine Letters 39: 47-58
Mielke, L., A. Rippen & E. Wymenga (2019). Ecologische beoordeling NeuConnect kabel, inclusief passende beoordeling. A&W-rapport 2550. Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Feanwâlden.
Ministerie van Infrastructuur en Milieu & Rijkswaterstaat Noord-Nederland. (2016). Natura 2000-beheerplan Waddenzee: Periode 2016-2022. Den Haag, juli 2016. 331 pp.
Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2014). Profiel habitattype Permanent overstroomde zandbanken (H1110).
Morris, A.W. & M.J. Howarth (1998). Bed stress induced sediment resuspension. Continental Shelf Research 18(11): 1203-1213
Mulder, H.P.J.M., 2019. Prognose baggervolumes voor RWS in de Waddenzee vanaf 2019, memo versie 19 maart 2019. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, 35 pp

Pejrup, M. & T.J. Andersen (2000). The influence of ice on sediment transport, deposition and reworking in a temperate mudflat area, the Danish Wadden Sea. Continental Shelf Research 20: 1621-1634.
Perk, L. (2019). Expert morfologisch advies bodemberoering Waddenzee. WaterProof B.V. Kenmerk. WP2019_1195_P1r0
Piersma, T., A. Koolhaas, A. Dekinga, J.J. Beukema, R. Dekker & K. Essink (2001). Long-term indirect effects of mechanical cockle-dredging on intertidal bivalve stocks in the Wadden Sea. Journal of Applied Ecology 38: 976-990
Polet, H. & J. Depestele (2010). Impact assessment of the effects of a selected range of fishing gears in the North Sea. ILVO technisch visserijonderzoek.
Programma Rijke Waddenzee (2011). Advies Meerjarenafspraken handkokkelvisserij in de Waddenzee. Juni 2011. 39 p.
Reiss, H., S.P.R. Greenstreet, K. Sieben, S. Ehrich, G.J. Piet, F. Quirijns, L. Robinson, W.J. Wolff & I. Kröncke (2009). Effects of fishing disturbance on benthic communities and secondary production within an intensively fished area. Marine Ecology Progress Series 394: 201-213
Rijkswaterstaat (1989). Wadatlas. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat. Dir.-Gen. Scheepvaart en Maritieme Zaken, December. 1989.
Rijkswaterstaat (2019). Morfologische uitgangspunten Vaarweg Ameland. Achtergronddocument bij de lange termijn oplossingsrichtingen bereikbaarheid Ameland 2030. December 2019.
Rijnsdorp, A.D., S.G. Bolam, C. Garcia, J.G. Hiddink, N.T. Hintzen, P.D. van Denderen & T. van Kooten (2018). Estimating sensitivity of seabed habitats to disturbance by bottom trawling based on the longevity of benthic fauna. Ecological Applications 28(5): 1302-1312
Rodil, I.F. & M. Lastra (2004). Environmental factors affecting benthic macrofauna along a gradient of intermediate sandy beaches in northern Spain. Estuarine, Coastal and Shelf Science 61: 37-44
Schans, H. H.P.J. Mulder & J. de Vlas (2003). Opvulsnelheid, gedrag en effect van schelpenwinputten in de Waddenzee. Vervolgonderzoek Schelpenwinning. Rijkswaterstaat Directie Noord-Nederland.
Schellekens, T., V. Escaravage, K. Goudswaard, M. van Asch & J. Craeymeersch (2013). Garnalenvisserij experiment Voordelta. IMARES rapport C154/14
Smaal A.C., J. Craeymeersch, J. Drent, J.M. Jansen, S. Glorius & M.R. van Stralen (2013). Effecten van mosselzaadvisserij op sublitorale natuurwaarden in de westelijke Waddenzee: samenvattend eindrapport. Rapport C006/13 PR1
Smaal, A.C., A.G. Brinkman, T. Schellekens, J. Jansen, M.R. van Stralen, M.R. & A. Agüera (2014). Ontwikkeling en stabiliteit van sublitorale mosselbanken, samenvattend eindrapport. IMARES Wageningen Marine Research Rapport C066.14
Smit, M.G.D., J.E. Tamis, R.G. Jak, C.C. Karman, G. Kjeilen-Eilertsen, H. Trannum, J. Neff (2006). Threshold levels and risk functions for non-toxic sediment stressors: burial, grain size changes and hypoxia. Summary . ERMS report no.9. TNO 2006-DH-0046/A
Staats, N., E. de Deckere, B. Kornman, W. van der Lee, R. Termaat, J. Terwindt & B. de Winder (2001). Observations on
Suspended Particulate Matter (SPM) and Microalgae in the Dollard Estuary, The Netherlands : Importance of Late Winter Ice Cover of the Intertidal Flats
Strasser , M., T. Reinwald & K. Reise (2001). Differential effects of the severe winter of 1995/96 on the intertidal bivalves Mytilus edulis, Cerastoderma edule and Mya arenaria in the Northern Wadden Sea. Helgolander Marine Research 55: 190-197
Sweco (2017). Winning ophoogzand Noordzee 2018 t/m 2027. Milieueffectrapportage. 18 december 2017. Projectnummer 351935. 552 p.
Taormina, B., J. Bald, A. Want, G. Thouzeau, M. Lejart, N. Desroy & A. Carlier (2018). A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. Renewable and Sustainable Energy Reviews 96: 380-391
Thistle, D. (1981). Natural physical disturbances and communities of marine soft bottoms. Marine ecology progress series 6: 223-228.
Tillin, H. M., J. G. Hiddink, S. Jennings & M. J. Kaiser (2006). Chronic bottom trawling alters the functional composition of benthic invertebrate communities on a sea-basin scale. Marine Ecology Progress Series 318: 31-45
Troost, K., M. van Stralen, J. Craeymeersch, D. van den Ende & M. van Asch (2018). Ontwikkeling van bodemdieren in voor mosselzaad- en garnalenvisserij gesloten gebieden in de westelijke Waddenzee. Evaluatie na drie jaar monitoring. Wageningen Marine Research rapport C013/18.
Troost, K, D. van den Ende, M. van Asch & M. van Stralen (2019). Ontwikkeling en verspreiding van schelpdieren en andere bodemdieren in het sublitoraal van de westelijke Waddenzee in de periode 1992-2017. Wageningen Marine Research rapport C001/20

Tuck, I. D., N. Bailey, M. Harding, G. Sangster, T. Howell, N. Graham, M. Breen (2000). The impact of water jet dredging for razor clams, Ensis spp., in a shallow sandy subtidal environment. Journal of Sea Research 43(1): 65-81

Tulp, I., T.C. Prins, J.A.M. Craymeersch, S. IJff & M.T. Van der Sluis (2019). Syntheserapport PMR NCV. Wageningen Marine Research: C014/18. Deltares: 1230156-000-ZKS-0004

Tulp, I, S. Glorius, A. Rippen, D. Looije & J. Craeymeersch (2020). Dose-response relationship between shrimp trawl fishery and the macrobenthic fauna community in the coastal zone and Wadden Sea. Journal of Sea Research 156

Tyler-Walters, H. , S. Rogers, C. Marshall & K. Hiscock (2009). A method to assess the sensitivity of sedimentary communities to fishing activities. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems. 19. 285 - 300.

Van Bemmelen, R., B. Brinkman, S. Holthuijsen & J.Jansen (2012). The effects of subtidal mussel seed fisheries in the Dutch Wadden Sea on sediment composition. IMARES Wageningen Marine Research rapport nummer C163/12

Van Colen, C., F. Montserrat, K. Verbist, M. Vincx, M. Steyaert, J. Vanaverbeke, P.M.J. Herman, S., Degraer & T. Ysebaert (2009). Tidal flat nematode responses to hypoxia and subsequent macrofauna-mediated alterations of sediment properties. Marine Ecology Progress Series, 381: 189- 197.

Van Dalfsen, J.A., K. Essink, H. Toxvig Madsen, J. Birklund, J. Romero, & M. Manzanera (2000). Differential response of macrozoobenthos to marine sand extraction in the North Sea and the Western Mediterranean. ICES Journal of Marine Science, 57: 1439–1445

Van den Bogaart, L, R. van Hal, M. van der Meijden, S. Brasseur, M. Baptist & J. Wijsman (2019). De ecologie van het Amelander Zeegat. Een inventarisatie naar kennis over het ecologische functioneren van het Amelander Zeegat. Wageningen Marine Research rapport C032/19

Van Denderen, P.D., S.G. Bolam, J.G. Hiddink, S. Jennings, A. Kenny, A.D. Rijnsdorp & T. Van Kooten (2015). Similar effects of bottom trawling and natural disturbance on composition and function of benthic communities across habitats. Marine Ecology Progress Series 541: 31-43

Van der Heide, T., Van Nes, E.H., Van Katwijk, M.M., Olff, H., Smolders, A.J.P. (2011). Positive feedbacks in seagrass ecosystems: evidence from large-scale empirical data. Plos One, 6(1): 1-7.

Van der Meer, J. N. Dankers, B. Ens, M. van Stralen, K. Troost & A.M. Waser (2018). The Birth, Growth and Death of Intertidal Soft-Sediment Bivalve Beds: No Need for Large-Scale Restoration Programs in the Dutch Wadden Sea. Ecosystems 22: 1024–1034

Van der Veer, H. W., M. J.N. Bergman, & J.J. Beukema (1985). Dredging activities in the Dutch Wadden Sea: effects on macrobenthic infauna. Netherlands Journal of Sea Research 16 (2): 183-190

Van der Werf, J., J. Reinders & A. van Rooijen (2013). Evaluatie Galgeplaat proefsuppletie 2008-2012. Deltares 1206994-000

Van der Zee, E., A. Rippen & J. Latour (2017). Natuurwaarden Sublitorale Waddenzee. A&W-rapport 2292. Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Feanwâlden.

Van Duren, L.A., T. van Kessel, A.G. Brinkman, A. de Kluijver, F. Fey & C.A. Schmidt (2015). Verkenning Slibhuishouding Waddenzee. Een samenvatting van twee jaar modelleren en kennis verwerven. Deltares, IMARES & Rijkswaterstaat.

Van Kessel, T. (2015). Opzet en toepassing slibmodel Waddenzee. Deltares 1220102-000

Van Stralen, M., D. van den Ende & K. Troost (2019). Inventarisatie van het sublitorale wilde mosselbestand in de westelijke Waddenzee in het voorjaar van 2019. MarinX rapport 2019.187

Vergouwen, S. A. en H. Holzhauer (2016). Ontwikkeling van het bodemleven in de vooroever na aanleg van een onderwatersuppletie. Case studie Ameland en Schiermonnikoog 2009-2014. Delft, Deltares 1220040-008

Verhagen, R. (2013). MER-beoordelingsrapportage schelpenwinning t.b.v. vergunningverlening Ontgrondingenwet RWS NN. Projectnummer 0245364.09. April 2013. 77 p.

Vorberg, R. (2000). Effects of shrimp fisheries on reefs of Sabellaria spinulosa (Polychaeta). ICES Journal of Marine Science 57: 1416-1420

Vrooman, J., van Sluis, C., van Hest, F., (2018). Gebiedsbescherming op de Nederlandse Noordzee. De stand van zaken in relatie tot visserij. Stichting De Noordzee, Utrecht

Wan Hussin, W.M.R., K.M. Cooper, C.R.S.B. Froján, E.C. Defew, D.M. Paterson (2012). Impacts of physical disturbance on the recovery of a macrofaunal community: A comparative analysis using traditional and novel approaches. Ecological Indicators 12: 37-45

Waye-Barker, G.A., P. Mcilwaine, S.. Lozach, K.M. Cooper (2015). The effects of marine sand and gravel extraction on the sediment composition and macrofaunal community of a commercial dredging site (15 years post-dredging). Marine Pollution Bulletin 99: 207-215.

Wells, R.J.D., J.H. Cowan, W.F. Patterson (2008). Habitat use and the effect of shrimp trawling on fish and invertebrate communities over the northern Gulf of Mexico continental shelf. ICES Journal of Marine Science 65: 1610-1619

Wijsman, J., D. van den Ende & E. Brummelhuis (2018). Bodemdiergemeenschap in de vooroever en op het natte strand van de Zandmotor in het najaar 2017; Datarapport. Wageningen Marine Research rapport C073/18

Wolff, W.J. (1973). The estuary as a habitat. An analysis data on the softbottom macrofauna of the estuariene area of the rivers Rhine, Meuse, and Scheldt. In: Zoologische Verhandelingen, No. 126. Delta instituut voor hydrobiologisch onderzoek, Rapport 106

Zwarts L, (1991). Mosselbanken: wadvogels op een kluitje. Vogels 66: 8–12.

Zwarts, L., W. Dubbeldam, H. van de Heuvel, E. van de Laar, U. Menke, L. Hazelhoff & C.J. Smit (2004). Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee. RIZA rapport 2004.028

Bijlage 1. Review Waddenacademie

Aan	Programma naar een rijke Waddenzee (PRW)
Van:	Waddenacademie
Datum:	1 december 2020
Betreft:	Review studie impact bodemberoering Waddenzee door Altenburg en Wybenga

Inleiding
Op 13 augustus 2020 heeft PRW in de persoon van Sonja van der Graaf het door Altenburg & Wybenga opgestelde conceptrapport *Review effecten natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering in de sublitorale Waddenzee* ter informatie aangeboden aan de Waddenacademie, opdat de Waddenacademie zich alvast zou kunnen buigen over wie dit rapport zouden kunnen reviewen. Naar aanleiding van de bespreking hiervan in de directievergadering van de Waddenacademie op 19 augustus 2020 is er door de Waddenacademie contact opgenomen met PRW. Dit heeft ertoe geleid dat op 23 september PRW (in de personen van Sonja van der Graaf en Lies van Nieuwenburgh) en de Waddenacademie (in de personen van Piet Hoekstra, Katja Philippart en Klaas Deen) met elkaar gesproken hebben over het conceptrapport en de wijze van review. Dit overleg heeft ertoe geleid dat aan het conceptrapport een voorwoord is toegevoegd met daarin hoofddoelen en achtergronden van de opdracht, toelichting bij het proces en de inbedding in het bredere programma van PRW en wat binnen deze kaders de belangrijkste bevindingen worden geacht.

De te beantwoorden vragen
PRW heeft de Waddenacademie gevraagd om het rapport van A&W te beoordelen met specifieke aandacht voor de volgende punten:

- Of deze review een adequaat overzicht geeft over de in de literatuur aanwezige kennis van voor de Waddenzee relevante ecologische en morfologische effecten van menselijke en natuurlijke bodemberoering en zo niet, welke kennisvelden nog ontbreken.
- Of de volgende kernbevindingen van het rapport voldoende onderbouwd zijn:
  - Er is een verschil in de bodemsoortensamenstelling tussen hoog- en laag-dynamische sublitorale gebieden in de Waddenzee. De hoog-dynamische gebieden zijn vooral de grote getijgeulen, in het algemeen relatief dichtbij de zeegaten. De laag-dynamische gebieden bevinden zich in de kleinere geulen, de wantijen en meer richting de kust van het vaste land.

- In de laag-dynamische gebieden bevinden zich soorten die gevoeliger zijn en langzamer herstellen dan in de hoog dynamische gebieden.
- De gevolgen van een gelijke aard en mate van menselijke bodemberoering zullen (daardoor) in het algemeen groter zijn in laag-dynamische gebieden, waar immers soorten leven die sensitiever zijn en een langere hersteltijd hebben.
- Extractie (zoals baggeren en schelpenwinning) en bedekking (zoals zandsuppletie en verspreiding baggerspecie) hebben lokaal de grootste impact.
- De effecten van de natuurlijke bodemdynamiek door storm en de menselijke beroering door garnalenvisserij lijken vergelijkbaar.
- In laag-dynamische gebieden is niettemin de kans groter dat frequente beroering herstel verhindert en de bodemgemeenschap zich ontwikkelt naar één die meer kenmerkend is voor meer dynamische gebieden.

Door de Waddenacademie gevolgde procedure
De Waddenacademie heeft drie deskundigen die niet bij het rapport van A&W betrokken waren gevraagd om het rapport te beoordelen met specifieke aandacht voor de door PRW naar voren gebrachte punten.
Deze drie deskundigen zijn:
Dr. Theo Gerkema, senior onderzoeker fysische oceanografie (NIOZ);
Dr. Valerie Reijers, universitair docent kustecologie (Universiteit Utrecht);
Dr. Ad van der Spek, senior onderzoeker kustgeologie (Deltares).

Hun oordelen zijn als bijlagen bij deze review opgenomen.
Met PRW is de afspraak gemaakt dat de review van de Waddenacademie integraal in het eindrapport van A&W wordt opgenomen.

Beantwoording van de vragen

Vraag 1. Geeft de review een adequaat overzicht van de in de literatuur aanwezige kennis van de voor de Waddenzee relevante ecologische en morfologische effecten van menselijke en natuurlijke bodemberoering en zo niet, welke kennisvelden ontbreken nog?

Antwoord: De drie deskundigen stellen onafhankelijk van elkaar vast dat de auteurs van het rapport erin zijn geslaagd om een bewonderenswaardige hoeveelheid rapporten en artikelen te hebben verwerkt. Hier past een compliment aan de auteurs. Dit laat evenwel onverlet dat tegelijkertijd ook wordt vastgesteld dat de review niet systematisch lijkt te zijn uitgevoerd en dat het onduidelijk is hoe de literatuurlijst is

verkregen. Het is derhalve niet mogelijk om te beoordelen of de literatuurlijst volledig is.

Vraag 2. Zijn een aantal kernbevindingen van het rapport voldoende onderbouwd?

Antwoord: Hoewel de deskundigen hier en daar een kritische kanttekening plaatsen, lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat de kernbevindingen van het rapport in voldoende mate zijn onderbouwd.

Conclusies

1. Het rapport maakt een goede start met het kaart brengen van het probleem en probeert daar waar mogelijk zaken te kwantificeren. De verschillende natuurlijke en menselijke activiteiten die verantwoordelijk zijn voor bodemberoering worden uitvoerig beschreven en gekarakteriseerd op basis van hun impact (frequentie, schaal en intensiteit). Ook is voor de 26 meest voorkomende bodemdieren van de Waddenzee – en op basis van de literatuurbronnen - een afwegingskader opgesteld.

2. De opgave om een vergelijking te maken tussen de natuurlijke dynamiek van de bodem en die ten gevolge van menselijk handelen is om verschillende reden op dit moment feitelijk nog een brug te ver:
- Ten aanzien van een aantal zaken is de beschikbare kennis nog te beperkt. Denk hierbij aan gebied brede en meerjarige kennis van de soortensamenstelling en dynamiek van het sublitorale deel van de Waddenzee. Maar ook de invloed van golven op het kunnen identificeren van laag- en hoogenergetische gebieden, naast en in aanvulling op de invloed van het getij.
- Er is maar een zeer beperkt aantal studies beschikbaar die de directe effecten van menselijke bodemverstoring hebben onderzocht.

3. De reproduceerbaarheid van de huidige literatuurstudie zou gebaat zijn bij een duidelijk beschreven systematische aanpak, waarin bijvoorbeeld duidelijk wordt ingegaan op de gebruikte zoektermen, de criteria voor in-/uitsluitsel en het aantal resultaten.

4. De deskundigen plaatsen vraagtekens bij de vergelijking van de impact van garnalenvisserij versus het effect van stormen. Zij hebben moeite met de wijze waarop de conclusie wordt geformuleerd maar hebben ook twijfels over het nut van de vergelijking omdat het vaak juist om cumulatieve effecten zal gaan.

5. De indeling in laag- en hoog-dynamische delen is klaarblijkelijk volledig gebaseerd op modelresulaten van een getijmodel (de deskundige verwijst naar een studie van Baptist et al., 2019). Daarbij

blijft het effect van golven buiten beschouwing. Echter in de navolgende analyse wordt maar zeer beperkt aandacht besteed aan de effecten van het getij en gaat de aandacht vooral uit naar het effect van stormen en daarmee golven.

6. Onder invloed van stroming en golven kan ook sprake zijn van een verandering in sedimentsamenstelling en sedimentologische opbouw van het sediment in het sublitoraal. Ook dit heeft gevolgen voor organismen.

waddenacademie

Bijlage 1 Oordeel dr. Theo Gerkema

In dit rapport wordt op basis van de beschikbare literatuur een vergelijking gemaakt tussen de effecten van bodemberoering door menselijk handelen en de natuurlijke bodemdynamiek, voor het sublitorale deel van de (Nederlandse) Waddenzee.

De auteurs hebben een groot aantal publicaties in hun studie verwerkt, wat niet wegneemt (maar dit valt de auteurs vanzelfsprekend niet aan te rekenen) dat de literatuur grote hiaten bevat, zoals bijvoorbeeld op p. 56 opgemerkt m.b.t. de effecten van stormen op het sublitoraal in de Waddenzee. Illustratief is ook de kaart op p. 27, die slechts een drietal studies weergeeft over natuurlijke bodemberoering (lichtblauwe stip), waarvan dan nog twee ver in de Eems-Dollard, die niet representatief zijn voor de Waddenzee als geheel.

De literatuur is bovendien heterogeen voor wat betreft de gemeten of gemodelleerde parameters, wat onderlinge vergelijking veelal bemoeilijkt. Om deze reden hebben de auteurs drie globaal representatieve indicatoren geselecteerd (bodemschuifspanning, sensitiviteit en hersteltijd), aan de hand waarvan ze de effecten inventariseren; dit is m.i. een verdedigbare keuze.

Daarnaast hebben de auteurs het sublitoraal opgedeeld in hoog- en laagdynamische delen. Dit is gedaan op basis van een studie van Baptist et al. (2019), zoals weergegeven in de figuur op p. 2; de scheidslijn ligt bij een stroomsnelheid van 0.8 m/s. Dit betreft de maximale dieptegemiddel-de stroming bij springtij op basis van een modelberekening van de jaren 2009-2011. Deze specificatie baseer ik op Baptist et al.; gezien de centrale rol van het onderscheid tussen hoog- en laagdynamische gebieden in het rapport, was vermelding hiervan ook in het rapport op z'n plaats geweest. Dit geldt in nog sterkere mate voor een wezenlijk voorbehoud dat Baptist et al. maken (in hun artikel op p. 8): "We expect that by including wave action more areas will be classified as 'high dynamic', specifically shallow locations that generally have low current velocities but can have high wave orbital velocities." Het punt is dat het gebruikte model (GETM) niet standaard gekoppeld is aan een golfmodel (hoewel dit in principe wel mogelijk is, maar eerder voor een klein domein, gezien de extra rekentijd). Het betekent dat de stromingen die bepalend zijn voor het hier gehanteerde onderscheid tussen hoog- en laagdynamisch primair van de getijden komen (met nog een deel dat windgedreven is, maar zonder de golfwerking).

In het vervolg van de studie ligt de focus echter niet zozeer op de getijden alswel op het effect van stormen; desondanks blijft de eerdere indeling van hoog- en laagdynamisch gehanteerd worden. De auteurs onderkennen overigens wel het belang van extra schuifspanning door orbitaalsnelheden van windgolven, bijvoorbeeld met het tonen van de figuur op p. 42 (van Donker, 2015), die de 95e percentiel waarde weergeeft. Idealiter zou men alle effecten tezamen beschouwen (dus een combinatie van de getijden,

windgedreven stroming en golfwerking), en op basis daarvan hoog- en laagdynamische gebieden onderscheiden, maar zulke kaarten zijn (bij mijn weten) nog nooit gemaakt.

Het is overigens duidelijk dat het samenstellen van zulke kaarten conceptueel ingewikkeld is. Terwijl de getijden een zich min of meer herhalend fenomeen zijn, en zich dus lenen voor een enkele representatieve kaart, ligt dit bij de hoog-variabele windgedreven golven anders. Niet alleen varieert de wind in richting en sterkte op tijdschalen van uren, dagen, en seizoenen, maar zelfs de interjaarlijkse variabiliteit van het windklimaat is aanzienlijk. Intussen is de windrichting bepalend voor welke delen van de (sublitorale) Waddenzee aan golven worden blootgesteld, en ook dit zal dus op al deze tijdschalen variëren. Men zou dan in kaarten minimaal het onderscheid moeten maken tussen de lange-termijn mediane toestand, en bijvoorbeeld de gemiddelde toestand tijdens stormen uit de voorkomende richtingen.

Al met al is dus niet duidelijk welk deel (en hoe groot) van de sublitorale Waddenzee bij een storm uit een bepaalde richting zodanig door golven beïnvloed wordt dat het effecten heeft op de bodem of benthos. Aangezien stormen de extreme waarden representeren, zitten deze dus ook niet in het op p. 42 gereproduceerde figuur (dat zoals gezegd de 95e percentiel waarde weergeeft). Overigens is ook niet a priori duidelijk vanaf welke windsterkte de gevolgen voor de bodem of benthos significant zijn. De auteurs leggen de grens m.i. vrij hoog (bij windkracht 9, dwz storm, p. 52); het is denkbaar dat ook golven bij windkracht 7 of 8 al een effect hebben.

In lijn met het voorgaande benadrukken de auteurs herhaaldelijk dat er nog (veel) te weinig bekend is over de effecten van stormen op de sublitorale bodem en benthos; om enkele voorbeelden te citeren:

“Uit de inventarisatie van de beschikbare literatuur blijkt dat er te weinig studies met voldoende onderscheidend vermogen zijn gedaan in de Waddenzee om alleen voor dit gebied een gedegen vergelijking van natuurlijke bodemdynamiek vs. menselijke bodemberoering te maken” (p. 40)

“Er is nog veel onduidelijk over wat zich tijdens stormen afspeelt op de zeebodem van de Waddenzee.” (p. 52)

“In deze literatuurstudie was het aantal bronnen over effecten van storm op de bodemmorfologie, schaars. Er is geen studie gevonden over de Waddenzee.” (p. 53)

“Specifieke kennis, in de vorm van kwantitatieve data, over (directe) effecten van storm op het sublitoraal van de Waddenzee ontbreekt.” (p. 56)

Ik citeer uitvoerig omdat deze (terechte!) voorbehouden lijken te preluderen op de kennelijk onvermijdelijke conclusie dat een vergelijking tussen de

natuurlijke bodemdynamiek en de menselijke bodemberoering op basis van de huidige kennis niet gemaakt kan worden. Het is dan ook verrassend dat de auteurs niettemin tot een conclusie komen (p. 99/100). De bevindingen worden op uiteenlopende wijze geformuleerd. In de meest algemene zin: “De effecten van natuurlijke bodemdynamiek en menselijke beroering op de bodemstructuur en samenstelling van de bodemfauna zijn vergelijkbaar.” (p. 4) Hierin zit een (hinderlijke) ambiguïteit, want “vergelijkbaar” kan zowel betekenen dat de grootheden zich lenen voor een onderlinge vergelijking als dat ze ongeveer even groot zijn. Kennelijk is dat eerste bedoeld, want uiteindelijk wordt de bevinding toegespitst op een meer specifiek geval: “storm en garnalenvisserij hebben vergelijkbare effecten” (p. 104), nader bepaald door de overeenkomstige “matige beroering” en lage frequentie (enkele malen per jaar).

In de tabel waar de auteurs deze conclusie op baseren (Tabel 4-2, p. 99), wordt het onderscheid hoog- en laagdynamisch gehanteerd, waar ik in het voorgaande al kanttekeningen bij geplaatst heb. Verder wordt het begrip “matige beroering” gehanteerd. De auteurs benadrukken dat de vergelijkingen slechts kwalitatief bedoeld zijn, maar niettemin worden door het gebruik van zulke begrippen, en de gemaakte vergelijkingen per se, de grenzen van wat binnen een kwalitatieve beschouwing mogelijk is, wel erg opgerekt. De genoemde conclusie te trekken, is m.i. dan ook niet verdedigbaar.

Overigens benadrukken de auteurs zeer terecht dat de effecten hoe dan ook cumulatief zijn; mochten de natuurlijke en menselijke effecten in bepaalde gevallen inderdaad van gelijke orde zijn, dan betekent dit effectief dat door menselijk toedoen een verdubbeling van de verstoring ontstaat, met mogelijke gevolgen voor hersteltijd enz. Maar, zoals de auteurs signaleren (p. 36): “Ondanks deze studies is er toch te weinig literatuur en kennis beschikbaar om cumulatieve effecten in ruimte en tijd in de Nederlandse Waddenzee op een gedegen manier mee te nemen in het afwegingskader.”

Afgezien van de hier gemaakte kanttekeningen, vormt het rapport naar mijn mening over het geheel genomen een uitvoerige en zorgvuldige synthese van de literatuur, die bovenal de kennishiaten helder in beeld brengt.

Door een voortzetting van de monitoring in het sublitoraal, kan in de toekomst wellicht een verschil geïdentificeerd worden tussen jaren met veel of weinig stormen, wat bij kan dragen aan een kwantificering van de effecten van een storm. Verder is van belang het onderscheid tussen hoog- en laagdynamische gebieden beter in kaart te brengen aan de hand van hydrodynamische modellen, met inachtneming van de verschillende tijdschalen waarop de variabiliteit van windkracht en -richting zich manifesteert.

waddenacademie

Bijlage 2 Oordeel dr. Valerie Reijers

De literatuurstudie, uitgevoerd door Altenburg en Wymenga in opdracht van Rijkswaterstaat en Programma naar een Rijke Waddenzee, brengt nationale en internationale literatuur samen om te onderzoeken hoe menselijke bodemberoering zich verhoudt tot natuurlijke bodemdynamiek binnen het permanent ondergedoken deel van de Waddenzee. Om deze effecten te analyseren zijn er een viertal doelstellingen opgesteld: het verzamelen en opstellen van een overzicht van beschikbare kennis, het ontwikkelen van een afwegingskader, het uitvoeren van de vergelijking en het benoemen van de onzekerheden. Het achterliggende doel van deze literatuurstudie is om in beeld te brengen wat de invloed is van bodemberoerende activiteiten op het sublitorale ecosysteem en deze gegevens vervolgens te gebruiken bij het formuleren van een potentieel maatregelenpakket om de impact van menselijke bodemberoerende activiteiten te verminderen.

Geen eenvoudige opgave, aangezien ten eerste – zoals de auteurs zelf ook opmerken – gebiedsbrede en meerjarige kennis van de soortensamenstelling en -dynamiek van het sublitorale deel van de Waddenzee tot op heden ontbreekt. Dit belemmert het identificeren van (cor)relaties tussen intensiteit en frequentie van bodemberoering op de morfodynamiek en soortensamenstelling van het gebied. Ook het afwegingskader, waarin onder andere de gevoeligheid en het herstelvermogen van soorten meegenomen worden, is vooral bruikbaar wanneer er voldoende gegevens over de samenstelling van de benthische soortgemeenschappen in tijd en ruimte bestaan.

Ten tweede, laat de literatuurstudie zien dat er maar een heel beperkt aantal studies beschikbaar zijn die de directe effecten van menselijke bodemverstoring hebben onderzocht. Voor het sublitorale deel van de Waddenzee zijn er meestal maar één, soms twee studies beschikbaar per type bodemberoerende activiteit die naar de effecten daarvan op de benthische gemeenschap hebben gekeken. Zodoende dient men voorzichtig te zijn met het trekken van conclusies van hoe bodemverstoring/-dynamiek de soortengemeenschap beïnvloedt. De opgave om de effecten van bodemverstoring als gevolg van menselijk handelen te vergelijken met natuurlijke bodemdynamiek is daarom eigenlijk nog een brug te ver. Belangrijk is daarbij om in acht te nemen, zoals de auteurs ook zelf benadrukken, dat de effecten van menselijk handelen altijd naast de natuurlijke processen plaatsvinden en daardoor additief en potentieel cumulatief van aard zijn.

Desalniettemin, is er met behulp van (inter)nationale literatuur een goede start gemaakt voor het kwantificeren van bodemberoerende activiteiten op het ecosysteem van de Waddenzee. De verschillende typen bodemverstorende processen, zowel natuurlijk als gevolg van menselijk handelen, zijn niet alleen uitvoerig beschreven en getypeerd op basis van hun impact (frequentie, schaal en intensiteit) maar ook in kaart gebracht voor de Waddenzee. Daarnaast is een afwegingskader voor de 26 meest

voorkomende bodemdieren van de Waddenzee opgesteld aan de hand van literatuurbronnen, waarbij ze zowel een sensitiviteits- als hersteltijdscore toebedeeld hebben gekregen (hierbij wel de kanttekening dat de trendlijnen in Figuur 2-10 en bijlage 4.2 verwijderd moeten worden aangezien het een soort-specifieke discrete score betreft). Dit afwegingskader kan ook in de toekomst gebruikt worden wanneer het sublitorale ecosysteem van de Waddenzee in kaart wordt gebracht door het Waddenmozaïek project of bij toekomstige effectstudies naar bijvoorbeeld de ontwikkeling van het bodemleven na zandsuppleties (e.g. Vergouwen & Holzhauer, 2016).

Echter, of deze literatuurstudie een volledig overzicht bevat van de in de literatuur aanwezige kennis van de voor de Waddenzee relevante ecologische en morfologische effecten is niet te beoordelen, omdat de review niet systematisch lijkt te zijn uitgevoerd. Hoewel er een groot aantal bronnen is geraadpleegd en deze literatuurlijst zeker gebruikt kan worden voor verdere analyses, is het onduidelijk hoe deze literatuurlijst verkregen is en is het daarom niet mogelijk te beoordelen of deze lijst alle mogelijk relevante studies omvat. Voor een systematische literatuurstudie is het belangrijk dat de zoektermen, de criteria voor in-/uitsluitsel en het aantal resultaten per zoekopdracht duidelijk vermeld worden. Dit verhoogt de reproduceerbaarheid van een studie en voorkomt het zogenaamde ‘cherry-picking’. De beschrijving van de methodiek in hoofdstuk 2 laat weten dat een ‘beperkte set zoektermen’ gebruikt is, maar hierbij is het onduidelijk wat die zoektermen precies waren. Tabel bijlage 1.3 geeft daarbij geen uitsluitsel, omdat de zoektermen maar voor een beperkt aantal studies zijn aangegeven. Een zoektocht naar de zoektermen ‘subtidal’ AND ‘wadden sea’ AND ‘benthic’ geeft 7000 resultaten op google scholar, waarbij bijvoorbeeld het eerste resultaat (Reise & Schubert, 1987, Helgoländer Meeresuntersuchungen) niet in de literatuurlijst voorkomt. Uiteraard is het mogelijk dat deze publicatie niet door de screening van de auteurs gekomen is, maar door de huidige methode beschrijving is het niet mogelijk dit te beoordelen. Voor de tweede selectie is een duidelijkere lijst aan criteria samengesteld. Om de literatuurlijst in tabel bijlage 1.3 ook voor vervolgonderzoek toepasbaar te maken was het handig geweest als hier niet alleen aangegeven was óf de publicatie meegenomen is voor vervolgonderzoek, maar ook welke betrouwbaarheid/relevantie scores de publicatie heeft gekregen. Overigens lijkt de column geanalyseerd niet volledig, aangezien Capelle et al. 2017 volgens de tabel niet meegenomen zou worden voor verdere analyses maar vervolgens wel één van de twee studies betreft die besproken wordt in de tekst met betrekking tot de effecten van mosselkweek op de biotiek.

Het opdelen van het sublitorale deel van de Waddenzee in hoog- en laag-dynamische gebieden maakt het mogelijk de variatie in natuurlijke bodemberoerende processen voor deze contrasterende deelsystemen te analyseren. De indeling op basis van stroomsnelheid en diepte lijkt hierbij voor de hand liggend. Dat de soortensamenstelling in beide gebieden verschilt is nu onderbouwd met een beperkt aantal studies op een beperkte temporele en ruimtelijke schaal, maar zoals de auteurs aangeven zal in de

toekomst de gebiedsbrede monitoring binnen het Waddenmozaïek project hier een vollediger beeld van geven. De conclusie dat in laag-dynamische gebieden soorten gevoeliger zijn en zich langzamer herstellen zou dan ook door meer data beter onderbouwd kunnen worden. Om deze conclusie inzichtelijker te maken met behulp van de huidige data hadden de tabellen van bijlage 4 (4.1 & 4.2) samengevoegd kunnen worden met daarbij een extra column met hun voorkomen (hoog vs. laag dynamisch of beiden).

Dat de gevolgen bij gelijke aard en mate van menselijke bodemberoering groter zullen zijn in gebieden waarin de bodemgemeenschap zowel gevoelig is voor verstoring alsmede een langere hersteltijd heeft is een logische denkstap. Als de gemeenschap in laag-dynamische gebieden sensitiever is en een langere hersteltijd heeft dan zijn dat de plekken die het minst veerkrachtig zijn en waar bodemberoering dan ook het grootste effect zal hebben. Dat geldt niet alleen voor het verlies van al aanwezige bodemgemeenschappen, maar kan ook de vestiging van deze gevoelige bodemdieren in de weg zitten. Vooral soorten die hun eigen milieu stabiliseren dan wel modificeren, zoals rifvormende kokerwormen en schelpdieren, worden hierdoor negatief beïnvloed. Zowel hun vestiging- als overlevingskansen zijn gekoppeld aan het behalen van een kritische dichtheid en areaalgrootte, voordat verstoring (menselijk of natuurlijk) plaatsvindt. Deze afhankelijkheid van vestigingsdrempels zit impliciet ingenomen in het afwegingskader door de lage score bij habitat range, maar zou nog extra onderstreept kunnen worden door bijvoorbeeld de aanwezigheid van soortgenoten mee te nemen als criterium voor vestiging. Nu worden bijvoorbeeld mossels en japanse oesters getypeerd als soorten met een lange hersteltijd (>5-10 jaar), maar het uiteraard ook goed mogelijk dat deze soorten zich lokaal nooit herstellen.

Daarbij ligt bij de analyse van de effecten van bodemberoerende activiteiten in Hoofdstuk 3 de nadruk vooral op de effecten van deze activiteiten op de al aanwezige bodemgemeenschap. Voorkeur is er natuurlijk voor zogenaamde BACI (before, after, control, impact) studies. Echter, zoals de auteurs zelf opmerken in Hoofdstuk 4, kan ook de before situatie al in sterke mate bepaald zijn geweest door decennia aan bodemberoerende activiteiten. De vraag is dan ook in hoeverre de huidige ruimtelijke verspreiding van de benthische gemeenschap in de laag- en hoog-dynamische delen van de Waddenzee het gevolg is van hun natuurlijke voorkomen, of al gestuurd is door een (lange) geschiedenis van bodemberoerende activiteiten. In Hoofdstuk 4 (Systematische benadering d.m.v. statistische modellering en toetsing met waarnemingen) worden aanbevelingen gedaan naar hoe een integratie gemaakt kan worden tussen de natuurlijk dynamiek in het Waddengebied, de additionele effecten van menselijk gebruik en de verspreiding van bodemorganismen, met bijvoorbeeld de hulp van habitat suitability modellen. Dit zijn veelbelovende methoden, waarbij de potentiele impact van bodemberoerende activiteiten op de geschiktheid van bepaalde gebieden voor de vestiging van sensitieve soorten in meegenomen kan worden. Op basis daarvan kan beter ingeschat worden welke kansrijke gebieden baat zouden hebben bij sluiting, al is ook dan de kans op spontane

vestiging van soorten die afhankelijk zijn van kritische drempelwaarden gering.

Het categoriseren van de mate van bodemberoering (frequentie, schaal en intensiteit) schept een kader om allereerst de impact van de verschillende activiteiten te analyseren en om vervolgens de activiteiten met elkaar te vergelijken. De literatuurstudie laat zien dat activiteiten die de bodem sterk beïnvloeden zoals extractie (baggeren, schelpenwinning) en bedekking (zandsuppletie en verspreiding baggerspecie) lokaal de grootste impact hebben. De geanalyseerde studies laten zien dat de hersteltijd vele jaren kan duren. Om beter inzicht te hebben op het effect van deze maatregelen geven de auteurs aan dat het belangrijk is om de impact in de toekomst voldoende te monitoren. Zoals de auteurs aangeven in Hoofdstuk 4 kunnen daar studies volgens het BACI principe aan bijdragen. Het monitoren van de before condities is daarbij essentieel. Een controle situatie is wenselijk, maar het kan lastig zijn om een locatie te vinden die zich in natuurlijk morfodynamiek en soortensamenstelling laat vergelijken. Ook een meerjarige before monitoring kan het mogelijk maken om de effecten op het ecosysteem beter te kwantificeren.

Eén van de doelen van deze literatuurstudie was om de vergelijking te trekken tussen door menselijk activiteiten genereerde bodemberoering en natuurlijke processen. Op basis van de analyses in Hoofdstuk 3 hebben de auteurs Tabel 4-2 samengesteld. De tabel laat zien dat tussen een heel aantal typen bodemberoering een mismatch zit in hun mate van effect in tijd, ruimte en kracht waardoor ze niet met elkaar te vergelijken zijn. Alleen, concluderen de auteurs zijn stormen en garnalenvisserij wel met elkaar te vergelijken omdat deze beiden matig invasief zijn, op grote schaal plaatsvinden en met de frequentie van meerdere malen per jaar. Ik begrijp de meerwaarde van de vergelijking tussen deze twee typen bodemberoering niet. Stormen zijn natuurlijke processen en daardoor niet te sturen, terwijl garnalenvisserij uiteraard wel te sturen is. Ook kunnen stormen over een groot areaal plaatsvinden en sterk verschillen in intensiteit (afhankelijk van windrichting en strijklengte). Het nut van Figuur 4-3 is mij niet duidelijk. Ten eerste kunnen stormen wel degelijk verschillend zijn in frequentie en intensiteit en lijkt het hieruit dat stormen een voorspelbaar fenomeen zijn. Het feit dat menselijke activiteiten bovenop die natuurlijke processen plaatsvinden en cumulatieve effecten kunnen hebben waardoor sensitieve soorten verdwijnen, geldt natuurlijk voor alle typen bodemberoerende processen. De opdracht was om de effecten van menselijke bodemberoerende activiteiten te vergelijken met natuurlijk bodemberoerende processen, maar buiten de indeling van hoog- en laag-dynamische gebieden op basis van hun natuurlijke morfodynamiek begrijp ik niet het nut van deze vergelijking. Het bestuderen van effecten van extreme omstandigheden zoals zware stormen of ijsgang is lastig, omdat deze stochastisch van aard zijn. Daarnaast geldt, zoals de auteurs zelf ook opmerken: ‘Natuurlijke beroering vindt immers overal plaats en is niet uit te sluiten’.

De hypothese dat verhoogde bodemberoering door bijvoorbeeld menselijke

gebruik kan leiden tot een transitie in de samenstelling van de bodemgemeenschap, van een biodiverse gemeenschap, met een hoog aandeel sensitieve soorten naar een gemeenschap met lage diversiteit bestaande uit opportunistische soorten, is een interessante aanname die getest kan worden in de toekomst door de integratie van data die voorgesteld wordt in figuur 5-1. Voor het formuleren van dergelijke hypothesen en onderzoeksvragen is de vergelijking tussen natuurlijk bodemberoerende processen en de effecten van menselijk gebruik in tijd en ruimte wel relevant.

In conclusie, met oog op de vier omschreven doelen is er een flinke stap gezet voor het verzamelen van beschikbare kennis, het ontwikkelen van een afwegingskader en het benoemen van de onzekerheden. De reproduceerbaarheid van de huidige literatuurstudie zou echter gebaat zijn bij een duidelijk beschreven systematische aanpak. Om de vergelijking te kunnen uitvoeren zou er eerst meer kennis moeten zijn van de samenstelling van het sublitorale ecosysteem, waarbij het belangrijk is om de vraag te stellen welke vergelijkingen tussen menselijke en natuurlijk bodemberoerende processen ook daadwerkelijk nut hebben.

waddenacademie

Bijlage 3 Oordeel dr. Ad van der Spek

De Waddenacademie vroeg om onderstaande vragen te beantwoorden.

- Of deze review een adequaat overzicht geeft over de in de literatuur aanwezige kennis van voor de Waddenzee relevante ecologische en morfologische effecten van menselijke en natuurlijke bodemberoering en zo niet, welke kennisvelden nog ontbreken.

Ondanks dat de auteurs van het rapport een bewonderenswaardige grote hoeveelheid rapporten en artikelen hebben verwerkt, mis ik toch het een en ander. Rijkswaterstaat heeft rond de eeuwwisseling uitgebreid onderzoek naar de gevolgen van schelpenwinning laten doen. De resultaten daarvan zijn vastgelegd in een rapport[1] dat ik niet in de literatuurlijst terugvind. Een van mijn observaties was dat de winning van schelpen in de zeegaten en grote geulen vaak ging om het wegzuigen van schelpenbanken die door de getijstroming bij elkaar gespoeld worden op de geulbodem. Deze manier van winnen heeft veel minder impact dan het zuigen van putten in een geulbodem.

Het huidige rapport gaat vooral in op de relatie tussen morfologie en biologie en de effecten van de morfologische veranderingen op de bodemfauna. Wat ik mis zijn de sedimentologische effecten. Ingrepen, net als natuurlijke events, leiden niet alleen tot verplaatsing van sedimentvolumes maar ook tot verandering van de sedimenttextuur, wat ook weer consequenties voor bodembewoners kan hebben. Daarnaast zijn in afzettingen niet alleen verschillen en afwisseling in sedimentsamenstelling maar ook allerlei structuren te zien die informatie geven over de vormende processen, zowel fysisch als biologisch. Analyse van deze structuren, bijvoorbeeld in boxcores welke relatief makkelijk te verzamelen zijn in de verschillende delen van een getijdebekken, geeft de nodige aanvullende informatie. Met name sedimentologen van het NIOZ en de Universiteit Utrecht hebben in het verleden dit soort onderzoek uitgevoerd.
Daarnaast is er een aanzienlijke hoeveelheid literatuur gepubliceerd door een onderzoeksgroep onder leiding van Burg Flemming van het Senckenberg Instituut in Wilhelmshaven, die inzicht geeft in de gradiënten in sedimentsamenstelling over een bekken en de veranderingen hierin door de tijd. De in het rapport gebruikte mediane korrelgrootte als milieu indicator is wat beperkt, andere parameters zoals de spreiding in de korrelgrootteverdeling, ook wel sortering, vertellen ook een verhaal. Daarnaast is het goed te beseffen dat niet alle korrelgroottes actief aangevoerd zijn; met name de grove sedimenten in de zeegaten en grote geulen zijn eerder een gevolg van het uitspoelen van de fijnere fracties dan van de aanvoer van grof materiaal.

Inzicht in morfologische veranderingen is over het algemeen gebaseerd op veranderingen in bodemligging zoals die bijvoorbeeld afgeleid worden uit de

vaklodingen van Rijkswaterstaat. Dit is een waardevolle dataset die echter ook zijn beperkingen heeft. Zo wordt de bodem van een waddenbekken eens in de 6 jaar opgenomen. De diepteveranderingen tussen twee opnames geven echter slechts een beeld van de netto veranderingen over dat tijdvak. In werkelijkheid vindt er in die 6 jaar veel meer sedimentatie en erosie plaats, met name door het verplaatsen van de getijgeulen. Het beeld van de natuurlijke dynamiek in een getijbekken wordt hierdoor vertekend, de omwerking van de wadbodem is groter dan de netto veranderingen die de opeenvolgende vaklodingen suggereren. Zie de paper van Vonhögen et al. uit 2013[2] .

In de ecologische literatuur wordt schuifspanning aan de bodem gebruikt als maat voor het energieniveau van de fysische processen, die vervolgens het vestigingsklimaat voor bodembewoners bepaalt. Dat is een mooi overzichtelijke parameter, maar hij verteld niet het hele verhaal. Schuifspanning is direct gekoppeld aan stroming over de bodem, dat gaat dus goed, maar zo gauw golven een rol gaan spelen is het opwoelende effect eveneens van belang, waarbij turbulentie en drukverschillen tussen waterkolom en poriënruimte in de bodem van belang zijn. Met name in ondiepe gebieden moet hier wel rekening mee gehouden worden.

Tot slot meen ik te weten dat er in de Voordelta het nodige onderzoek naar de impact van garnalenvisserij op de bodem is gedaan, onder meer in het kader van de uitsluitingsgebieden die ingesteld zijn in het kader van de natuurcompensatie voor Maasvlakte 2. Wellicht relevant.

- Of de volgende kernbevindingen van het rapport voldoende onderbouwd zijn.

De redeneringen hieronder lijken me logisch en goed te verdedigen, al is het wel wat zwart-wit gesteld bij gebrek aan concrete gegevens. Maar de schrijvers van het rapport hebben de informatie die beschikbaar is, goed gebruikt.

o Er is een verschil in de bodemsoortensamenstelling tussen hoog- en laag-dynamische sublitorale gebieden in de Waddenzee. De hoog-dynamische gebieden zijn vooral de grote getijgeulen, in het algemeen relatief dichtbij de zeegaten. De laag-dynamische gebieden bevinden zich in de kleinere geulen, de wantijen en meer richting de kust van het vaste land.

o In de laag-dynamische gebieden bevinden zich soorten die gevoeliger zijn en langzamer herstellen dan in de hoog dynamische gebieden.

o De gevolgen van een gelijke aard en mate van menselijke bodemberoering zullen (daardoor) in het algemeen groter zijn in laag-dynamische gebieden, waar immers soorten leven die sensitiever zijn en een langere hersteltijd hebben.

o Extractie (zoals baggeren en schelpenwinning) en bedekking (zoals zandsuppletie en verspreiding baggerspecie) hebben lokaal de grootste impact.

o De effecten van de natuurlijke bodemdynamiek door storm en de menselijke beroering door garnalenvisserij lijken vergelijkbaar.

Dat vraag ik me af: (zware) stormen zijn vooral incidenten, waarmee ik bedoel dat ze niet heel frequent voorkomen. Een echte storm geeft veel extra opwoeling van sediment op platen, o.a. ook door de grotere waterdiepte als gevolg van opzet (waarmee ik bedoel dat de harde wind veel extra water opstuwt waardoor de waterstanden omhoog gaan). Maar hoe groot de impact op het sublitorale deel is, is onduidelijk. Gezien de geringe strijklengte zullen er geen echt grote golven met Noordzeedimensies ontstaan en het is ook niet duidelijk hoe diep de golfinvloed rijkt. Dit geldt natuurlijk niet voor de Noordzeegolven die door het zeegat naar binnen lopen en grotendeels breken op de platen die direct achter het zeegat liggen. Na het wegvallen van de wind stroomt het opgezette water terug naar zee, waardoor de ebstroming versterkt wordt en vaak (relatief) hoge stroomsnelheden bereikt worden en de (grote) geulen en zeegaten sterk uitschuren. Hierna zijn deze dus te ruim voor het gewone getij. De morfologie van deze geulen en de zeegaten past zich snel (orde maanden) aan omdat er weer zand aangevoerd en afgezet wordt maar de gradiënt in de korrelgrootteverdelingen is sterk verstoord. Het herstel van die gradiënt, die de in landwaartse richting afnemende energie van de fysische processen weerspiegelt, kost jaren (resultaten uit een studie van Flemming) en wordt uiteindelijk weer bereikt door de continue erosie en sedimentatie die optreden, waarvan het netto effect op de morfologie klein is maar die wel tot een continue sortering van korrelgroottes leiden. Uiteraard geldt dit met name voor zand en veel minder voor slib.

De garnalenvisserij lijkt veel meer een hoogfrequente beïnvloeding van de bodem, al is de verstoring kleiner. In hoeverre beide processen tot dezelfde gevolgen leiden is, denk ik, niet zo maar vast te stellen.

Overigens is mijn indruk dat menselijke ingrepen lokaal zich vaak sneller voltrekken en een grotere omvang hebben dan natuurlijke processen. Ik bedoel dan het aantal kubieke meters sediment dat per tijdseenheid verplaatst wordt. Denk daarbij bijvoorbeeld aan het sedimentvolume dat een baggerschip in het tijdsbestek van een tot enkele uren weghaalt en elders weer stort. Dit wellicht met uitzondering van zettingsvloeiingen, zoals enkele jaren geleden bij West Ameland, waarbij plotseling een aanzienlijk volume zand weg kan schuiven naar dieper water.

o In laag-dynamische gebieden is niettemin de kans groter dat frequente beroering herstel verhindert en de bodemgemeenschap zich ontwikkelt naar één die meer kenmerkend is voor meer dynamische gebieden.

o In het geval de onderbouwing als onvoldoende wordt beschouwd, hoe zou deze onderbouwing alsnog verkregen kunnen worden (wat is daar op z'n minst voor nodig)?

Gericht vergelijkend onderzoek naar de impact van verschillende natuurlijke processen en ingrepen op sedimentsamenstelling en bodemfauna.

1 Reijngoud, T.T., 2001. Eindrapport vervolgonderzoek schelpenwinning. Rapport DNN826/2001, Rijkswaterstaat Noord-Nederland
2 Vonhögen, L.M. et al., 2013. Quantifying sediment dynamics within the Dutch Wadden Sea using bathymetric monitoring series. Journal of Coastal Research, SI 65, 1611-1616. https://doi.org/10.2112/SI65-272.1

Bijlage 2. Indeling analysetabel

NB. De Analysetabel in Excel is beschikbaar als losstaande 'Excel bijlage 1'.

Tabel bijlage 2.1 Kolomnamen van de analyse tabel

Documentatie	Type	Soort bron: wetenschappelijke publicatie, grijze literatuur
	Auteur	Eerste auteur
	Jaar	Jaar van publicatie
	Titel	Complete titel
Algemeen	Studiegebied	Locatie van experiment
	Type	Type mariene systeem (estuarien, geheel marien)
	Activiteit / Verstoring	Type bodemberoering
	Intensiteit	Mate van bodemberoering
	Referentie	Referentie situatie van het experiment
Methode / kwaliteitscontrole	Duur onderzoek (yr)	Duur van de experimentele periode in jaar
	Type experiment	Experimentele opzet (met of zonder control, before impact etc. BACI)
	Sampling biotiek	Aantal gebieden/stations/samples, methode gebruikt voor verzamelen (flora- en) fauna data
	Sampling morfologie	Aantal gebieden/stations/samples, methode gebruikt voor verzamelen morfologische data
	Opmerkingen	Opvallende punten uit studie
	Betrouwbaarheid	Maat voor betrouwbaarheid (zie tabblad Betrouwbaarheid-Relevantie)
	Relevantie	Maat voor relevantie (zie tabblad Betrouwbaarheid-Relevantie)
Studiegebied	Type sediment	Kenmerken van het sediment en (waar beschreven) percentage slik, klei, zand
	Korrelgrootte (µm)	Gemiddelde korrelgrootte in µ-meters
	Diepte (m)	Gemiddelde diepte van het studiegebied in meters
	Organisch gehalte	Percentage organisch gehalte van sediment in studiegebied
	Prim. Productie (gr C/m2/yr)	Primaire productie van het gebied in gram koolstof per m2/jaar
	Bodemschuifspanning (N/m2)	Bodemschuifspanning van het gebied in Newton per m2
	Opmerkingen	Opvallende punten uit studie
Morfologische effecten	Belangrijkste punten	Belangrijke resultaten voor deze sectie
	Sedimentsamenstelling	Effecten op type sediment
	Korrelgrootte (µm)	Effecten op korrelgrootte gemeten in µ-meters
	Organisch gehalte	Effecten op gehalte aan organische stof
	Troebelheid	Effecten op troebelheid
	Hersteltijd	Gevonden hersteltijd van bovenstaande variabelen
Biotische effecten structureel	Belangrijkste punten	Belangrijke resultaten voor deze sectie
	Diversiteit/Evenness	Effecten op de biodiversiteit gemeten in verschillende diversiteit/evenness parameters
	Soortenrijkdom	Effecten op soortenrijkdom
	Dichtheid/Aantal	Effecten op dichtheid/aantal organismen
	Biomassa	Effecten op biomassa van organismen
	Hersteltijd	Gevonden hersteltijd van bovenstaande variabelen
Biotische effecten functioneel	Belangrijkste punten	Belangrijke resultaten voor deze sectie en volgende sectie
	Functional diversity	Diversiteit gemeten aan de hand van functionele kenmerken
	Trait composition	Compositie van kenmerkende eigenschappen
	Sec. productie (kJ/m2/yr)	Secundaire productie gemeten in KiloJoule per vierkante meter per jaar
	Hersteltijd	Gevonden hersteltijd van bovenstaande variabelen
Sensitiviteit	Kenmerkende soorten controle gebied	Dominant voorkomende soorten in het controle- of voor impact gebied
	Kenmerkende soorten impact gebied	Dominant voorkomende soorten in het impact gebied

Tabel bijlage 2.2 Beoordelingsmaat voor betrouwbaarheid en relevantie van de gevonden bronnen die gebruikt zijn voor de verdiepende analyse. De resultaten en de betrouwbaarheid- en relevantiescores zijn bijgehouden in een tabel: een uitsnede daarvan is hieronder weergegeven (Op verzoek is de volledige analyse tabel beschikbaar). Wanneer aan een studie minder dan 5 punten voor betrouwbaarheid en minder dan 2 punten voor relevantie zijn toegekend, is deze niet meegenomen voor de resultatenbeschrijving. Uitzonderingen zijn model- en labstudies die door hun andere opzet afzonderlijk zijn beoordeeld.

	Betrouwbaarheid	
Onderdeel	**Maat**	**Score**
Type studie	Before-After Control-Impact	3
	Before-After Impact	2
	After Control-Impact	2
	After Impact	1
	Gradaties intensiteit meegenomen	plus 1
	Modelstudie	NA
Referentie	> 2 referentie/controle gebieden	3
	2 referentie/controle gebieden	2
	1 referentie/controle gebied	1
	Geen referentie/controle gebied	0
Aantal monsters	>=5 monsters per treatment, >= 5 monsters per referentie	3
	>=5 monsters per treatment, < 5 monsters per referentie	2
	< 5 monsters per treatment, >= 5monsters per referentie	2
	< 5 monsters per treatment, < 5 monsters per referentie	1
	Max totaal	**10**

	Relevantie	
Onderdeel	**Maat**	**Score**
Diepte (m) t.o.v. NAP	< - 5 > - 40	2
	Intertidaal	1
	< - 40	0
	Labstudie/modelstudie	NA
Gebied	(Internationale) Waddenzee	2
	Anders	1
	Labstudie	NA
	Max totaal	**4**

Tabel bijlage 2.3 (volgende 5 pagina's) Logboektabel, met daarin aangegeven welke artikelen zijn gevonden, o.a. op welke manier en wanneer.

Type	Auteur	Jaar	Titel	Studiegebied	Type	Activiteit/Verstoring	Doel studie	Intensiteit	Referentie	Duur onderzoek	Type experiment	Betrouwbaarheid score	Relevantie score
Documentatie				*Algemeen*						*Methodiek/kwaliteitscontrole*			
Wet. publicatie	Van der Veer et al.	1985	Dredging activities in the Dutch Wadden Sea: effects on macrobenthic infauna	Waddenzee (NL)	Estuarien/Marien	Baggerwerkzaamheden: zandwinning	Beschrijven van de effecten van zandwinning op de bodemmorfologie en de macrobenthische infauna in het Nederlandse deel van de estuariene Waddenzee	Zandwinning 1,2,3,4,16 jaar voorafgaand aan studiejaar (150.000-1.050.000 m3 gewonnen zand)	De staat van herstel werd beoordeeld dmv een vergelijking met de omliggende ongestoorde sedimenten	1 jaar (exact is onduidelijk)	After Control-Impact	8	4
Wet. publicatie	Wan Hussin	2012	Impacts of physical disturbance on the recovery of a macrofaunal community: A comparative analysis using traditional and novel approaches	Noordzee (UK)	Marien	Baggerwerkzaamheden: sedimentextractie	Onderzoek naar het herstel van de macrofauna bodemgemeenschap na baggerwerkzaamheden aan de hand van twee verschillende benaderingen 1) macrofauna samenstelling (traditioneel) 2) functionele capaciteit van ecosysteem (functionele methode)	Jaren waarin gebaggerd is (1971-1996). Hoge intensiteit bij >10 h baggeren op 100 m2; Lage intensiteit bij <1 h baggeren bij 100 m2 in 1995	2 onverstoorde referentiegebieden	3 jaar; from 2001-2002; 2003-2004 and 2007 between may-july	After Control-Impact (Intensity)	8	3
Wet. publicatie	Bolam et al.	2014	Macrofaunal recovery following the intertidal recharge of dredged material: A comparison of structural and functional approaches	Noordzee (Crouch estuarium)	Estuarien	Baggerwerkzaamheden: storten baggerspecie	Het bestuderen van het herstel van twee intertidale baggerspecie gebieden waarbij de verkregen resultaten worden vergeleken op basis van taxonomische structuur (univariate en multivariate benaderingen) en functie (samenstelling van biologische eigenschappen, functionele diversiteit, secundaire productie) van de benthische	1x 60-80 cm (verticale deklaag) baggerspecie na voltooiing	Referentiegebieden werden zo dicht mogelijk bij de suppletiegebieden (WW / TM) geselecteerd zonder te worden beïnvloed door de suppletie zelf	4 jaar; (bemonstering na 3 maanden, daarna na elke 6 maanden)	After Control-Impact	7	3
Wet. publicatie	Waye-Barker et al.	2015	The effects of marine sand and gravel extraction on the sediment composition and macrofaunal community of a commercial dredging site (15 years post-dredging)	Noordzee (west, UK)	Marien	Baggerwerkzaamheden: sedimentextractie	Om de hypothese te testen dat faunaherstel op een baggerimpactlocatie waarschijnlijk 15-20 jaar duurt adhv het verzamelen en analyseren van monsters uit 2011 (15 jaar na baggeren)	Jaren waarin gebaggerd is (1971-1996). Hoge intensiteit bij >10 h baggeren op 100 m2	2 onverstoorde referentiegebieden gesampled in 2011 (15 jaar na baggeren) geselecteerd door video en side scan sonar	Bemonstering in 2011 (15 jaar incl. Gegevens van eerdere bemonstering >> Wan-Hussin 2012 / Boyd 2005)	After Control-Impact	7	3
Wet. publicatie	Van Dalfsen et al.	2000	Differential response of macrozoobenthos to marine sand extraction in the North Sea and the Western Mediterranean	Noordzee (NL, DEN)/Middellandse zee (west)	Marien	Baggerwerkzaamheden: zandwinning	Bestuderen van effecten van zandwinning op de benthische gemeenschap alsook het herstelproces	250-2600 m3 volume extracted in area affected 0,5-1,5 km2 (eenmalige ingreep)	In Torsminde en Terschelling, referentie gebied, in Costa Daurada geen referentie gebied, wel before-after	4 jaar (1993-1997)	(Before)-After Control-Impact	7	3

Auteurs	Jaar	Titel	Gebied	Publ. type	Soort studie	Beroeringsfactor	Geanalyseerd	Aantal citaties	Impact	Zoektermen	Herkomst	In/via	Download datum
Bolam et al.	2014	Macrofaunal recovery followin	Crouch estuary,	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden	Ja	14	Gemiddeld	zie Bolam et al.	Citerend	Bolam	10-10-2019
Boyd et al.	2005	The effects of marine sand an	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden		132	Hoog			de Jon	7-11-2019
Cooper et al.	2007	Cumulative impacts of aggreg	Noordzee, UK	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden		33	Gemiddeld	zie Bricheno et	Referenties	Bricher	10-10-2019
Cooper et al.	2011	Implications of dredging induc	Noordzee	Wet.	Meta-analyse	Baggerwerkzaamheden	Ja	28	Gemiddeld	Wan Hussin tite	Web of Science		7-11-2019
De Jong (Thesis)	2016	The ecological effects of deep	Noordzee(kustz	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden		NA	NA	bodemschuifsp	https://www.ecoshape.		17-10-2019
Dernie et al.	2003	Recovery rates of benthic con	Menai Strait, lers	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden	Ja	132	Hoog	zie Bricheno et	Referenties	Bricher	10-10-2019
Guerra-Garcia et al.	2003	Short-Term Benthic Recoloni	Middelandse ze	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden		41	Gemiddeld		Referenties	Hewitt	15-10-2019
Krause et al.	2010	The Physical and Biological In	Baltische zee	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden	Ja	15	Laag	effect sand no	Google scholar		9-10-2019
Mielck et al.	2019	Morphological changes due to	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden	Ja	0	NA		Citerend	Van Da	7-11-2019
Schratzberger et al.	2006	Differential response of nemat	Orwell Estuary, E	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden		40	Gemiddeld		Referenties	Bolam	28-10-2019
Simonini et al.	2005	The effects of sand extraction	Adriatische zee	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden		44	Gemiddeld	effect sand ext	Google scholar		10-10-2019
Simonini et al.	2007	Recolonization and recovery	Adriatische zee	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden		29	Gemiddeld	zie Simonini et	Citerend	Simoni	10-10-2019
Van Dalfsen et al.	2000	Differential response of macro	Noordzee/Midde	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden	Ja	147	Hoog		Reference	Wan Hu	7-11-2019
Van der Veer et al.	1985	Dredging activities in the Dutc	Waddenzee	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden	Ja	95	Hoog	effect dredging	Google scholar		10-10-2019
Van Kessel	2015	Opzet en toepassing slibmode	Waddenzee	Grijs	Modelstudie	Baggerwerkzaamheden	Ja	NA	NA		Persoonlijk	Van Du	16-12-2019
Van Maren et al.	2016	The effect of land reclamation	Waddenzee	Wet.	Modelstudie	Baggerwerkzaamheden		31	Gemiddeld				
Vanaverbeke & Vincx	2008	Short-term changes in nemat	Noordzee België	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden		8	Laag		Citerend	Guerra	15-10-2019
Wan Hussin et al.	2012	Impacts of physical disturbanc	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden	Ja	41	Gemiddeld		Referenties	Bolam	28-10-2019
Waye-Barker et al.	2015	The effects of marine sand an	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Baggerwerkzaamheden	Ja	13	Gemiddeld		Citerend	Van Da	7-11-2019
Bijkerk	1988	Ontsnappen of begraven blijv	Waddenzee	Grijs	Review	Baggerwerkzaamheden		NA	NA				
Bolam et al.	2017	Differences in biological traits	European Shelf	Wet.	Referentiestudie	Baggerwerkzaamheden		22	Hoog		Opdrachtgever		3-10-2019
de Kluijver et al.	2015	Effecten van slib op de ecolog	Waddenzee	Grijs	Modelstudie	Baggerwerkzaamheden		NA	NA		Persoonlijk	Van Du	16-12-2019
Essink	1999	Ecological effects of dumping	Waddenzee	Wet.	Review	Baggerwerkzaamheden		NA	NA				
Kuijper & Brinkman	2015	Antropogene bodemberoering	Waddenzee	Grijs	Algemene studie	Baggerwerkzaamheden		NA	NA		Persoonlijk	Van Du	16-12-2019
Newell et al.	1998	The impact of dredging works	Noordzee	Wet.	Review	Baggerwerkzaamheden		479	Hoog	effect seabed l	Google scholar		9-10-2019
Smit et al.	2006	Threshold levels and risk funct	Globaal	Grijs	Review	Baggerwerkzaamheden		NA	NA				
Van Dalfsen & Essink.	2001	Benthic community response	Noordzee	Wet.	Review	Baggerwerkzaamheden		53	Laag		Referenties	Waye-I	18-11-2019
Van Duren et al.	2015	Verkenning Slibhuishouding V	Waddenzee	Grijs	Algemene studie	Baggerwerkzaamheden		NA	NA		Google	Janser	20-11-2019
Asci et al.	2018	Estimating similarity in benthic	Golf van Maine,	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		0	Gemiddeld		Citerend	Van De	11-10-2019
Bergman & Hup	1992	Direct effects of beamtrawling	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		264	Hoog		CRANIMPACT		29-11-2019
Bergman & Santbrink	2000	Mortality in megafaunal benthi	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij	Ja	196	Hoog		Referenties	Van De	11-10-2019
Bergman et al.	2015	Effects of a 5 year trawling bar	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		25	Laag		CRANIMPACT		29-11-2019
Bolam et al.	2014	Sensitivity of macrobenthic se	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		47	Hoog		Referenties	Van De	11-10-2019
Bremner et al.	2003	Assessing Marine Ecosystem I	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		33	Gemiddeld		Referenties	Van De	11-10-2019
Buhl Mortensen et al.	2016	Trawling disturbance on mega	Barentszee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		33	Hoog		BENTHIS		3-10-2019
Callaway et al.	2007	A century of NS epibenthos ar	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		87	Hoog		Referenties	Van De	11-10-2019
Collie et al.	2000	A quantitative analysis of fishir	Globaal	Wet.	Meta-analyse	Bodemvisserij		703	Hoog	References	Van Dender	Nina	11-10-2019
Depestele et al.	2016	Measuring and assessing the	Zuidelijke Noord	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		40	Hoog		BENTHIS		3-10-2019
Diesing et al.	2013	A proposed method for assess	Noordzee	Wet.	Modelstudie	Bodemvisserij		43	Gemiddeld		Referenties	Van De	11-10-2019
Duineveld et al.	2007	Effects of an area closed to fis	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		68	Gemiddeld		CRANIMPACT		29-11-2019
Duplisea et al.	2001	Modelling potential impacts of	Noordzee	Wet.	Modelstudie	Bodemvisserij		76	Hoog	trawl soft sedir	Google scholar		11-10-2019
Gonzalez-Irusta et al.	2018	Determining and mapping spe	Golf van Biskaje	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		1	Gemiddeld		Citerend	Van De	11-10-2019
Hewitt et al.	2011	Biotic habitats and their sensit	Nieuw Zeeland	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		11	Laag		Eigen		13-9-2019
Hiddink et al.	2017	Global analysis of depletion ar	Globaal	Wet.	Meta-analyse	Bodemvisserij		55	Hoog		BENTHIS		3-10-2019
Hiddink et al.	2006	Indicators of the ecological im	Zuidelijke Noord	Wet.	Modelstudie	Bodemvisserij		88	Hoog	effect seabed l	Google scholar		9-10-2019
Hiddink et al.	2007	Assessing and predicting the	Noordzee	Wet.	Modelstudie	Bodemvisserij		122	Hoog	effect seabed l	Google scholar		9-10-2019
Hiddink et al.	2019	Assessing bottom trawling imp	Globaal	Wet.	Meta-analyse	Bodemvisserij		2	Hoog		Citerend	Rijnsdc	11-10-2019
Hiddink et al.	2006	Cumulative impacts of seabec	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij	Ja	303	Hoog			Tillin et	30-10-2019
Hinz et al.	2009	Trawl disturbance on benthic	Ierse zee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij	Ja	174	Hoog		Citerend	Van De	11-10-2019

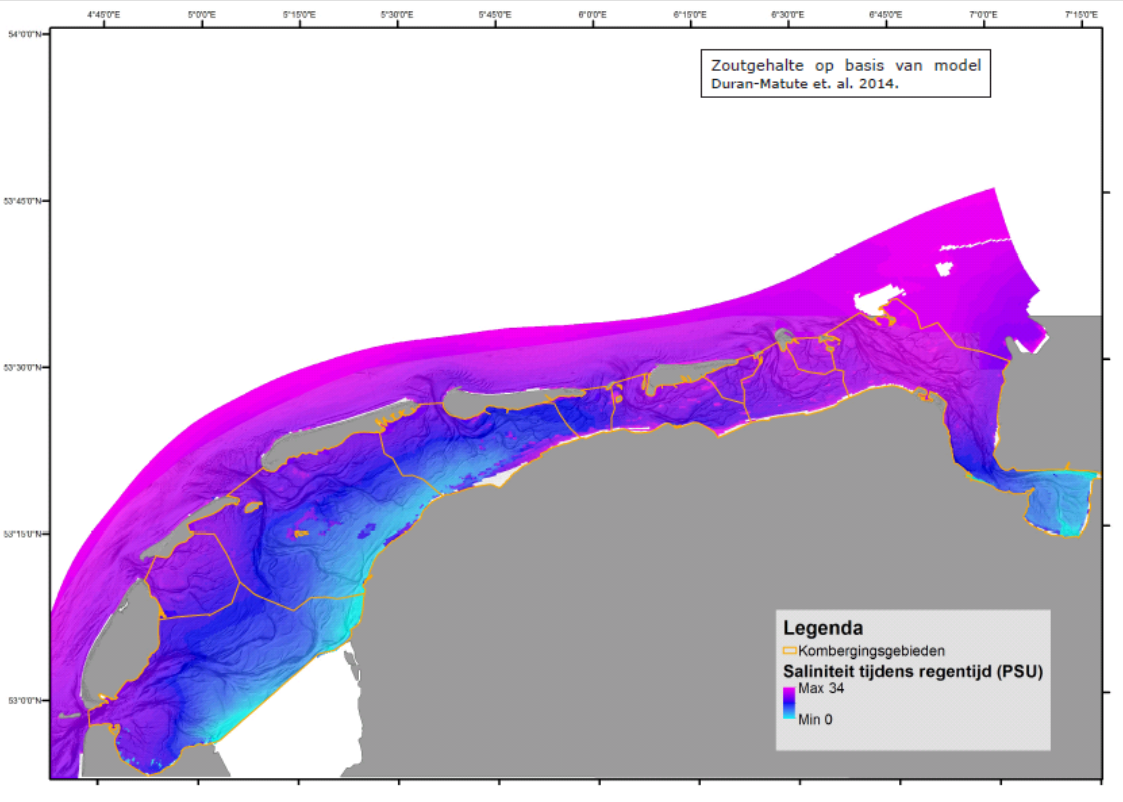
Auteurs	Jaar	Titel	Gebied	Publ. type	Soort studie	Beroeringsfactor	Geanalyseerd	Aantal citaties	Impact	Zoektermen	Herkomst	In/via	Download datum
Juan et al.	2007	Functional changes as indica	Middelandse ze	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		154	Hoog		Referenties	Van De	11-10-2019
Kaiser et al.	2000	Chronic fishing disturbance h	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		308	Hoog		Referenties	Tulp et	16-10-2019
Kaiser et al.	2006	Global analysis of response ar	Internationaal	Wet.	Meta-analyse	Bodemvisserij		560	Hoog		Citerend	Van De	11-10-2019
Lambert et al.	2014	Quantifying recovery rates an	lerse zee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		50	Hoog		BENTHIS		3-10-2019
Linders et al.	2018	Distribution and fate of trawlin	Noordzee, Skag	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij	Ja	5	Hoog		BENTHIS		3-10-2019
Lundquist et al.	2018	Assessing benthic responses	Nieuw Zeeland	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		3	Gemiddeld		Eigen		9-9-2019
Mengual et al.	2019	Bottom trawling contribution to	Golf van Biscay	Wet.	Modelstudie	Bodemvisserij		0	NA		BENTHIS		3-10-2019
Pommer et al.	2016	Impact and distribution of bott	Noordzee, Katte	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij	Ja	18	Hoog		BENTHIS		3-10-2019
Queiros et al.	2006	Effects of chronic bottom traw	Noordzee en ler	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		128	Hoog		Reference	Van De	11-10-2019
Rabaut et al.	2008	Experimental beam-trawling in	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		42	Laag		CRANIMPACT		29-11-2019
Rijnsdorp et al.	2018	Estimating sensitivity of seabe	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij	Ja	6	Hoog		Eigen		3-9-2019
Rijnsdorp et al.	2016	Deliverable 2.3 Impact of Bott	Noordzee en he	Grijs	Effectstudie	Bodemvisserij		NA	NA		BENTHIS		3-10-2019
Sciberras et al.	2016	Impacts of bottom fishing on th	lerse zee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		15	Hoog		BENTHIS		3-10-2019
Skold et al.	2018	Effects of chronic bottom traw	Kattegat	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij	Ja	8	Hoog		BENTHIS		3-10-2019
Tillin et al.	2006	Chronic bottom trawling alters	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij	Ja	296	Hoog		Referenties	Bolam	28-10-2019
Van Denderen (thesis)	2015	Ecosystem effects of bottom t	Noordzee/Intern	Wet.	Effectstudie	Bodemvisserij		NA	NA		Referenties	Tulp et	16-10-2019
Van Denderen et al.	2015	Similar effects of bottom trawli	Noordzee en ler	Wet.	Meta-analyse	Bodemvisserij	Ja	41	Hoog		BENTHIS		3-10-2019
Van Denderen et al.	2014	Habitat-Specific Effects of Fis	Noordzee Nede	Wet.	Modelstudie	Bodemvisserij		39	Hoog		BENTHIS		3-10-2019
Van Denderen et al.	2015	Temporal aggregation of bott	Noordzee, Nede	Wet.	Modelstudie	Bodemvisserij		27	Hoog		BENTHIS		3-10-2019
Buhl Mortensen	2016	Fishing impacts on benthic ec	Europa	Wet.	Review	Bodemvisserij		6	Laag		Opdrachtgever		3-10-2019
Clark et al.	2016	The impacts of deep-sea fishe	Nieuw Zeeland	Wet.	Review	Bodemvisserij		137	Hoog		Eigen		9-9-2019
De Groot	1984	The impact of bottom trawling	Noordzee	Wet.	Review	Bodemvisserij		243	Hoog		Referenties	Van De	11-10-2019
Eigaard et al.	2015	Deliverable 2.3 Benthic impac	Europa	Grijs	Algemene studie	Bodemvisserij		NA	NA		Opdrachtgever		3-10-2019
Eigaard et al.	2016	Estimating seabed pressure fr	Europa	Wet.	Algemene studie	Bodemvisserij		105	Hoog		Opdrachtgever		3-10-2019
Eigaard et al.	2017	The footprint of bottom trawlin	European Conti	Wet.	Algemene studie	Bodemvisserij		66	Hoog		Citerend	Van De	11-10-2019
Jennings & Kaiser	1998	Effects of Fishing on Marine Ec	Globaal	Wet.	Review	Bodemvisserij		1780	Hoog			Hiddink	9-10-2019
Jones et al.	1992	Environmental impact of trawli	Nieuw Zeeland	Wet.	Review	Bodemvisserij		537	Hoog		Eigen		9-9-2019
Kaiser	1998	Significance of Bottom-Fishin	Globaal	Wet.	Review	Bodemvisserij		150	Gemiddeld	effect seabed I	Google scholar		9-10-2019
Kaiser et al.	2003	Impacts of fishing gear on mar	Globaal	Wet.	Review	Bodemvisserij		87	Gemiddeld			Hiddink	9-10-2019
Kaiser et al.	2002	Modification of marine habitat	Noordzee, Glob	Wet.	Review	Bodemvisserij		451	Hoog		Referenties	Tulp et	16-10-2019
Kuhlman & Oostenbru	2014	Bodemberoerende visserij op	Noordzee	Grijs	Algemene studie	Bodemvisserij		1	Laag	bodemberoere	Google scholar		3-9-2019
Lengkeek	2010	Impacts of beam trawl fisheries	Noordzee	Grijs	Review	Bodemvisserij		NA	NA		Eigen		2-10-2019
Neumann et al.	2016	Functional composition of epil	Noordzee	Wet.	Algemene studie	Bodemvisserij		10	Gemiddeld		CRANIMPACT		29-11-2019
Nielsen et al.	2014	Report on assessing trawling i	Noordzee	Grijs	Algemene studie	Bodemvisserij		NA	NA	wadden sea sw	Google scholar		16-10-2019
Rijnsdorp et al.	2016	Pulse fishing and its effects or	Noordzee	Grijs	Review	Bodemvisserij		1	Laag	wadden sea sw	Google		16-10-2019
Thrush & Dayton	2002	Disturbance to Marine Benthic	Globaal	Wet.	Review	Bodemvisserij		703	Hoog		Eigen		9-9-2019
Tulp et al.	2019	Syntheserapport PMR NCV	Voordelta	Grijs	Algemene studie	Bodemvisserij		NA	NA		Opdrachtgever		11-10-2019
Van der Reijden et al.	2018	North Sea demersal fisheries p	Noordzee	Wet.	Algemene studie	Bodemvisserij		2	Gemiddeld	DISCLOSE	website DISCLOSE		16-10-2019
Van der Reijden et al.	2019	Discovery of Sabellaria spinul	Noordzee	Wet.	Algemene studie	Bodemvisserij		4	Hoog		Eigen		11-10-2019
Wagler et al.	2009	The fishery for whiteweed, Ser	Waddenzee	Wet.	Review	Bodemvisserij		4	Laag		Referenties	Tulp et	17-10-2019
Foden et al.	2009	Recovery of UK seabed habita	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Combinatie		47	Gemiddeld	Cumulative impacts of seabed trawl			30-10-2019
Foden et al.	2011	Human pressures on UK seab	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Combinatie		53	Gemiddeld		CRANIMPACT		29-11-2019
Kenny et al.	2018	Assessing cumulative human	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Combinatie		7	Hoog	Cumulative impacts of seabed trawl			30-10-2019
Gibb et al.	2014	Assessing the sensitivity of Sa	Noordzee	Grijs	Algemene studie	Combinatie		8	Laag		Eigen		11-10-2019
Wang et al.	2015	Human impacts on morphodyr	Globaal	Wet.	Review	Combinatie							
Glorius et al.	2015	Effecten garnalenvisserij in N2	Noordzee en W	Grijs	Effectstudie	Garnalenvisserij		NA	NA		Eigen		5-9-2019
Glorius et al.	2018	Developments in benthos and	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Garnalenvisserij	Ja	NA	NA				
Schellekens et al.	2014	Garnalenvisserij experiment V	Voordelta	Grijs	Effectstudie	Garnalenvisserij	Ja	NA	NA		Referenties	Tulp et	16-10-2019
Troost et al.	2018	Ontwikkeling van bodemdiere	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Garnalenvisserij	Ja	NA	NA		Google	tip Marr	21-11-2019

Auteurs	Jaar	Titel	Gebied	Publ. type	Soort studie	Beroeringsfactor	Geanalyseerd	Aantal citaties	Impact	Zoektermen	Herkomst	In/via	Download datum
Tulp et al.	2019	Dose-response relationship b	Waddenzee No	Wet.	Effectstudie	Garnalenvisserij	Ja	0	NA			Ingrid T	31-10-2019
Vorberg	2000	Effects of shrimp fisheries on r	Waddenzee	Wet.	Effectstudie	Garnalenvisserij	Ja	50	Gemiddeld	wadden sea fis	Google scholar		5-11-2019
Wells et al.	2008	Habitat use and the effect of s	Golf van Mexico	Wet.	Effectstudie	Garnalenvisserij	Ja	23	Gemiddeld				17-10-2019
Gillet	2008	Global study on shrimp fisherie	Globaal	Grijs	Review	Garnalenvisserij		283	Hoog		Referenties	Glorius	26-11-2019
Jongbloed et al.	2014	Expert judgement garnalenvis	Waddenzee	Grijs	Review	Garnalenvisserij		NA	NA		Referenties	Glorius	26-11-2019
Aldridge et al.	2015	Assessment of the physical di	Noordzee	Wet.	Modelstudie	Golven-stroming		19	Gemiddeld	natural bottom	Referenties	Bricher	10-10-2019
Bricheno et al.	2015	Distribution of natural disturba	Noordzee	Wet.	Modelstudie	Golven-stroming		10	Gemiddeld	natural bottom	Google scholar		10-10-2019
Donker	2015	Hydrodynamic processes and	Waddenzee	Wet.	Modelstudie	Golven-stroming		10	Laag		Eigen bezit		21-11-2019
Singer et al.	2016	Small-scale benthos distributi	Noordzee	Wet.	Modelstudie	Golven-stroming		8	Gemiddeld				17-10-2019
Stanev et al.	2005	On the sensitivity of the sedim	Waddenzee	Wet.	Modelstudie	Golven-stroming		26	Laag		CRANIMPACT		29-11-2019
Warwick & Uncles	1980	Distribution of benthic macrof	Bristol Channel	Wet.	Modelstudie	Golven-stroming	Ja	183	Hoog	zie Bricheno et	Referenties	Bricher	30-10-2019
Gerwing et al.	2015	Resilience of an intertidal infau	Bay of Fundy, A	Wet.	Effectstudie	Ijsgang	Ja	14	Gemiddeld	mudflat winter	Google Scholar		26-11-2019
Herkul et al.	2011	Effect of physical disturbance	Balthische zee	Wet.	Modelstudie	Ijsgang	Ja	15	Gemiddeld	zie Bricheno et	Referenties	Bricher	30-10-2019
Pejrup & Andersen	2000	The influence of ice on sedime	Waddenzee	Wet.	Effectstudie	Ijsgang	Ja	35	Laag		Referenties	Donker	25-11-2019
Staats et al.	2001	Observations on Suspended F	Waddenzee	Wet.	Effectstudie	Ijsgang	Ja	17	Laag		Citerend	Pejrup	25-11-2019
Strasser et al.	2001	Differential effects of the seve	Waddenzee	Wet.	Effectstudie	Ijsgang	Ja	63	Gemiddeld		Referenties	Gerwin	26-11-2019
Donker et al.	2015	Erosion of an intertidal mussel	Waddenzee	Wet.	Effectstudie	Ijsgang-golven	Ja	9	Laag			Donker	25-11-2019
Terwisscha	2016	Morfologie rond de wadleiding	Waddenzee	Grijs	Algemene studie	Kabels-leidingen		NA	NA		via Vitens (n.	a.v. and	13-11-2019
Andrulewicz et al.	2003	The environmental effects of t	Baltische zee	Wet.	Effectstudie	Kabels-leidingen	Ja	32	Laag		Referenties	Taormii	27-11-2019
Bochert & Zettler	2004	Long-term exposure of severa	Baltische zee	Wet.	Effectstudie	Kabels-leidingen	Ja	24	Laag		Referenties	Taormii	2-12-2019
Lewis et al.	2002	A Study of the Impact of a Pipe	Clonakilty Bay, I	Wet.	Effectstudie	Kabels-leidingen	Ja	31	Gemiddeld		Referenties	Bolam	28-10-2019
Lewis et al.	2003	A study of the impact of a pipe	Clonakilty Bay, I	Wet.	Effectstudie	Kabels-leidingen	Ja	25	Gemiddeld		Referenties	Bolam	28-10-2019
Rezai et al.	1999	Some effects of submarine pip	Maleisië	Wet.	Effectstudie	Kabels-leidingen		5	Laag	(citeert De Groot	(1982) The	impact	9-10-2019
Taormina et al.	2018	A review of potential impacts o	Globaal	Wet.	Review	Kabels-leidingen		6	Hoog		Eigen	uit and	25-11-2019
Beukema & Dekker	2018	Effects of cockle abundance	Waddenzee	Wet.	Effectstudie	Schelpdiervisserij	Ja	2	Gemiddeld				16-10-2019
Capelle et al.	2017	Population dynamics of subtic	Waddenzee	Wet.	Effectstudie	Schelpdiervisserij		6	Laag				11-12-2019
Creaymeersch et al.	2013	Impact of mussel seed fishery	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Schelpdiervisserij		NA	NA	PRODUS Wad	WMR website		16-10-2019
Dolmer et al.	2001	Short-term impact of blue mus	Noordzee, Limfj	Wet.	Effectstudie	Schelpdiervisserij		35	Laag		Referenties	Tulp et	4-12-2019
Frandsen et al.	2015	Reducing the impact of blue m	Limfjord, Noordz	Wet.	Effectstudie	Schelpdiervisserij		4	Laag		BENTHIS		3-10-2019
Glorius et al.	2013	PRODUS 3 - Deelrapport bod	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Schelpdiervisserij		NA	NA	PRODUS Wad	WMR website		16-10-2019
Glorius et al.	2014	De ontwikkeling van niet bevis	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Schelpdiervisserij		NA	NA		Referenties	Tulp et	4-12-2019
Jansen & Capelle	2018	Effecten van mosselkweek op	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Schelpdiervisserij	Ja	NA	NA		Referenties	Troost	18-11-2019
Jansen et al.	2013	Effecten van mosselvisserij op	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Schelpdiervisserij		NA	NA	PRODUS Wad	WMR website		16-10-2019
Lambert et al.	2017	Defining thresholds of sustain	lerse zee	Wet.	Effectstudie	Schelpdiervisserij	Ja	10	Hoog	effects natural	Google		10-10-2019
Piersma et al.	2001	Long-term indirect effects of r	Waddenzee	Wet.	Effectstudie	Schelpdiervisserij	Ja	132	Hoog	effect seabed	Google scholar		9-10-2019
Smaal et al.	2013	Effecten van mosselvisserij op	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Schelpdiervisserij	Ja	NA	NA	PRODUS Wad	WMR website		16-10-2019
Thrush et al.	1995	The impact of habitat disturba	Nieuw Zeeland	Wet.	Effectstudie	Schelpdiervisserij	Ja	213	Hoog	effect seabed	Google scholar		9-10-2019
Troost et al.	2019	Effecten van gebiedssluiting v	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Schelpdiervisserij		NA	NA				
Van Bemmelen et al.	2012	The effects of subtidal mussel	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Schelpdiervisserij	Ja	NA	NA	PRODUS Wad	WMR website		16-10-2019
Van Stralen et al.	2013	Het mosselbestand op de PRC	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Schelpdiervisserij		NA	NA	PRODUS Wad	WMR website		16-10-2019
Ens et al.	2004	The effects of shellfish fishery	Waddenzee	Grijs	Review	Schelpdiervisserij		NA	NA	effect seabed	Google scholar		9-10-2019
Troost et al.	2019	Effecten van gebiedssluiting v	Waddenzee	Grijs	Review	Schelpdiervisserij		NA	NA		Google	tip Klar	15-11-2019
Zwarts et al.	2004	Bodemgesteldheid en mecha	Waddenzee	Grijs	Meta-analyse	Schelpdiervisserij		42	Gemiddeld		Eigen		5-9-2019
Schans et al.	2003	Opvulsnelheid, gedrag en effe	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Schelpenwinning	Ja	NA	NA		Google	ref. uit	22-11-2019
Beukema & Cadee	1999	An estimate of the sustainable	Waddenzee	Wet.	Algemene studie	Schelpenwinning		18	Laag	shell extraction	Google		22-11-2019
Verhagen	2013	MER-beoordelingsrapportage	Waddenzee	Grijs	MER notitie	Schelpenwinning		NA	NA	shell extraction	Google	Beuker	22-11-2019
Corte et al.	2017	Storm effects on intertidal inve	Araca Bay, Braz	Wet.	Effectstudie	Storm	Ja	12	Gemiddeld	storm intertidal	Web of Science		21-11-2019
Boersema et al.	2018	Oesterdam sand nourishment	Oosterschelde	Grijs	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja	NA	NA	Nourishment s	Google		30-10-2019
Bolam	2011	Burial survival of benthic macr	Crouch estuary,	Wet.	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja	31	Laag		Citerend	Miller et	18-11-2019
Bolam et al.	2004	Macrofaunal recolonization or	Crouch estuary,	Wet.	Effectstudie	Zandsuppletie		61	Hoog	natural bottom	Google scho	Bricher	10-10-2019

Auteurs	Jaar	Titel	Gebied	Publ. type	Soort studie	Beroeringsfactor	Geanalyseerd	Aantal citaties	Impact	Zoektermen	Herkomst	In/via	Download datum
Colioso et al.	2007	Effects of beach nourishment	Middellandse ze	Wet.	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja						
Grunnet & Ruessink	2005	Morphodynamic response of r	Waddenzee	Wet.	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja						
Hendrick et al.	2016	Sediment Burial Intolerance of	Keltische zee	Wet.	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja	14	Gemiddeld		Citerend	Boyd e	18-11-2019
Hinchey et al.	2006	Responses of estuarine benth	Chesapeak Bay	Wet.	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja	60	Gemiddeld		Referenties	Hutchis	18-11-2019
Holzhauer et al.	2014	Ecologische effecten suppleti	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja	NA	NA				
Hutchison et al.	2016	Buried Alive: The behavioural	Ierse zee, Atlant	Wet.	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja	14	Gemiddeld		Referenties	Hendric	18-11-2019
Larson & Sundback	2012	Recovery of microphytobenth	Kattegat, Noord	Wet.	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja	8	Laag		Citerend	Miller et	18-11-2019
Rodil & Lastra	2004	Environmental factors affectin	Noordzee	Wet.	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja						
Van Dalfsen & Essink.	1999	Risk analysis of coastal nouris	Noordzee, Nede	Wet.	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja	4	Laag			Krause	9-10-2019
Van den Boogaart et a	2019	Ecologie van het Amelander z	Waddenzee	Grijs	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja	NA	NA				
Van der Werf et al.	2013	Evaluatie Galgeplaat proefsup	Oosterschelde	Grijs	Effectstudie	Zandsuppletie	Ja	NA	NA	zandsuppletie	Google		30-10-2019
Baptist et al.	2009	Review of the geomorphologic	Noordzee	Grijs	Review	Zandsuppletie		23	Gemiddeld	effect sand no	Google scholar		9-10-2019
Speybroeck et al.	2006	Beach nourishment An ecolog	Noordzee	Wet.	Review	Zandsuppletie		186	Hoog		Referenties	Witbaa	11-10-2019
Baptist et al.	2019	An ecotope map of the trilater-	Waddenzee	Wet.	Algemene studie			NA	NA	ecotopenkaart	Google		23-10-2019
Baptist et al.	2016	Ecotopenkaart Waddenzee volgens de ZES.1 t		Grijs	Algemene studie								
Beauchard et al.	2017	The use of multiple biological t	Noordzee	Wet.	Algemene studie			40	Hoog			DISCL(	11-11-2019
Becherer et al.	2018	The Wadden Sea in transition	Waddenzee	Wet.	Modelstudie			5	Hoog		Eigen		5-11-2019
Breine et al.	2018	Structural and functional diver	Noordzee	Wet.	Algemene studie			2	Gemiddeld			DISCL(	11-11-2019
Bremner et al.	2015	Matching biological traits to en	Het Kanaal, lers	Wet.	Algemene studie			157	Hoog		CRANIMPACT		29-11-2019
Callaway et al.	2010	Ephemeral Bio-engineers or re	Noordzee	Wet.	Algemene studie			35	Laag		CRANIMPACT		29-11-2019
Christianen et al.	2017	Benthic primary producers are	Waddenzee	Wet.	Algemene studie			31	Hoog		Eigen		3-9-2019
Christianen et al.	2015	Ecotopen en kansenrijkdomskaart		Grijs	Algemene studie								
Compton et al.	2013	Distinctly variable mudscapes	Waddenzee	Wet.	Algemene studie			73	Hoog		Eigen		24-9-2019
Dekker	1989	The macrozoobenthos of the subtidal western I		Wet.	Algemene studie								
Dekker & Drent	2013	The macrozoobenthos in the subtidal of the we		Grijs	Algemene studie								
Elias et al.	2012	Morphodynamic development and sediment bu		Wet.	Modelstudie								
Ens et al.	2007	Sublitorale natuurwaarden in de	Waddenzee	Grijs	Algemene studie								
Eriksson et al.	2010	Major changes in the ecology	Waddenzee	Wet.	Review			71	Hoog		Eigen		3-9-2019
Folmer	2017	Systematiek voor de bescherming van sublitora		Grijs	Algemene studie								
Folmer et al.	2017	Species Distribution Models of	Waddenzee	Grijs	Modelstudie			4	Gemiddeld		Eigen		24-9-2019
Gittenberger	2009	Inventarisatie van de aan hard substraat gerela		Grijs	Algemene studie								
Herman et al.	2018	Mud dynamics in the Wadden	Waddenzee	Grijs	Algemene studie								
Holthuijsen	2019	Cruiserapport Waddenmozaiek 2019		Grijs	Algemene studie								
Jennings	2001	Patterns and prediction of pop	Globaal	Wet.	Review			252	Hoog		Referenties	Tulp et	16-10-2019
Jongbloed et al.	2011	Nadere effectenanalyse Natu	Noordzee/Wadd	Grijs	Algemene studie			NA	NA		Referenties	Glorius	26-11-2019
Lotze	2007	Rise and fall of fishing and mar	Noordzee/Wadd	Wet.	Review			69	Gemiddeld		Referenties	Tulp et	16-10-2019
Lotze	2005	Radical changes of the Wadd	Waddenzee	Wet.	Review			85	Hoog		Eigen		11-10-2019
Lotze	2006	Depletion, Degradation, and R	Globaal	Wet.	Review			2419	Hoog		Eigen		11-10-2019
Lotze & Reise	2005	Human transformations of the	Waddenzee	Wet.	Review			134	Hoog		Eigen		5-11-2019
Miller et al.	2002	Detrimental effects of sedimer	Delaware Bay, A	Wet.	Review			60	Gemiddeld		Referenties	Hendric	20-11-2019
Min. I&M	2016	Natura-2000 Beheerplan Waddenzee		Grijs	Beheerplan								
Oost et al.	2018	Morfologie kombergingsgebieden Marsdiep en		Grijs	Algemene studie								
Oost et al.	2017	Wadden Sea Quality Status Report - Geomorp		Grijs	Algemene studie								
Piersma	2009	Threats to intertidal soft-sedim	Waddenzee	Wet.	Review			9	Laag		Eigen		3-9-2019
Reise et al.	1994	Biomass and abundance of m	Waddenzee	Wet.	Algemene studie			104	Gemiddeld		Eigen		5-11-2019
RWS	2019	Prognose baggervolumes Waddenzee vanaf 2		Grijs	Algemene studie								
Sas et al.	2016	Opzet en resultaten van het W	Waddenzee	Grijs	Notitie			NA	NA				
Smaal et al.	2014	Ontwikkeling stabiliteit sublitorale mosselbanke		Grijs	Algemene studie								
Smaal et al.	2019	Goods and services of marine bivalves		Wet.	Boek								
Thistle	1981	Natural physical disturbances	Globaal	Wet.	Review			275	Hoog	physical natura	Google scholar		3-9-2019

Auteurs	Jaar	Titel	Gebied	Publ. type	Soort studie	Beroeringsfactor	Geanalyseerd	Aantal citaties	Impact	Zoektermen	Herkomst	In/via	Download datum
Thistle	1981	Natural physical disturbances	Globaal	Wet.	Review			275	Hoog	physical natura	Google scholar		3-9-2019
Troost et al.	2013	Ontwikkeling van bodemdieren	Waddenzee	Grijs	Algemene studie			NA	NA		Eigen		11-10-2019
Troost et al.	2015	Ruimtelijke verspreiding van mosselen en Japa		Wet.	Algemene studie								
Van der Meer et al	2018	The Birth, Growth and Death c	Waddenzee	Wet.	Review			3	Gemiddeld		Referenties	Tulp et	16-10-2019
Van der Zee et al.	2017	Natuurwaarden sublitorale	Waddenzee	Grijs	Algemene studie								
Van Stralen	2019	Inventarisatie van het sublitora	Waddenzee	Grijs	Algemene studie			NA	NA		Opdrachtgever		19-12-2019
Visser	2015	Sublitorale waarden in de Waddenzee Hoofdlijn		Grijs	Notitie								
Visser	2015	Sublitorale waarden in de Waddenzee Verkenn		Grijs	Notitie								
Vorberg et al.	2009	Quality status report - subtidal habitats		Grijs	Algemene studie								
Wang et al.	2012	Morphodynamics of the Wadden Sea and its ba		Wet.	Modelstudie								
Wang et al.	2018	Sediment budget and morphological developm		Wet.	Modelstudie								
Wijnhoven	2018	T0 beoordeling kwaliteitstoest	Noordzee	Grijs	Algemene studie			NA	NA			DISCL(	11-11-2019
Zhu et al.	2016	Bed shear stress estimation or	Yangtze river de	Wet.	Effectstudie			16	Hoog	Bed shear stre:	Google scholar		17-10-2019
Hall et al.	1990	The impact of hydraulic dredg	Atlantische Oce	Wet.	Effectstudie	Ensis- en Spisulavisserij	Ja	117	Gemiddeld	Ensis fishery ef	Google scholar		20-1-2020
Tuck et al.	2000	The impact of water jet dredgir	Atlantische Oce	Wet.	Effectstudie	Ensis- en Spisulavisserij	Ja	79	Laag	Ensis fishery ef	Google scholar		20-1-2020
Carvalho et al.	2011	Relationship between razor cl	Atlantische Oce	Wet.	Effectstudie	Ensis- en Spisulavisserij	Ja	7	Laag	Ensis fishery ef	Google scholar		20-1-2020
Kogan et al.	2006	ATOC/Pioneer Seamount cable after 8 years o		Wet.	Effectstudie	Kabels-leidingen	Ja	32	Laag			Taormi	20-1-2020

Bijlage 3. Abiotische kenmerken

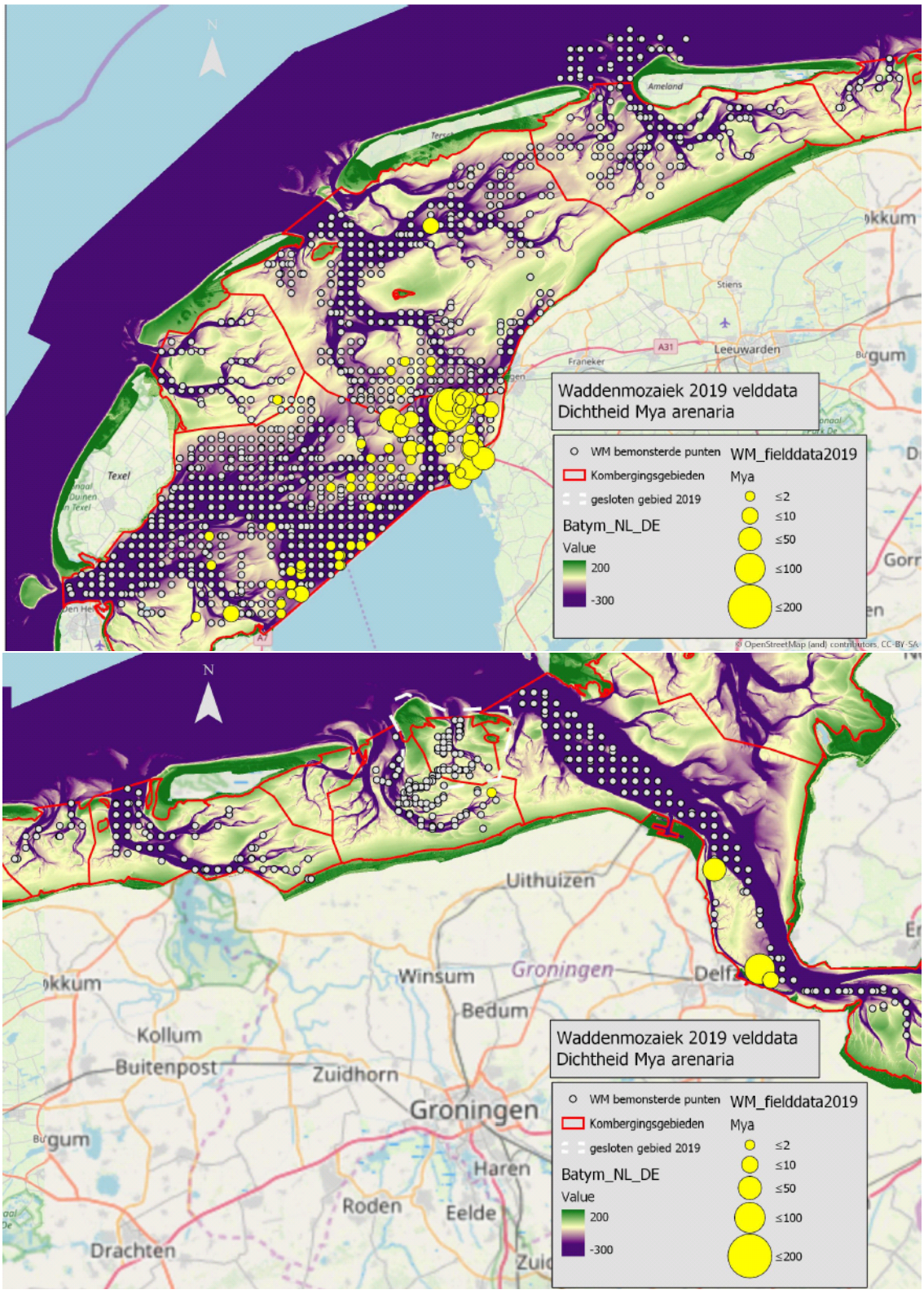


Figuur bijlage 3.1 Zoutgehalte Waddenzee (uit Christianen et al. 2015)

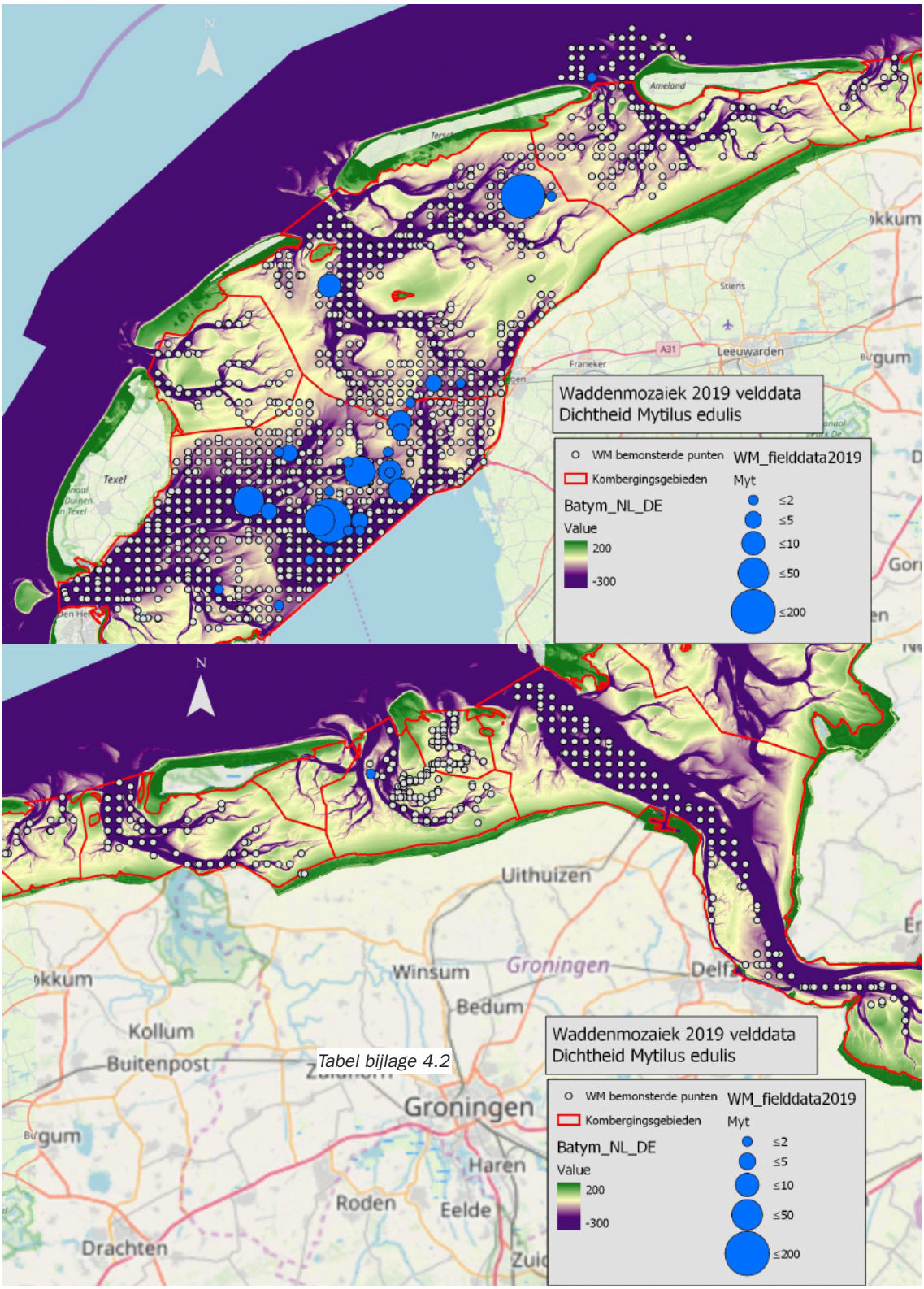
Bijlage 4. Biotische kenmerken

Tabel bijlage 4.1 Overzicht van de 26 meest belangrijke macrozoöbenthos soorten in termen van voorkomen, biomassa en dichtheid (aantallen) gevonden in 397 monsterstations in de herfst van 2008 in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee (Dekker & Drent 2013)

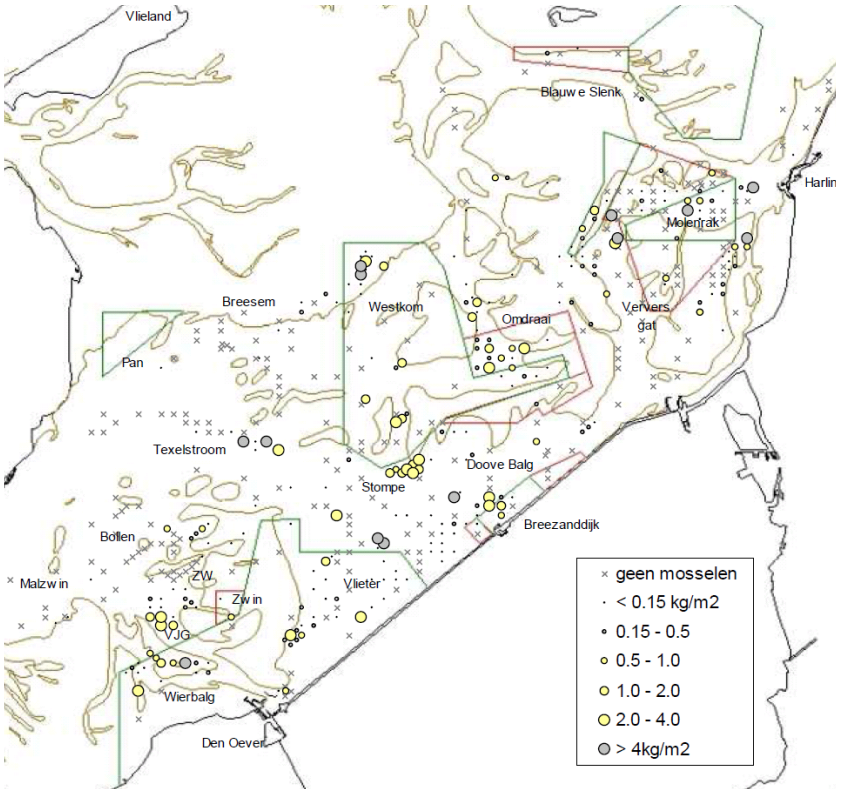
species	occur.	biomass	density	inv.	feeding	substrate
Scoloplos armiger	0.6	0.32	53	no	depos.	soft
Spio martinensis	0.58	0.04	153	no	depos.	soft
Aphelochaeta marioni	0.56	0.06	316	yes	depos.	soft
Capitella capitata	0.54	0.02	63	no	depos.	soft
Oligochaeta	0.38	0.01	94	no	depos.	soft
Pygospio elegans	0.37	0.01	48	no	depos.	soft
Nephtys hombergii	0.35	0.17	9	no	carni.	soft
Marenzelleria viridis	0.34	1.89	684	yes	depos.	soft
Heteromastus filiformis	0.33	0.08	23	no	depos.	soft
Ensis directus	0.27	21.09	60	yes	susp.	soft
Eteone longa	0.24	0.01	9	no	carni.	soft
Conopeum reticulum	0.23	NA	63	no	susp.	hard, s
Mya arenaria	0.23	16.89	196	yes	susp.	soft
Nephtys cirrosa	0.22	0.06	11	no	carni.	soft
Aricidea minuta	0.17	0	15	no	depos.	soft
Alitta virens	0.13	0.9	2	yes	omni.	soft
Metridium senile	0.12	0.18	24	no	susp.	hard, s
Lanice conchilega	0.12	1.48	38	no	susp.	soft
Balanus sp.	0.1	0.62	79	no	susp.	hard, s
Elminius modestus	0.09	0.08	26	yes	susp.	hard, s
Carcinus maenas	0.07	1.06	2	no	carni.	soft
Mytilus edulis	0.06	5.23	10	no	susp.	hard, s
Sagartia troglodytes	0.05	0.39	6	no	carni.	hetrog.
Crassostrea gigas	0.04	2.35	5	yes	susp.	hard, s
Cerastoderma edule	0.04	0.44	11	no	susp.	soft
Peringia ulvae	0.01	0.39	505	no	depos.	soft



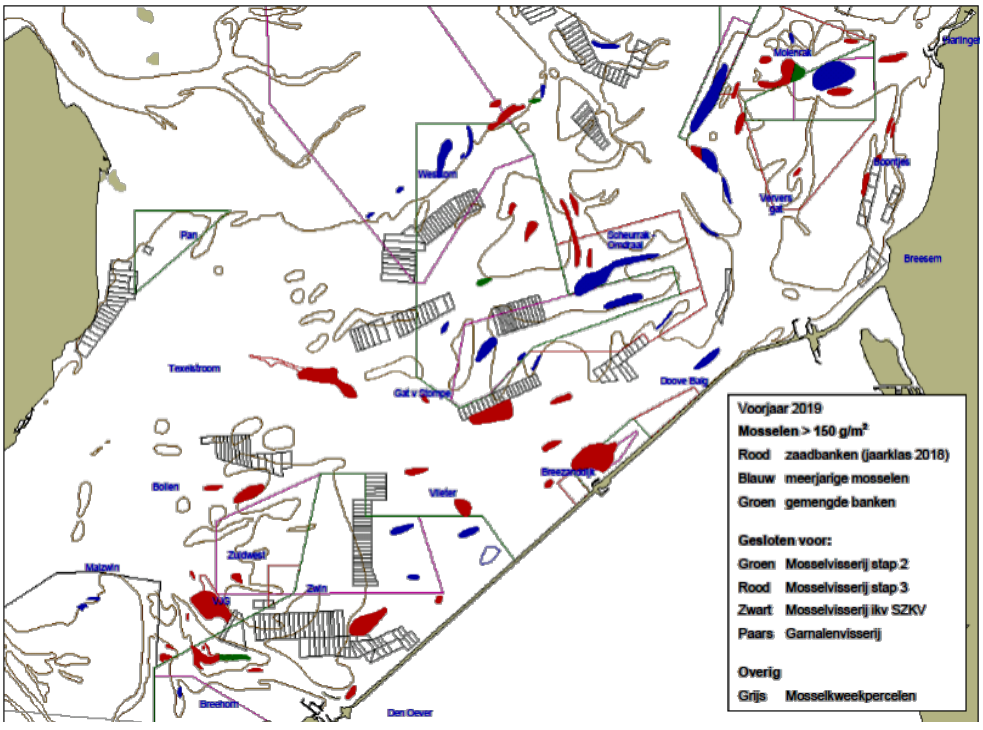
Figuur bijlage 4.1 Dichtheden (aantallen) strandgaper (Mya arenaria) in het sublitoraal van de Nederlandse Waddenzee (Holthuijsen 2019)



Figuur bijlage 4.2 Dichtheden (aantallen) van de mossel (Mytilus edulis) in het sublitoraal van de Nederlandse Waddenzee (Holthuijsen 2019)



Figuur bijlage 4.3 Boven: Dichtheid mosselen (totaal bestand in kg/m² netto) in het voorjaar van 2019. De gesloten gebieden in het kader van de mosselvisserij-transitie zijn groen- en rood omlijnd weergegeven (Van Stralen et al. 2019). Onder: Ligging van de bestanden mosselzaad en halfwas/meerjarige mosselen in visbare dichtheden (>0.15 kg/m2) in het voorjaar van 2019 en de verdeling daarvan over de gebieden in het kader van het Mosselconvenant en Viswad voor respectievelijk de mosselzaad- en garnalenvisserij (Van Stralen et al. 2019).



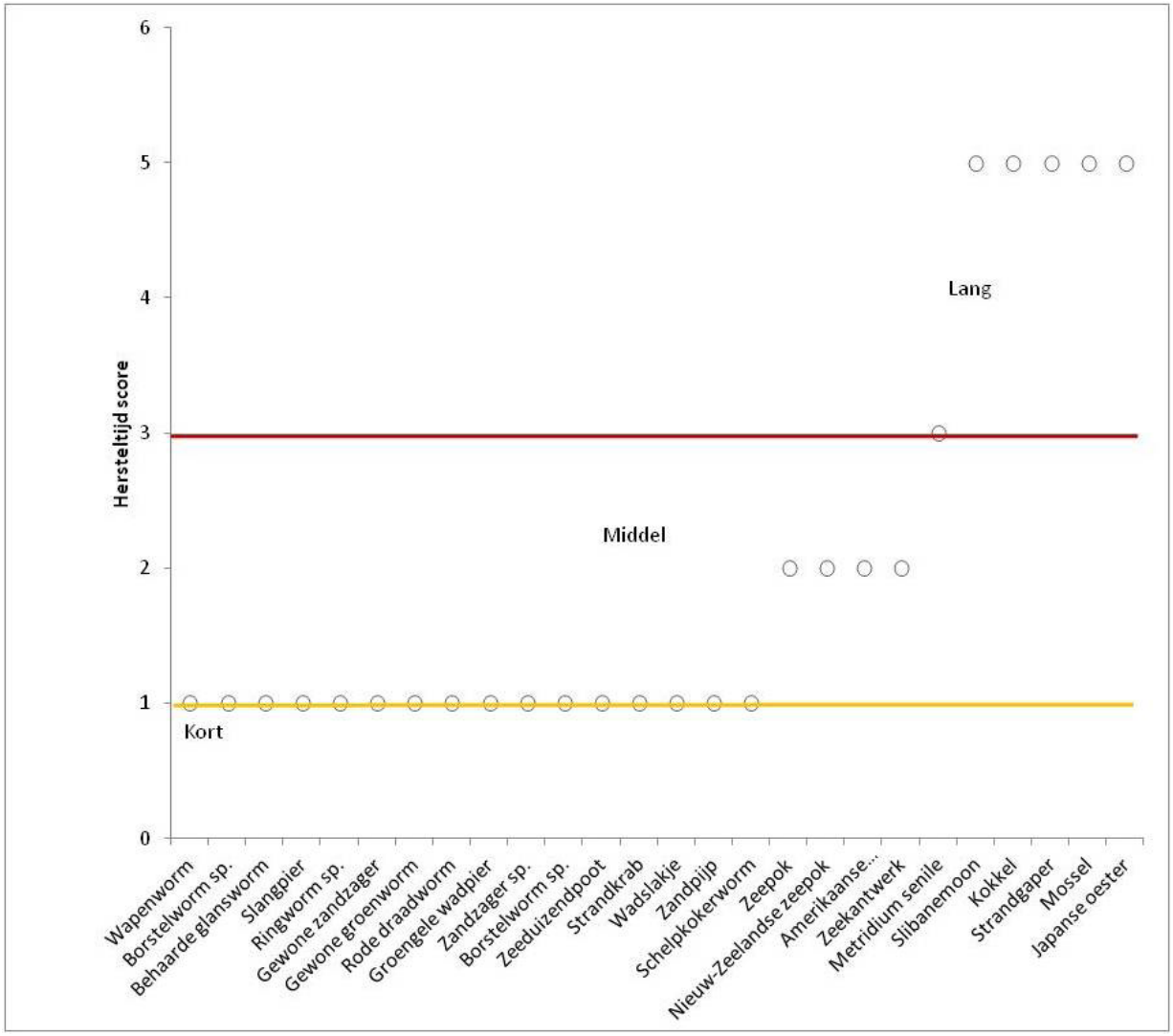
Bijlage 5. Sensitiviteit en hersteltijd

Sensitiviteitscore per soort staat in figuur 2.10 van het hoofdrapport, hieronder de onderbouwende tabel (tabel bijlage 5.1)

Tabel bijlage 5.1 Op volgende pagina. De 26 meest voorkomende soorten in het sublitorale deel in de Waddenzee. En mate van sensitiviteit. (o.a. gebaseerd op Dekker & Drent 2013)

Soort	NL	Foerageer -modus	Habitat	Mobiel/sessiel	Positie in sediment	Fragiel	Sensitief Score	Sensitief categorie
Scoloplos armiger	Wapenw orm	Deposit= neutraal=0	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	1	Laag
Spio martinensis	Borstelw orm sp	Deposit= neutraal=0	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	1	Laag
Aphelochaeta marioni	Behaarde glansw orm	Deposit= neutraal=0	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	1	Laag
Capitella capitata	Slangpier	Deposit= neutraal=0	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	1	Laag
Oligochaeta	Ringw orm sp	Deposit= neutraal=0	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	1	Laag
Pygospio elegans	Zandpijp	Deposit= neutraal=0	Rechtop= negatief=1	Relatief sessiel= negatief =1	In top 2 cm = negatief=1	fragiel =negatief = 1	4	Gemiddeld
Nephtys hombergii	Zandzager	Carnivoor= positief=-1	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	0	Tolerant
Marenzelleria viridis	Gew one groenw orm	Deposit= neutraal=0	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	1	Laag
Heteromastus filiformis	Rode draadw orm	Deposit= neutraal=0	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	1	Laag
Ensis directus	Amerikaanse zw aardschede	Suspension=neutraal=0	Neutraal =0	Relatief sessiel =negatief =1	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	2	Laag
Eteone longa	Groengele w adpier	Carnivoor= positief=-1	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	0	Tolerant
Conopeum reticulum	Zeekantw erk	Suspension=neutraal=0	Rechtop= negatief=1	Sessiel=s terk negatief =2	Sediment oppervlakte #NAAM?	Heel fragiel= sterk negatief =2	7	Hoog
Mya arenaria	Strandgaper	Suspension=neutraal=0	Neutraal =0	Sessiel= sterk negatief =2	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	3	Gemiddeld

Soort	NL	Foerageer -modus	Habitat	Mobiel/sessiel	Positie in sediment	Fragiel	Sensitief Score	Sensitief categorie
Nephtys cirrosa	Zandzager sp	Carnivoor= positief=-1	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	0	Tolerant
Aricidea minuta	Borstelw orm sp	Deposit= neutraal=0	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	1	Laag
Alitta virens	Zeeduizendpoot	Omni= neutraal=0	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Dieper dan 2cm= negatief/neutraal=0	fragiel =negatief = 1	1	Laag
Metridium senile	Zeeanjelier	Suspension=neutraal=0	Rechtop= negatief=1	Sessiel= sterk negatief =2	Sediment oppervlakte =sterk negatief=2	Heel fragiel= sterk negatief =2	7	Hoog
Lanice conchilega	Schelpkokerw orm	Suspension=neutraal=0	Rechtop= negatief=1	Sessiel= sterk negatief =2	Sediment oppervlakte =sterk negatief=2	fragiel =negatief = 1	6	Hoog
Balanus sp.	Zeepok	Suspension=neutraal=0	Neutraal =0	Sessiel= sterk negatief =2	Sediment oppervlakte =sterk negatief=2	Robuust= neutraal=0	4	Gemiddeld
Elminius modestus	Nieuw -zeelandse zeepok	Suspension=neutraal=0	Neutraal =0	Sessiel= sterk negatief =2	Sediment oppervlakte =sterk negatief=2	Robuust= neutraal=0	4	Gemiddeld
Carcinus maenas	Strandkrab	Carnivoor= positief=-1	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	In top 2 cm = negatief=1	fragiel =negatief = 1	1	Laag
Mytilus edulis	Mossel	Suspension=neutraal=0	Rechtop= negatief=1	Sessiel= sterk negatief =2	Sediment oppervlakte =sterk negatief=2	fragiel =negatief = 1	6	Hoog
Sagartia troglodytes	Slibanemoon	Carnivoor= positief=-1	Rechtop= negatief=1	Sessiel= sterk negatief =2	Sediment oppervlakte =sterk negatief=2	Heel fragiel= sterk negatief =2	6	Hoog
Crassostrea gigas	Japanse oester	Suspension=neutraal=0	Rechtop= negatief=1	Sessiel= sterk negatief =2	Sediment oppervlakte =sterk negatief=2	fragiel =negatief = 1	6	Hoog
Cerastoderma edule	Kokkel	Suspension=neutraal=0	Neutraal =0	Sessiel= sterk negatief =2	In top 2 cm = negatief=1	fragiel =negatief = 1	4	Gemiddeld
Peringia ulvae	Wadslakje	Deposit= neutraal=0	Neutraal =0	Mobiel=neutraal=0	Sediment oppervlakte =sterk negatief=2	fragiel =negatief = 1	3	Gemiddeld



Figuur bijlage 5.2 Herstelscore

Soort	NL	Levensduur	Jaarlijks succesvolle reproductie	Jaarlijkse Rekolonisatie volwassen	Habitat range (afhankelijk van specifiek korrelgrootte/ substraat)	Hersteltijd Score	Hersteltijd Categorie	Hersteltijd op basis van geanalyseerde studies (aan soort of vergelijkbare soorten)
Scoloplos armiger	Wapenworm	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Spio martinensis	Borstelworm sp	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Aphelochaeta marioni	Behaarde glansworm	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Capitella capitata	Slangpier	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Oligochaeta	Ringworm sp	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Pygospio elegans	Zandpijp	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Smal=1	1	Middel	< 1 jr
Nephtys hombergii	Zandzager	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Marenzelleria viridis	Gewone groenworm	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Heteromastus filiformis	Rode draadworm	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Ensis directus	Amerikaanse zwaardschede	Lang =1	Ja=0?	Nee=1	Breed=0	2	Middel	~2 jaar
Eteone longa	Groengele wadpier	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Conopeum reticulum	Zeekantwerk	Lang =1?	Ja=0	Deels=1	Smal=1	3	Lang	?
Mya arenaria	Strandgaper	Lang =1	Nee=1	Nee=2	Smal=1	5	Lang	> 5 jr
Nephtys cirrosa	Zandzager sp	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Aricidea minuta	Borstelworm sp	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Alitta virens	Zeeduizendpoot	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Metridium senile	Zeeanjelier	Lang =1?	?	Deels=1	Smal=1	3	Lang	?
Lanice conchilega	Schelpkokerworm	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Smal=1	1	Middel	~2 jaar
Balanus sp.	Zeepok	Kort =0	Ja=0	Nee=1	Breed=0	1	Kort	< 1 jr
Elminius modestus	Nieuw-zeelandse zeepok	Kort =0	Ja=0	Nee=1	Breed=0	1	Kort	< 1 jr
Carcinus maenas	Strandkrab	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Kort	< 1 jr
Mytilus edulis	Mossel	Lang =1	Nee=1	Nee=2	Smal=1	5	Lang	>5-10 jr
Sagartia troglodytes	Slibanemoon	Lang =1?	Ja=0?	Deels=1	Smal=1	3	Middel	?
Crassostrea gigas	Japanse oester	Lang =1	Nee=1	Nee=2	Smal=1	5	Lang	>5-10 jr
Cerastoderma edule	Kokkel	Lang =1	Nee=1	Nee=2	Breed=0	4	Lang	>3-8 jr *Piersma et al. 2001*
Peringia ulvae	Wadslakje	Kort =0	Ja=0	Ja=0	Breed=0	0	Middel	~1-2 jaar

Bijlage 6. Overige menselijke bodemberoering

In deze bijlage worden kokkelvisserij, Ensisvisserij en boomkorvisserij met wekkerkettingen toegelicht. Deze activiteiten zijn wel meegenomen in de literatuuranalyse, maar uiteindelijk niet in het hoofddocument beschreven omdat ze niet in het huidige sublitoraal van de Nederlandse Waddenzee voorkomen. De activiteiten worden wel in de bijlage toegelicht, omdat ze illustratief zijn en belangrijke referenties bevatten over hoe processen van beroering in het verleden zijn verlopen, of hoe beroering op grotere schaal /in diepere systemen plaatsvindt.

Kokkelvisserij

Sinds de jaren '50 tot 2005 kwam mechanische kokkelvisserij voor op grote schaal in het litorale deel van de Waddenzee. Hierbij werd met vloed vanaf een schip het sediment mechanisch losgespoten en afgeschaafd tot 3 cm diep waarna de kokkels via een kor aan boord werden gezogen. Het sediment werd zoveel mogelijk geloosd via de spijlen van de kor, waarna het terug zonk naar de bodem. Vanaf 1993 werd 25% van het litorale wad gesloten voor kokkelvisserij. Echter bleef de intensiteit hoog met een gemiddelde bevissing van 2286 ha kokkelbank per jaar in 1992-2001. Sinds 2005 is de mechanische kokkelvisserij verboden, in verband met onvoldoende duurzame ontwikkelkansen (Zwarts *et al.* 2004; Leopold *et al.* 2004; Brinkman *et al.* 2004). Tegenwoordig worden kokkelbanken weer met de hand bevist met behulp van een kokkelbeugel waarbij de kokkels worden opgeharkt en het sediment 3 cm diep wordt omgewoeld. Dit gebeurt voornamelijk op platen onder Ameland en Schiermonnikoog van juli t/m maart. Gemiddeld wordt zo'n 100 ha per jaar bevist (PRW 2011).



Figuur bijlage 6.1 Links: mechanische kokkelvisserij in actie nabij Vlieland in november 2002 (foto van M. de Jonge). Rechts: luchtfoto van de sporen van mechanische kokkelvisserij (foto van J. de Vlas). Schaal impressie: let op de twee mensen die op het wad staan (uit Kraan et al. 2007).

Morfologie

Voor deze review zijn twee effectenstudies gevonden over de effecten van mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee op morfologie. De belangrijkste resultaten tonen aan dat de gemiddelde korrelgrootte van het sediment toe nam na het opzuigen van kokkels (in vergelijking met onbeviste gebieden) (Piersma *et al.* 2001). Enkele weken na bevissing was het grootste deel van het slib in de bovenste laag van de bodem verdwenen (Zwarts *et al.* 2004).

Over de hersteltijd zijn geen exacte termijnen te noemen, omdat deze uiteen lopen in de gevonden literatuur. Zo vonden Piersma *et al.* (2001) dat de hersteltijd voor de korrelgrootte van het sediment, om weer tot de oorspronkelijke situatie terug te komen, meer dan 6 jaar duurde. Zwarts *et al.* (2004) zagen herstel van het slibgehalte en visserijsporen (zie figuur bijlage 5.1 voor impressie van vissporen) na één jaar, en na twee jaar was het slibgehalte zelfs iets hoger (mede veroorzaakt door slibinvang door recent gevestigde mossels) dan op de controleplek (een niet beviste, naburige kokkelbank). Voor de middenlange en lange termijn concluderen Zwarts *et al.* (2004) dat mechanische kokkelbevissing leidt tot een slibarmere wadbodem. Onder meer onderbouwd met resultaten uit een vergelijking tussen

gebieden open (slibarmer geworden) en gebieden gesloten voor bevissing. Het effect is gemaskeerd doordat de kokkelvisserij vooral plaats vond in gebieden die slibrijker zijn geworden.

Biotiek
Er zijn voor deze review drie effectenstudies geanalyseerd over de effecten van mechanische kokkelvisserij op de biotiek. De belangrijkste bevinding uit de geanalyseerde studies is dat het lastig blijkt een eenduidig effect van mechanische kokkelvisserij op de biotiek te geven. Piersma *et al.* (2001) vonden langdurende negatieve effecten van mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee op de broedval van tweekleppigen, met name op die van de kokkel, nonnetje en strandgaper. Als indirect effect wijzen de onderzoekers de verandering in sedimentcondities aan (d.w.z. verlies van fijn sediment), die van invloed kunnen zijn op de vestiging van de tweekleppige schelpdieren. Ook Leopold *et al.* (2004) vonden negatieve effecten van kokkelvisserij op aantallen kokkel, mossel en nonnetje. Enkele wormensoorten (wadpieren en zeeduizendpoten) lijken te profiteren van kokkelvisserij. In een recente studie van Beukema & Dekker (2018) wordt een afname van kokkel, nonnetje en strandgaper toegeschreven aan een negatief verband tussen de dichtheid van adulte kokkels en de dichtheden van jonge kokkels, nonnetjes en strandgapers. Mogelijk kan dit verklaard worden door de consumptie van larven door volwassen kokkels en verstoring van sediment door kokkelbewegingen. Afname van de jonge tweekleppigen is volgens de onderzoekers niet het gevolg van mechanische kokkelvisserij, maar het gevolg van een hoge dichtheid aan volwassen kokkels in het te bevissen gebied.

Onderzoek naar hersteltijden is schaars. In de door ons geanalyseerde literatuur geven Piersma *et al.* (2001) aan dat hersteltijden voor het kokkelbestand en andere tweekleppigen oplopen tot 10 jaar. Leopold *et al.* (2004) en Beukema & Dekker (2018) beschrijven geen hersteltijden.

Ensisvisserij
Sinds de jaren '80 wordt in de Nederlandse kustzone op Halfgeknotte strandschelpen (*Spisula*) gevist. Amerikaanse zwaardschedes (*Ensis*) werden als bijvangst gevangen en sinds de jaren '90 is de Ensisvisserij in ontwikkeling gekomen. Net als bij de mechanische kokkelvisserij wordt bij Spisula- en Ensisvisserij het sediment weggespoten, waarna een in diepte verstelbaar mes (~2.5 cm voor Spisula ; ~30 cm voor Ensis) door de bodem glijdt dat de schelpdieren omhoog brengt en waarna die via een kor worden opgezogen. De visserij vindt plaats op maximale dieptes van 15-20 m. Momenteel is enkel een vergunning voor Ensisvisserij afgegeven, waarbij vier schepen worden ingezet. Een maximale vangst van 8000 ton, komt neer op 160 ha bevist oppervlakte in de Noordzeekustzone voor Ensis en 400 ha bevist oppervlakte voor Spisula (Agonus Fisheries Consultancy 2018, Ensisvisserij; Agonus Fisheries Consultancy 2018; Spisulavisserij). De Spisulavisserij in Europa is de afgelopen jaren sterk toegenomen (data Eurostat).

Morfologie
In totaal zijn twee internationale studies gevonden die gekeken hebben naar effecten van Ensisvisserij op de bodemmorfologie. Over de specifieke effecten van Spisulavisserij zijn geen studies gevonden. Zowel Hall *et al.* (1990) en Tuck *et al.* (2000) vonden direct na de visserij fysieke effecten op de bodemmorfologie in baaien ten westen van Schotland in de Atlantische Oceaan. Zo waren duidelijke sporen in de zeebodem zichtbaar van circa 2.5 m breed. Ook vond Hall *et al.* (1990) een grotere korrelgrootte in het beroerde gebied en was het sediment in de sporen vloeibaar ten opzichte van de omgeving.

Echter, de sporen begonnen op te vullen na 5 dagen en waren niet meer zichtbaar na 11 weken (Tuck *et al.* 2000). Hall *et al.* (1990) zag na 40 dagen geen verschil meer in bodemmorfologie tussen het beroerde en controle gebied.

Biotiek

Er zijn in totaal 3 studies gevonden die effecten beschrijven van Ensisvisserij op de bodemgemeenschap. Er zijn geen effectstudies gevonden voor Spisulavisserij. In het experiment van Hall *et al.* (1990) waren aantallen infauna significant afgenomen 1 dag nadat de visserij had plaatsgevonden. Ook Tuck *et al.* (2000) vond een significante afname van de biomassa, soortenrijkdom en aantallen direct tot vijf dagen na de impact. Vooral de grotere bodemdieren zoals de Zeeklit (*Echinocardium cordatum*) en de Noordkromp (*Arctica islandica*) bleken gevoelig voor de visserij waarbij 10-28% van de individuen werd beschadigd. In een recentere studie in de Atlantische Oceaan ten zuiden van Portugal werden eveneens significante korte termijneffecten gevonden voor aantallen, soortenrijkdom, biomassa en diversiteit van infauna 1-3 dagen na de visserij (Carvalho *et al.* 2011). Vooral soorten met lage tot geen mobiliteit werden hierbij getroffen, waaronder Gastropoden en borstelwormen uit de families Pectinariidae en Sabellidae. Echter nam na de visserij de ratio van carnivore versus suspension-feeders toe.

De hersteltijden na de impact door Ensisvisserij waren relatief kort. Hall *et al.* (1990) vond na 40 dagen geen effecten meer op de bodemgemeenschap. Ook Tuck *et al.* (2000) toonden aan dat de soortenrijkdom en aantallen hersteld waren 5 dagen na de impact. De biomassa was hersteld na 11 weken. Carvalho *et al.* (2011) vonden eveneens een kort herstel van de gemeenschapsparameters van 3 dagen na de impact. De aantallen en soortenrijkdom van Gastropoden waren langdurig lager (niet significant) dan voor de impact, tot 120 dagen. Ook voor de eerder genoemde borstelwormen bleef het effect langer zichtbaar tot 14 dagen na de impact. De schelpdieren gaven geen eenduidige trend weer. De relatief korte hersteltijden werden in alle studies verklaard door de aanpassingen van infauna aan hun van nature dynamische leefgebied. Carvalho *et al.* (2011) gaven daarbij aan dat stormen in het gebied waarschijnlijk een grotere impact hebben op de bodemgemeenschap dan de Ensisvisserij.

Boomkorvisserij met wekkerkettingen

Boomkorvisserij is een vangstmethode die al eeuwen wordt toegepast door Nederlandse vissers en door de jaren heen zijn slechts kleine veranderingen in het tuig aangebracht. De traditionele boomkor bestaat net als bij de garnalenvisserij uit twee sloffen aan een stalen buis (van 4.5 m per kant) met daartussen één of meer wekkerkettingen die 4-8 cm diep door de bodem ploegen (Polet & Depestele 2010). Momenteel vindt er geen boomkorvisserij met wekkerkettingen plaats in de Waddenzee. Voor de Noordzeekustzone zijn er momenteel 5 kotters (max. 300 pk) met een vergunning (vissersbond.nl). Circa 9% van het oppervlakte van de Noordzeekustzone is jaarrond gesloten voor alle soorten bodemberoerende visserij (Vrooman *et al.* 2018).

Morfologie

Van de negen geanalyseerde studies over boomkorvisserij met wekkerkettingen, is er één studie die effecten van bodemvisserij op de morfologie beschrijft, gesitueerd in de Koster zee (Skagerrak - west Zweden). De belangrijkste resultaten tonen aan dat er een tijdelijke en ruimtelijke verspreiding (tot 10 m hoogte) van sedimentdeeltjes is die opwervelen door bodemvisserij, met name op slibrijke bodems (Linders *et al.* 2018). De hersteltijd van troebelheid door opwerveling van sedimentdeeltjes, na passage van bodemvisserij, kan enkele uren tot vijf dagen duren, afhankelijk van de locatie (en bezinkingsnelheid van de deeltjes) (Linders *et al.* 2018).

Biotiek

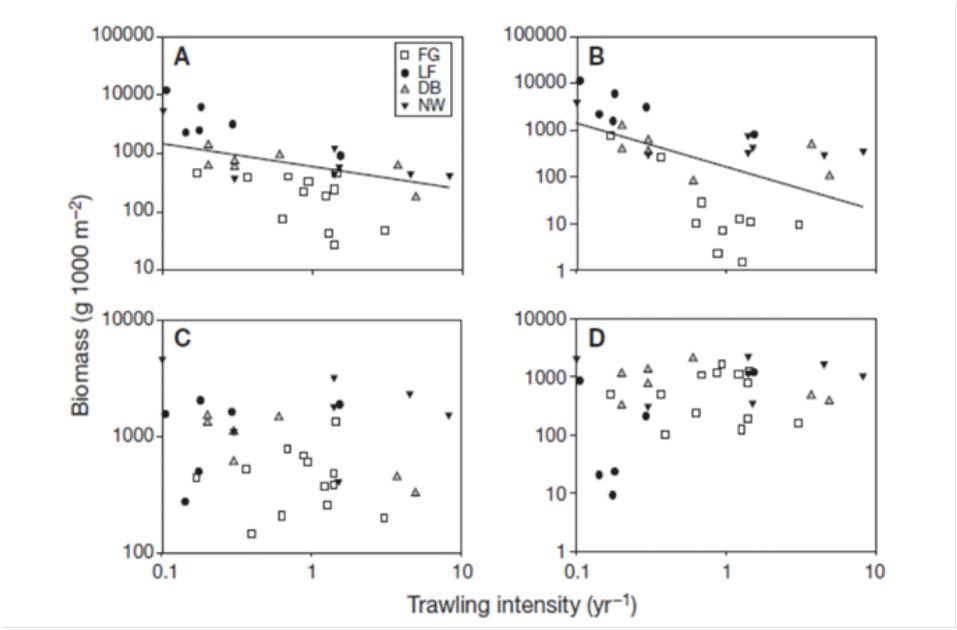
Er zijn voor deze review zeven effectenstudies geanalyseerd die effecten beschrijven van bodemvisserij op de biotiek, met de Noordzee (Ierse zee, Het Kanaal, Kattegat) als studiegebied.

De belangrijkste resultaten tonen aan dat passage van bodemvisserij directe mortaliteit van bodemdieren tot gevolg heeft, evenals afname van aantal soorten en diversiteit. Ook kunnen er verschuivingen in de samenstelling van de bodemdiergemeenschap plaatsvinden (Bergman & Santbrink; Hiddink *et al.* 2006; Tillin *et al.* 2006; Hintz *et al.* 2009; Skold *et al.* 2018). In de Noordzee kan directe sterfte variëren van 5-50% ten opzichte van initiële dichtheden van bodemdieren. De lagere

sterftecijfers gelden voor kleinere bodemdieren die in de zeebodem leven, vergeleken met hogere sterfte voor grotere soorten (voor sommige schelpdieren kan de sterfte oplopen tot 68%). Voor wat betreft functionele groepen zijn permanent vastgehechte soorten, filter feeders, langlevende en grotere soorten meer gevoeliger bevonden voor bodemvisserij (Tillin *et al.* 2006).

Het effect van bodemvisserij op de bodemdiergemeenschap is afhankelijk van het type habitat waarin visserij plaatsvindt. Rijnsdorp *et al*. (2018) vonden de grootste effecten van visserij in Noordzee gebieden met veel langlevende soorten, die een hogere biomassa hadden bij een hoger grindgehalte (en minder voorkwamen in slibrijke gebieden). Wanneer gebieden van nature een hogere dynamiek hebben, zoals een hogere bodemschuifspanning, heeft verstoring door bodemvisserij een kleiner effect op het bodemleven dan in gebieden met een lage natuurlijke dynamiek (Hiddink et al 2006; Van Denderen *et al.* 2015; Rijnsdorp *et al*. 2018). Reiss *et al.* (2009) vonden echter dat ook in zwaar beroerd gebied, bodemdiergemeenschappen nog gevoelig kunnen reageren op bodemberoering en er schade aangericht kan worden bij een verdere intensivering van bodemvisserij.

Er zijn aanwijzingen dat herhaaldelijke menselijke bodemberoering leidt tot een afname van de sensitieve gemeenschappen (gebaseerd op o.a. Tillin *et al*. 2006, van Denderen *et al*. 2015). Figuur bijlage 5.2 laat bijvoorbeeld zien dat bij toenemende frequentie van bodemvisserij, sensitieve en langzaam herstellende soorten (zoals filterende schelpdieren (A) en sessiele organismen (B)) steeds verder afnemen, terwijl aaseters (C) en gravende organismen (D) geen trend laten zien. Aanhoudende menselijke beroering kan daardoor leiden tot een verschuiving naar een ongevoeliger en meer veerkrachtiger gemeenschap die aan veel beroering is aangepast en normaal gezien alleen in hoog dynamische gebieden voorkomt (Kaiser *et al*. 2000, Callaway *et al*. 2007, Tillin *et al.* 2006, Hiddink *et al*. 2006, van Denderen *et al*. 2015). Ook natuurlijke beroering in een hoge frequentie, bijvoorbeeld in een jaar met veel stormen, kan leiden tot verandering in de soortensamenstelling doordat bijvoorbeeld mosselbanken met geassocieerde fauna uit een bepaald gebied verdwijnen (Smaal *et al*. 2013 en Smaal *et al.* 2014).



Figuur bijlage 6.2 Biomassa uitgezet tegen de intensiteit van boomkorvisserij (frequentie per jaar) voor 4 ecologische groepen. (A) Filterende organismen, (B)vastgehechte organismen, (C) aaseters,en (D) gravende organismen. Bij een significant verband is er een regressielijn weergegeven. Gebieden in de Noordzee FG: Fladengronden; LF: Long Forties; DB: Doggersbank; NW: Northwest Rough (figuur uit Tillin et al. 2006).

Over het herstel van bodemdiergemeenschappen na bodemvisserij is nog veel onbekend. Duidelijk is wel dat dit minimaal enkele jaren duurt (Pommer *et al.* 2016; Skold *et al.* 2018).

Colofon

Foto Voorplaat
Waddenzeebodem, Foto: A&W

A. Rippen, E. van der Zee , N. Fieten, J. Latour & E. Wymenga 2020
Review effecten natuurlijke bodemdynamiek en menselijke bodemberoering in de sublitorale Waddenzee.
Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Feanwâlden

Opdrachtgevers
Programma naar een Rijke Waddenzee
Zuidersingel 3
8911 AK Leeuwarden

Rijkswaterstaat Dienst Noord Nederland
Zuidersingel 3
8911 AV Leeuwarden

Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek bv
Suderwei 2
9269 TZ Feanwâlden
Telefoon 0511 47 47 64
info@altwym.nl

www.altwym.nl



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

PROGRAMMA **NAAR EEN RIJKE WADDENZEE**