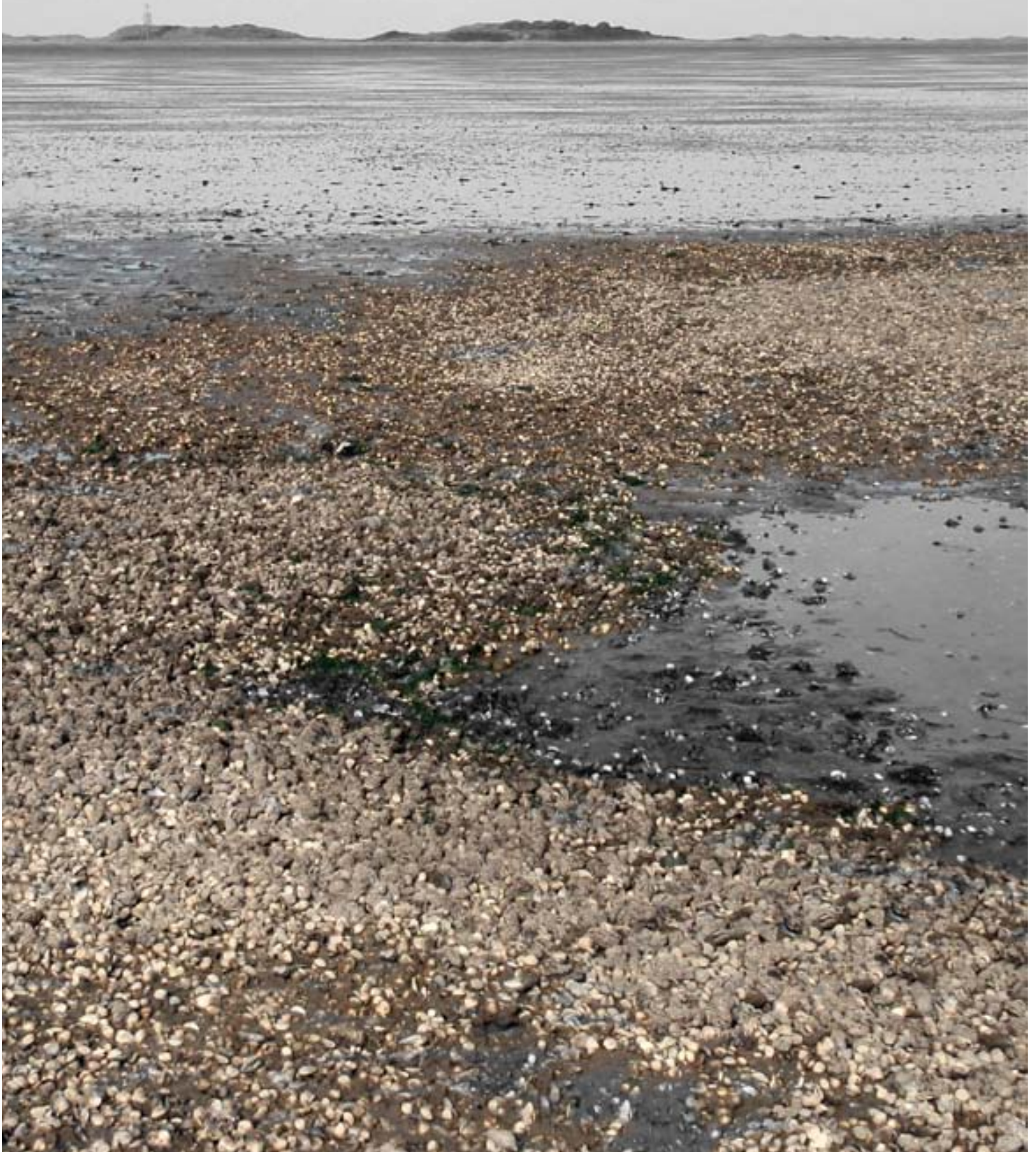


WADDENSLEUTELS

Herstel van sleutelprocessen in het
intergetijdegebied van de Waddenzee
Bijlage D - projectplan



Inhoudsopgave

1)	Samenvatting van het probleem en schets van de aanpak	5
2)	Doelen en output van het project	8
3)	Motivatie en bijdrage aan doelen Waddenfonds	10
4)	Aanvragers, projectorganisatie en relatie tot andere projecten	13
5)	Integratie van dit project met andere reeds lopende projecten in de Waddenzee	16
6)	Wetenschappelijke achtergrond	16
	a) Veranderingen in de Waddenzee: het voedselweb ‘in de tang’?	16
	b) Sleutelprocessen in het intergetijde gebied: het belang van biobouwers	21
	c) Het belang van terugkoppelingen tussen organismen en abiotische factoren	23
	d) Waarom zijn mosselbanken niet meer stabiel?	24
	e) Wat zeggen stabiele isotopen gehalten van organismen?	26
7)	Praktische uitwerking herstelproject en indicatoren ontwikkeling	28
	a) Praktijkproef herstel mosselbanken Schiermonnikoog, Ameland en Griend	28
	i) Locatiekeuze	28
	ii) Opzet van de herstelwerkzaamheden met verschillende methoden	30
	iii) Monitoring van de meest effectieve methode, verklaring van uitblijven van herstel in sommige situaties	32
8)	Taakverdeling tussen de projectmedewerkers	32
9)	Vervolgstappen: hoe kunnen resultaten van het project bijdragen aan herstel op grotere schaal?	35
10)	Projectrisico's	36
11)	Bronnen	37

1. Samenvatting van het probleem en schets van de aanpak

Behoud en herstel van biodiversiteit en natuurwaarden is een kernprioriteit geworden in het beheer van de Waddenzee. Waar vroeger het beheer vooral gevoerd werd vanuit belangen van scheepvaart, visserij, kustverdediging en recreatie, is nu het belang van natuur mede voorop komen te staan, gevoed door verschuivingen in publieke opinie, nationaal beleid en internationale afspraken (Natura 2000, Kaderrichtlijn Water, Vogel- en habitatrichtlijn, World Heritage Site status). De Waddenzee is een uniek natuurgebied: het is het grootste aaneengesloten intergetijdegebied ter wereld. Nederland draagt grote verantwoordelijkheid ten aanzien van het behoud, of zelfs herstel, van de ecologische kernwaarden van het Wadden ecosysteem. Vandaar dat Natuurmonumenten namens de gezamenlijke natuurbeschermingsorganisaties rond de Waddenzee (ook SBB, Groninger Landschap, It Fryske Gea, Waddenvereniging en Stichting Wad) nu dit voorstel indient.

Deze verschuiving in aandacht is een belangrijke constatering omdat de laatste decennia veel biodiversiteit verloren is gegaan. Zo zijn door overbevissing in de periode 1988-1990 vrijwel alle droogvallende mosselbanken verdwenen. Daarmee verdween een sleutelsoort waar veel andere organismen van afhankelijk waren. Verbetering van milieucondities (zoals afname eutrofiëring, het stoppen van de mechanische kokkelvisserij) lijken vooralsnog nauwelijks te leiden tot terugkeer van de soorten en de processen die verdwenen zijn. Actieve pogingen tot herstel van de natuurwaarden in het intergetijdegebied vinden op dit moment nog niet plaats. De nu lopende herstelprojecten hebben vooral betrekking op de 'randen van het wad' (eilanden, kwelders, aangrenzende provincies), maar laten de 'kern' van het wadengebied zelf, namelijk het intergetijdegebied (de droogvallende platen en geulen daartussen) vooralsnog buiten beschouwing.

Nieuwe wetenschappelijke studies benadrukken in toenemende mate het belang van "biobouwers" (ecosystem engineers) in intergetijdegebieden als de Waddenzee. Biobouwers zijn organismen die niet alleen op milieuomstandigheden (zoals sedimenteigenschappen en hydrodynamiek) reageren, maar deze ook zelf sterk beïnvloeden. Zo creëren ze in eerste instantie geschikte leefomstandigheden voor zichzelf en ook voor andere soorten, en spelen hiermee een sleutelrol in voortbestaan van biodiversiteit en het natuurlijk



Foto 1. Overzicht van een jonge mosselbank in de buurt van Schiermonnikoog (Foto H Olf)

functioneren van ecosystemen. In de Waddenzee zijn het vooral mossels en zeegrassen die deze rol spelen, met de Japanse oester als biobouwende nieuwkomer. Echter, zowel zee-grasvelden als droogvallende mosselbanken zijn grotendeels verdwenen. Voor zeegrassen lijkt de huidige troebelheid van het water een beperkende factor, waardoor te weinig licht in het water doordringt. Herstel van zee-grasvelden door plaatselijke ingrepen lijkt op de korte termijn daarom slechts beperkt mogelijk. Diverse eerdere herstelprojecten van zee-grasvelden hebben gefaald, waaruit blijkt dat de algemene milieuraandvoorwaarden de laatste decennia beperkend zijn geworden. Mosselbanken zijn veel korter geleden uit het litoraal (intergetijdegebied) verdwenen, maar komen nog wel overvloedig in het sublitoraal (niet-droogvallende deel) voor, vooral in de westelijke Waddenzee, waar ze onderhevig zijn aan intensieve exploitatie door mossel(zaad)vissers. Dit betekent dat er nog wel veel reproductie is van mossels, doch dat deze zich niet meer handhaven als stabiele droogvallende mosselbanken, zoals dat vroeger het geval was. In 1978 was er, verspreid over de Waddenzee, nog een oppervlakte van 4000 hectare aan stabiele mosselbanken. In 1997 was daar nog ongeveer 100 hectare van over. Momenteel zijn dergelijke banken vrijwel verdwenen, al hebben zich in het oostelijk deel van de Nederlandse Waddenzee wel weer wat jonge en nog instabiele mosselbanken gevormd. Daarmee is een groot aantal planten- en diersoorten dat van deze banken afhankelijk is, ook verdwenen of sterk afgenomen.

Dit is echter niet de enige bedreiging van de biodiversiteit in de Waddenzee. Niet alleen zijn de zee-grasvelden en mosselbedden verdwenen, ook zijn de meeste toppredatoren (roggen, haaien, bruinvis, tuimelaar) uit het systeem verdwenen of sterk uitgedund en is de waterkwaliteit verslechterd (eutrofiëring, vertroebeling van het water door meer slib). Wadbodems worden voortdurend overal verstoord (tot tientallen keren per jaar op dezelfde plek) door visserij op platvis, garnalen, mossels en kokkels en wadpieren, door zand- en schelpenwinning, en door allerlei andere baggeractiviteiten (o.a. onderhoud vaargeulen). Het netto resultaat van al deze veranderingen is het grotendeels 'instorten' van het voedselweb van de Waddenzee. Tegenwoordig wordt het voedselweb van de Waddenzee gedomineerd door soorten die vooral van algen (fytoplankton) en dood organisch materiaal (detritus) leven, zoals wormen en garnalen, met nog enkele van hun predatoren (platvis, sommige vogelsoorten). Vroeger waren algen in microbiële matten (microfytobenthos) en zeegrassen waarschijnlijk de belangrijkste primaire producenten, en leverde het veel helderder water waarmee deze soorten geassocieerd waren mogelijkheden voor een veel meer soortenrijke, complexe voedselweb structuur, met planteneters, predatoren van planteneters, predatoren van die predatoren, en tenslotte toppredatoren.

Maatregelen om dit verlies aan ecologische waarden tegen te gaan zijn gericht geweest op de verbetering van de waterkwaliteit (minder eutrofiëring; vermindering van zwevend slib in het water) en soms op minder bodemverstoring (sluiten kokkelvisserij hele Waddenzee, sluiten mossel- en garnalenvisserij van sommige delen). Deze maatregelen hebben echter niet geleid tot het gewenste herstel van mosselbanken en zee-grasvelden, en hebben mede daarom niet geleid tot terugkeer van de meer complexe voedselweb structuur die het Waddenecosysteem vroeger kenmerkte.

Dit project bestaat uit twee onderdelen. In een grootschalige praktijkproef, uit te voeren op vooralsnog drie locaties: wadplaten onder Schiermonnikoog (oostelijke Waddenzee), onder Ameland, en onder Griend (westelijke Waddenzee) zal, in eerste instantie op beperkte, experimentele schaal, getracht worden om mosselbanken te herstellen. Daarnaast zal op basis van stabiele isotopen een set procesindicatoren ontwikkeld worden waarmee we de mate van herstel van voedselweb structuur kunnen bepalen en evalueren. Het gaat dan niet alleen om het deel-ecosysteem van het open wad, maar ook om de daaraan gekoppelde systeem van de kwelders; de beide habitattypen zijn via sedimentatieprocessen functioneel sterk met elkaar verbonden (Olf *et al.* 1997). Een belangrijk aspect van deze koppeling is de mogelijkheid om met stabiele isotopen het belang van kwelders als 'slibvangers' te kwantificeren, wat een onderbouwing kan bieden voor plannen tot uitbreiding

van het kwelderareaal. Dit is niet alleen relevant vanuit een ecologisch gezichtspunt, omdat groeiende kwelders en wadplaten kunnen helpen zorgen voor extra kustveiligheid bij de verwachte zeespiegelstijging.

De drie onderzoekslocaties bieden een goed contrast tussen de oostelijke Waddenzee (Schiermonnikoog en Ameland) waar droogvallende mosselbanken nog wel plaatselijk aanwezig zijn, maar sterk instabiel zijn, en de westelijke Waddenzee (Griend), waar deze vrijwel verdwenen zijn. Vergelijking tussen de locaties levert daarom inzicht op in de oorzaken van aantasting en verlies van deze belangrijke biobouwer. Het mosselbank herstel onderdeel wordt zo aangepakt dat het niet alleen tot het gewenste resultaat leidt (herstel van mosselbanken), maar dat het ook kennis oplevert over de oorzaken waarom herstel tot op dit moment is uitgebleven. Daarbij worden twee groepen hypothesen onderzocht: i) problemen rond de vestiging van jonge mossels op een kaal substraat, en ii) problemen rond de duurzame handhaving van reeds gevestigde mosselbanken.

Stabiele isotopen zijn van nature voorkomende stoffen waarmee een groot aantal sleutelprocessen in ecosystemen gekwantificeerd worden, bijvoorbeeld ten aanzien van land-zee uitwisseling, voedselweb relaties, en chemische processen in de bodem. Zo wordt koolstof, stikstof en zwavel elk in twee of meer vormen aangetroffen, welke een verschillend atomair gewicht hebben. Het aandeel van de verschillende isotopen kan met behulp van gevoelige apparatuur (massaspectrometer) bepaald worden in bijvoorbeeld planten, dieren, water, slib, of de bodem. Dit is een bijzonder rijke bron van informatie over sleutelprocessen in ecosystemen. Zo kunnen de volgende procesgerelateerde grootheden op deze manier worden bepaald:

- de kwantitatieve positie van verschillende organismen in voedselketens (m.b.v. stikstof isotopen), het aandeel van microfytobenthos versus fytoplankton in het dieet van schelpdieren (koolstofisotopen)
- het belang van kwelders als afzettingsbron ("sink") voor slib (m.b.v. koolstofisotopen) wat onder meer van belang is voor begrijpen van veranderingen in troebelheid van het water
- het relatief belang van aerobe versus anaerobe (zuurstofloze) omstandigheden in organische stof omzettingen in het sediment (m.b.v. zwavel isotopen), welke mede bepaald wordt door biobouwers.

Hiertoe wordt een zeer groot aantal monsters van organismen, bodem en gesuspenderd materiaal geanalyseerd op stabiele isotopen waarvan de praktische verzameling van die monsters reeds is gefinancierd in andere projecten. Deze koppeling met andere lopende Waddenzee onderzoeksprojecten zal de praktische haalbaarheid van dit voorstel sterk vergroten en heeft de kosten sterk beperkt. Deze bemonstering betreft onder andere een reeds gestarte Waddenzee-brede bemonstering van benthos over een 500 m grid (doch waarbij geen stabiele isotopen analyses waren opgenomen, i.v.m. de kosten). Met deze methode kan bepaald en getest worden (aan de hand van de praktijkproef) of herstel van mosselbanken leidt tot herstel van een meer complexe voedselweb structuur, en wordt ook een nieuwe monitoringsmethode ontwikkeld waarmee Waddenzee-brede kansrijkdom kaarten voor aantasting en herstel van voedselweb structuur worden gemaakt. Zo kan worden bekeken of op andere plekken waar (nog) geen actief herstel van mosselbanken plaatsvindt, toch ook de gewenste effecten op voedselweb structuur gerealiseerd worden (herstel van banken kan ook spontaan plaats gaan vinden als de milieucondities verder verbeteren).

2. Doelen en output van het project

Het hier voorgestelde project zal de volgende doelen realiseren:

Duurzaam herstellende mosselbanken.

Geïnspireerd door uit de wetenschappelijke literatuur of uit de praktijk bekende ecosystemeprocessen, zullen verschillende methoden tot herstel van mosselbanken worden uitgetoet. Dit herstel wordt uitgevoerd op kansrijke locaties voor stabiele mosselbankontwikkeling onder de kust van de eilanden Schiermonnikoog, Ameland en Griend. Het betreft hier alle gebieden die momenteel gesloten zijn voor de visserij. Het simultaan experimenteren van verschillende methoden zal de kans op succes sterk vergroten en zal dan ook zeer waarschijnlijk een aantal stabiele mosselbanken opleveren. We verwachten, en zullen dit in kaart brengen, dat met dit herstel de ecologische processen en soorten die met dergelijke banken geassocieerd zijn, zullen terugkeren. Wel willen we opmerken dat het niet volledig is uitgesloten dat randvoorwaarden die zich buiten de controle van de herstelmaatregelen bevinden (zoals watertemperatuur, of het ontbreken van toppredatoren, die predatoren van mossels onder controle houden), uiteindelijk beperkend blijken te zijn. In dit geval is echter belangrijke kennis opgedaan, die dan zal moeten leiden tot bijstelling van de nationale herstelambities, of tot aanvullende maatregelen om deze randvoorwaarden te verbeteren.

Praktijkkennis voor natuurherstel in het intergetijdengebied

Tot nu toe hebben natuurbeschermingsorganisaties geen grote rol gespeeld bij de ontwikkeling van natte natuur in het intergetijdengebied van het Waddengebied. Het beheer van de Waddenzee wordt uitgevoerd door V&W. Daarnaast heeft LNV invloed op de biodiversiteit van de Waddenzee door zonerings van het gebruik door exploitanten van het gebied (afsluiting en vergunningverlening). Kaderrichtlijn Water en Natura 2000 geven beperkte herstelopgaven aan. In structureel natuurbeheer is niet voorzien. De voorgestelde maatregelen, uit te voeren door de terreinbeheerders, zullen daarom als belangrijk eindproduct hebben dat praktijkkennis wordt ontwikkeld bij deze organisaties en de beleidsmakers over herstel van natte natuur in het Waddengebied. Voorts kan deze praktijkkennis die op de locaties van de herstelmaatregelen is opgedaan worden toegepast op meer locaties, als bekend is welke herstelmaatregelen het meest effectief zijn. Deze praktijkkennis zal vooral worden toegepast door terreinbeherende natuurbeschermingsorganisaties.

Nieuwe methoden voor bepaling van natuuraantasting en herstel

De natuur van het Waddengebied gaat een onzekere nabije toekomst tegemoet. Stijging van watertemperatuur en de zeespiegel door klimaatverandering zorgen voor nieuwe omstandigheden die zich in het recente verleden niet hebben voorgedaan. Ook levert verdere uitbreiding van de Waddenhavens, wat steeds gepaard gaat met toenemende baggeractiviteiten, nieuwe bronnen voor verstoring op. Anderzijds is de waterkwaliteit ten aanzien van voedingsstoffen en gifstoffen de afgelopen jaren verbeterd. Het is belangrijk om te kunnen meten of het netto effect van deze veranderingen een verbetering of verslechtering van natuurkwaliteit oplevert. Klassieke monitoring activiteiten in de Waddenzee, zoals van waterkwaliteitsparameters door Rijkswaterstaat, en monitoring van vogels en zeezoogdieren, volstaan waarschijnlijk niet meer. Er is behoefte aan meer gevoelige methoden die dichterbij staan bij wat we werkelijk willen weten, namelijk de verschuivingen in de rijkdom en de complexiteit van het voedselweb. Dergelijke veranderingen kunnen veel meer zeggen over de onderliggende processen en oorzaken die tot veranderingen in de stand van bijvoorbeeld vogels en zoogdieren hebben geleid. Onduidelijkheid over dergelijke processen en oorzaken staat momenteel het oplossen van allerlei bestuurlijke, juridische en poli-

tieke problemen sterk in de weg. De verwachting is dat dit project een deel van deze onduidelijkheden kan wegnemen. De nieuwe methoden zullen vooral toepassing vinden bij de overheidsdiensten die verantwoordelijk zijn voor monitoring in het Waddengebied. Daarnaast hebben de betrokken natuurbeschermingsorganisaties grote belangstelling voor deze methoden.

Kaarten voor kansrijkdom van, en problemen met, natuurherstel

Stabiele mosselbanken kwamen historisch niet overal in de Waddenzee voor. Net als andere biobouwers zoals zeegrassen stellen mossels specifieke eisen aan de diepte en stroomsnelheid van het water, eigenschappen van het sediment, biotische randvoorwaarden (aan- of aanwezigheid van andere soorten) en mogelijke andere nog onbekende factoren. Het project identificeert welke randvoorwaarden belangrijk zijn, waardoor nieuwe kaarten geproduceerd kunnen worden die naast fysieke karakteristieken ook informatie bevatten over ecologische interacties. Aan de hand van deze kaarten zal met meer zekerheid kunnen worden ingeschat op welke locaties herstel van mosselbanken het meest kansrijk is. Daarnaast worden de nieuwe methoden die in het project ontwikkeld worden toegepast op een reeds lopende Waddenzee brede grid bemonstering van benthos (in het sediment levende dieren). Hierdoor kan ruimtelijke variatie in voedselweb structuur worden opgespoord, wat kaarten oplevert van plekken waar deze structuur nog het meest intact is. Deze informatie kan gebruikt worden bij planning van toekomstige herstelmaatregelen. Ook leveren deze kaarten locaties op waar juist veel aantasting plaatsvindt. Dit kan leiden tot aanpassing van versturende activiteiten, zoals reductie van baggerwerkzaamheden aan vaargeulen, of verdere reductie van nutriëntenaanvoer via oppervlaktewater. Deze kaarten kunnen gebruikt worden bij planvorming door zowel de overheid als terreinbeheerders.

Disseminatie van resultaten van het project

Alle resultaten van het project zullen worden vastgelegd in een eindrapport, en waar mogelijk daarnaast in wetenschappelijke publicaties. Over het verloop van het project en verkregen tussenresultaten zal naar de omgeving (bijvoorbeeld bewoners van de eilanden) worden gecommuniceerd op een per geval passende vorm (nieuwsbrief, bijeenkomsten, lokale bladen). Ook wordt actief de input gezocht van lokale bewoners die nog historische kennis hebben over het gebied (bijvoorbeeld de vroegere ligging van mosselbanken). Daarnaast worden de resultaten van het project verspreid door middel van een slotsymposium. Deze disseminatie van kennis, door de verschillende gebruikte vormen, zal gericht zijn op diverse groepen en instanties: beleidsmakers, natuurbeheersinstanties, belanghebbers, wetenschappelijke onderzoekers.



3. Motivatie en bijdrage aan doelen Waddenfonds

Dit project wordt voorgedragen voor financiering uit het Waddenfonds omdat het sterk bijdraagt aan direct herstel van flora en fauna (vooral ecosysteembouwers), terwijl het daarnaast een grote verbetering van de kennishouding rond de Waddenzee zal betekenen. Deze bijdrage is specifiek:

Bijdrage aan vergroting van de natuur- en landschapswaarden van de Waddenzee:

Het kabinet heeft een aantal belangrijke doelen vastgesteld voor de Waddenzee, die uiterlijk in 2030 gerealiseerd moeten zijn (zoals vastgesteld in het Investeringsplan Waddenfonds, dd 6/6/06, en de PKB Waddenzee). Deze doelen voor 2030 zijn onder meer:

- de flora en fauna zijn rijk, gevarieerd en in hoeveelheden aanwezig zoals die ook voor de periode van eutrofiëring aanwezig waren
- de waterkwaliteit is zodanig dat flora en fauna zich optimaal kunnen ontwikkelen
- de verstoring van de bodem is zodanig beperkt dat ongestoorde natuurlijke mosselbanken en zeegrasvelden gedijen. Het areaal aan mosselbanken met een natuurlijke dichtheid en het areaal aan zeegrasvelden is vergroot;

Het Waddenfonds is een belangrijk instrument om deze doelen te bereiken, aangezien in het Investeringsplan Waddenfonds is vastgelegd dat dit fonds mede bedoeld is voor het verkrijgen van kennis over:

- de ontwikkeling van de Waddenzee op lange termijn, mede in het licht van de verwachte klimaatontwikkelingen;
- morfologische en ecologische processen en de interactie daartussen.

Daarnaast is een belangrijk doel van het Waddenfonds om concreet herstelmaatregelen te stimuleren die direct effect hebben op herstel van flora en fauna. Een doel dat overigens niet vrijblijvend is. De nationale regelgeving rond de Waddenzee komt voort uit internationale regelgeving. Zo wordt het gebied beschermd door de Conventies van Ramsar, Bonn en Bern en de Kaderrichtlijn Water. Ook valt de Waddenzee onder de Habitat- en Vogelrichtlijn, welke zijn vertaald naar N2000 wetgeving. Biogene structuren, zoals mosselbanken, hebben hierbinnen een beschermde status.

Dit voorstel richt zich zowel op het praktisch herstel van mosselbanken (welke beschouwd worden als een belangrijke randvoorwaarde voor natuurherstel), als wel het ontwikkelen van kennis over de belangrijkste processen die hebben geleid tot verlies van natuurwaarden en natuurlijk functioneren van de Waddenzee tot nu toe. Bovendien worden de herstelwerkzaamheden zodanig ingericht, gevolgd en ingebed dat dit herstel en geassocieerd onderzoek generieke kennis opleveren over beperkende factoren voor natuurherstel in het intergetijdegebied voor de gehele Waddenzee. De herstelwerkzaamheden worden zo aangepakt dat onderscheid kan worden gemaakt tussen factoren die de initiële vestiging beperken, versus factoren die de overleving (stabiliteit) van al gevestigde banken beperken.

Er is momenteel een grote behoefte aan deze kennis. Tot nu toe blijkt dat (plaatselijke) vermindering van activiteiten (zoals uitsluiten visserij) onvoldoende heeft geleid tot herstel. In dat geval zijn er drie mogelijkheden: i) de algemene condities in de Waddenzee, bijvoorbeeld de troebelheid van het water, zijn ongeschikt voor herstel waar dan ook, of, ii) het herstel/stoppen van activiteiten is niet op de meest kansrijke plekken uitgevoerd, of, iii) het ecosysteem heeft een 'zetje' nodig om bepaalde natuurlijke processen weer op gang te helpen. Er is nu vooral behoefte aan ontwikkeling en toepassing van snelle bioindicatoren waarmee bepaald kan worden waar de herstellkansen voor biobouwers (zoals mosselbanken), en de daarmee geassocieerde rijke flora en fauna het grootst zijn. Daarbij kan één van de mogelijke uitkomsten van het project zijn dat onder de huidige randvoorwaarden en

activiteiten dat nergens het geval is – maar ook dat is belangrijk om te weten. In dat geval dient meer aandacht te worden gericht op herstel van de juiste randvoorwaarden (zoals waterkwaliteit, inclusief troebelheid). Het is belangrijk dat deze nieuwe indicatoren ook gebruikt worden in concrete uitvoeringsprojecten, als blijkt dat sommige locaties wel kansrijk zijn. De natuurbeschermingsorganisaties die dit voorstel indienen zullen dit nastreven. Dit kan voorkomen dat dure maatregelen worden uitgevoerd op plekken zonder kans op succes, omdat de plaatselijke randvoorwaarden voor die ontwikkelingen niet aanwezig zijn, en er dus ‘geld in het water wordt gegooid’.

Veel van de huidige methoden voor het vaststellen van ecosysteemherstel (zoals volgen populatieverloop van kenmerkende organismen) leveren pas op langere termijn (> 10 jaar) het meeste resultaat op en zijn alleen permanent vol te houden tegen hoge kosten. Er is behoefte aan indicatoren die snel en gestandaardiseerd kunnen worden bemonsterd, en een eenduidige, objectieve indicatie geven over herstel of aantasting van trofische structuur. Ondanks dit ‘snel resultaat’, dienen deze indicatoren een duidelijk beeld te scheppen over langere tijdsintervallen: directe observaties van soorten zijn onderhevig aan grote ruimtelijke en temporele variatie – wat goede bemonstering moeilijk maakt (maar niet onmogelijk).

Dit project zal daarom duidelijk z’n weerslag vinden binnen het Waddengebied zelf. De deelnemende natuurbeschermingsorganisaties verklaren zich bereid om de in het project te ontwikkelen bioindicatoren binnen de looptijd van het project te gaan gebruiken bij diverse concrete voorgenomen uitvoeringsmaatregelen, waardoor de kans op hun succes wordt vergroot. Het project draagt hierdoor bij aan een belangrijk doel van het Waddenfonds, namelijk het herstel van een rijke flora en fauna in de Waddenzee, en het herstel van ongestoorde natuurlijke mosselbanken. Concrete maatregelen (zoals het uitsluiten van visserij of baggeren, of actief herstel) zullen met behulp van de bioindicatoren uit het project kunnen worden uitgevoerd op alleen die plekken waarvan aangetoond wordt dat de kans op succes het grootst is. Centraal staat hierbij te bepalen i) welke plekken de grootste dynamische wisselwerking vertonen tussen kwelder en intergetijde ecosystemen, en ii) welke plekken het minst aangetaste voedselweb hebben. Beide procesindicatoren vergroten sterk de kans op succes van herstel van natuurlijke mosselbanken en zeegrasvelden na het staken van activiteiten (zoals visserij of baggeren) of actieve herstelmaatregelen (stimulering vorming natuurlijke mosselbanken).

Bijdrage aan verbetering van de kennishouding:

Naast deze directe resultaten in de vorm van vergroting van het succes van uitvoeringsprojecten (inzicht in hoe mosselbanken het best hersteld kunnen worden), draagt het project in belangrijke mate bij aan de verbetering van de kennishuishouding rond de Waddenzee, een ander belangrijk doel van het Waddenfonds. Er is grote behoefte aan een relatief groot, integratief project dat in staat is belangrijke inhoudelijke verbanden te leggen tussen diverse nu lopende grote initiatieven op het gebied van onderzoek en uitvoering van herstelmaatregelen in de Waddenzee. Het nu voorgestelde integratieve project is anders van karakter dan andere projecten met een dergelijk doel, en daardoor innovatief. Waar integratie vaak wordt nagestreefd (maar vaak niet wordt bereikt) door middel van complexe simulatiemodellen en nieuwe overlegstructuren, wordt in dit geval integratie veel eenvoudiger bereikt door gestandaardiseerde metingen van stabiele isotopen gehalten van organismen op verschillende posities in het voedselweb uit een groot aantal verschillende onderzoeksprojecten. Deze aanpak legt belangrijke wetenschappelijke/inhoudelijke verbanden tussen die projecten, stimuleert samenwerking, evenals de ontwikkeling van een gemeenschappelijke interpretatie van de verschillende resultaten. Ook bevordert het project sterk dat resultaten uit meer op fundamenteel onderzoek gerichte projecten vertaald en geïmplementeerd worden in concrete uitvoeringsmaatregelen. Daarom draagt het project sterk bij aan de *verbetering van de kennishuishouding rond het Waddengebied*.

Ten aanzien van prioriteiten uitvoeringsplan Waddenfonds

Het voorstel voldoet op een groot aantal punten aan de prioritaire thema's van het uitvoeringsplan Waddenfonds, doordat het integraal is, voorwaardenscheppend, urgent, wervend en een groot draagvlak heeft. Concreet is hier sprake van ten aanzien van:

Integraliteit: Het voorstel voldoet aan meerdere doelen/belangen uit de vier hoofddoelstellingen van het Waddenfonds, door zowel aan versterking van natuurwaarden als aan de kennishuishouding bij te dragen.

Voorwaardenscheppend karakter: Het voorstel is voorwaardenscheppend, omdat het gericht is op het duurzaam mogelijk maken van mosselbankherstel (en geassocieerde flora- en fauna) op de daarvoor meest kansrijke plaatsen, alsmede identificeert op welke plekken de randvoorwaarden momenteel beperkend zijn.

Urgentie: Stabiele mosselbanken zijn nu meer dan 15 jaar uit de Waddenzee verdwenen, waardoor de met deze banken geassocieerde organismen en natuurlijke processen bijzonder sterk onder druk staan. Actie op korte termijn is geboden.

Wervingskracht: De ideeën over de oorzaken van aantasting en herstel die we in dit voorstel hebben neergelegd zijn creatief en wervend. Herstel van mosselbanken, en de geassocieerde indicatorenontwikkeling is niet eerder op deze manier aangepakt. Het voorstel staat voor een nieuwe integrale manier van denken over de koppeling tussen biodiversiteit en ecosysteemprocessen in de Waddenzee.

Draagvlak: Doordat het voorstel is ingediend namens de volledige samenwerkende natuurbeschermingsorganisaties die actief zijn in de regio, is het draagvlak van het voorstel groot, omdat deze organisaties namens hun leden handelen.



Foto 2. Accumulatie van pseudofaeces op en naast een mosselbank bij Schiermonnikoog (Foto H Oloff)

4. Aanvragers, projectorganisatie en relatie tot andere projecten

De samenhang van het consortium

Vereniging Natuurmonumenten is de penvoerder van het project en treedt in die hoedanigheid op namens de partners van de Coalitie Wadden Natuurlijk die actief zijn in het Waddengebied (Natuurmonumenten, Staatsbosbeheer, It Fryske Gea, Het Groninger Landschap, Landschap Noord Holland, Waddenvereniging, Vogelbescherming en Stichting Wad). Natuurmonumenten is de beheerder van zowel het Nationaal Park Schiermonnikoog, als van het eiland Griend. Staatsbosbeheer is ook als terreinbeheerder betrokken bij het programma en treedt op als cofinancier. Het voorliggende voorstel reflecteert aldus een grote consensus in gewenste aanpak tussen de betrokken natuurbeschermingsorganisaties en onderzoeksinstellingen. Tot nu toe hebben de terreinbeheerders als Natuurmonumenten en Staatsbosbeheer zich vooral bezig gehouden met het beheer en behoud van biodiversiteit van de duinen en de kwelders, minder met het aangrenzende wad (ook al worden in toenemende mate wadgebieden in beheer gekregen). In toenemende mate beseft Natuurmonumenten, samen met de andere natuurbeschermingsorganisaties, dat wad, kwelder en duinen weliswaar verschillende habitats zijn maar door alle connecties tevens als één ecosysteem moeten worden gezien. De natuurbeschermingsorganisaties hopen in de toekomst dan ook de samenwerking met de kennisinstituten te versterken, waarbij dit voorstel een eerste belangrijke stap is. Verantwoord beheer vraagt immers om betere kennis over de samenhang tussen de verschillende habitats in het Wadden ecosysteem. Veel bedreigde organismen die organisaties zoals Natuurmonumenten trachten te beschermen (lepelaars, scholeksters en eidereenden, bijvoorbeeld), broeden in de duinen en kwelders, maar foerageren op het wad. Hierbij vormen mosselbanken de aantrekkelijkste foerageerplaatsen; mosselbanken zijn dus waarschijnlijk van essentieel belang bij de overleving van dergelijke soorten in een veranderend milieu. Ook wordt in toenemende mate beseft dat biodiversiteit van kwelders (planten, insecten, ganzen en andere vogels) niet los kan worden gezien van de condities in de wadgeulen en wadplaten, bijvoorbeeld via de aanvoer van voedingsstoffen en sediment uit zee bij overstroming. Mosselbedden en zeegrasvelden zullen een grote invloed hebben op deze voedingsstoffen en sedimenthuishouding, maar reageren er ook op. Door de koppeling van processen tussen geulen, wadplaten, kwelders en duinen is het noodzakelijk dat bescherming van soorten en ecosystemen veel meer gerealiseerd wordt op het niveau van getijdebasins met hun aangrenzende 'droge' delen, dan dat het kunstmatig wordt 'afgekapt' bij de kwelderrand.

(Mede)aanvragers en taakverdeling

ROL NATUURMONUMENTEN

Als penvoerder voert Natuurmonumenten namens de natuurbeschermingsorganisaties het project uit. De samenwerking met een aantal wetenschappelijke partners is vastgelegd in een samenwerkingsovereenkomst. In deze overeenkomst is vastgelegd dat de Vereniging Natuurmonumenten eerstverantwoordelijk is voor:

- de formele projectbegeleiding en bijbehorende administratieve handelingen
- de realisatie en inrichting van de infrastructuur, waaronder
- de inrichting en het onderhoud van de voorgestelde herstelmaatregelen en praktijkproeve
- overleg met de betrokken onderzoeksinstellingen

ROL STAATSBOSBEHEER

Als cofinancier is Staatsbosbeheer nauw betrokken bij de inrichtingsplannen. NM en SBB zullen samen opereren in de samenwerking met de kennisinstituten.

Een aantal Nederlandse onderzoeksinstellingen draagt zorg voor de monitoring, onder-

zoek en evaluatie van het project. Elke van de instituten brengt hierbij zijn eigen expertise in, waardoor de taakverdeling als volgt is:

ROL RIJKSUNIVERSITEIT GRONINGEN (RUG)

De Rijksuniversiteit Groningen trekt een consortium van wetenschappelijke instellingen die in het voorstel participeren, en organiseert de administratie van het onderzoeksdeel van het project. Elk van de instituten brengt hierbij zijn eigen expertise in:

De Rijksuniversiteit Groningen (Prof. H. Olf, Prof. T. Piersma, Dr. B.K. Eriksson, Prof. J.P. Bakker) is eerstverantwoordelijk voor

- realisatie van de monitoring, onderzoek van de voorgestelde mosselbank herstelmaatregelen en praktijkproeven
- toepassing van de ontwikkelde procesindicatoren
- aanstelling, begeleiding en huisvesting van promovendi, postdoc's
- wetenschappelijke integratie en rapportage

De RuG brengt daarnaast kennis in specifieke kennis in over

- vogelpredatie op schelpdieren en functioneren van macrobenthos levensgemeenschappen (Prof. T. Piersma)
- voedselwebstructuur en biodiversiteit (Prof. H. Olf)
- experimentele mariene community ecology (Dr. B.K. Eriksson)
- sedimentatieprocessen op kwelders (Prof. J.P. Bakker)

Daarnaast heeft de RuG voor de realisatie van het kennisdeel van het project een aantal samenwerkingspartners:

De Vrije Universiteit (Dr. M.P. Berg) brengt expertise in over stabiele isotopen analyse aan detritivore evertibraten,



Foto 3. Een soortenrijk poeltje, vol met grondeltjes en garnalen, op een jonge mosselbank bij Schiermonnikoog (Foto H Olf)

het Koninklijk Nederlands Instituut voor Zeeonderzoek (NIOZ, Texel) brengt kennis in over

- stabiele isotopen en biogeochemische processen in mariene ecosystemen (Prof. J. Sinninghe Damsté)
- de betekenis van predatie door garnalen en vissen op de vestiging en handhaving van schelpdieren (Dr. H. van der Veer)
- Daarnaast is het NIOZ verantwoordelijk voor de chemische analyses van de stabiele isotopen

het Centrum voor Estuarien en Marien Onderzoek van het Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO-CEME, Yerseke)

- Het NIOO-CEME brengt specifieke kennis in op het gebied van:
- de ontwikkeling van de stabiele isotopen procesindicatoren voor voedselwebaantasting en -herstel (Prof. J. Middelburg)
- identificatie van de sleutelprocessen bij de vorming en stabiliteit van mosselbanken (Dr J. van de Koppel).

Ten behoeve van vergelijking en toetsing van conclusies met inzichten uit de Duitse Waddenzee, waar vergelijkbare problemen spelen, is Prof. K. Reise (Alfred Wegener Instituut, List/Sylt) gevraagd om als externe adviseur op te treden.

Projectteam

Voor de uitvoering en organisatie van het project stelt Natuurmonumenten een projectteam samen met daarin vertegenwoordigers van de kennisinstellingen en de andere natuurbeschermingsorganisaties. Dit team zal bestaan uit vertegenwoordigers van:

- Natuurmonumenten
- Staatsbosbeheer
- Waddenvereniging
- Stichting Wad
- Staatsbosbeheer
- It Fryske Gea
- Groninger Landschap
- Rijksuniversiteit Groningen
- Centrum voor Estuariene Ecologie – Nederlands Instituut voor Ecologie
- Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee

Het team deelt de volgende taken

- begeleiding van de voortgang van het project
- communicatie intern
- communicatie extern
- afstemming met andere herstelprojecten in de Waddenzee
- organisatie van start-, tussen- en eindsymposium

Start-, tussen- en eindsymposium

Aan het begin van het project wordt een startsymposium georganiseerd, waarvoor specialisten ten aanzien van ecologie van mosselbanken en estuariene voedselwebben uit binnen- en buitenland (Duitsland, Denemarken, UK) worden uitgenodigd. Tijdens dit symposium wordt achtergrondkennis uitgewisseld, ervaringen uit het buitenland met herstel van mosselbanken besproken, en de mening van externe specialisten over de projectopzet gevraagd. Voor het symposium worden zowel beleidsmakers, natuurorganisaties als onderzoeksinstituten van buiten het project uitgenodigd. Halverwege het project (na 2,5 jaar) wordt weer een symposium met deze partners georganiseerd, om de eerste resultaten te evalueren. Aan het eind van het project wordt een eindsymposium georganiseerd waarop de resultaten van het project aan dezelfde partijen worden gecommuniceerd, in aanvulling op het eindverslag.

5. Integratie van dit project met andere reeds lopende projecten in de Waddenzee

Voor het onderdeel 'ontwikkeling en toepassing van indicatoren van sleutelprocessen' is het nodig om een zeer groot aantal monsters te analyseren op stabiele isotopen. Deze analyses zijn relatief duur en arbeidsintensief. Indien deze monsters ook nog in het in het onderhavige project verzameld zouden worden zou dit onbetaalbaar worden. De verzameling en voorbereiding van monsters van organismen in het intergetijdegebied (zoals macrobenthos) is namelijk ook bijzonder arbeidsintensief. Door interne afspraken binnen de participanten van het project kunnen we echter de monsters van organismen en hun voedsel die nodig zijn voor het uitvoeren van dit deel van het project om niet betrekken uit een vijftal nu lopende onderzoeksprojecten, waarbij in geen van elk dergelijke analyses zijn gepland en/of begroot. Financiering van het nu voorstelde project zou een geweldige bundeling van krachten betekenen van deze projecten, vooral wat betreft vertaling van de resultaten ervan in praktische beheersmaatregelen en kansrijkdomkaarten. Het betreft de volgende nu lopende (voornamelijk net gestartte) projecten, ter totale waarde van 6,800 k€:

1. NIOZ project "*Synoptic benthic Mapping of the Wadden Sea Intertidal*" (financiering NWO-ZKO, NIOZ en NAM) Totale kosten: 2,500 k€
2. NIOO-CEME/RUG project "*Unraveling interacting feedback loops that control non-linear salt-marsh dynamics: combining experiments and modeling*" (financiering NWO-ZKO) Totale kosten: 600 k€
3. RUG/NIOZ/NIOO-CEME project: "*A human-driven regime shift through the loss of ecosystem engineers: consequences for the trophic structure and recovery potential of the Wadden Sea*". (financiering NWO-ZKO). Totale kosten: 1000 k€
4. RUG/VU project: "*Food web assembly during salt marsh succession on Schiermonnikoog*" Totale kosten: 250 k€
5. It Fryske Gea/RUG project "*Biodiversiteit en natuurbeheer van vastelandskwelders*" (financiering Waddenfonds) Totale kosten: 1500 k€
6. NIOO/NIOZ project "*NICYCLE The nitrogen cycle and changes in the carrying capacity of coastal waters*" (financiering NWO-ZKO). Totale kosten: 950 k€

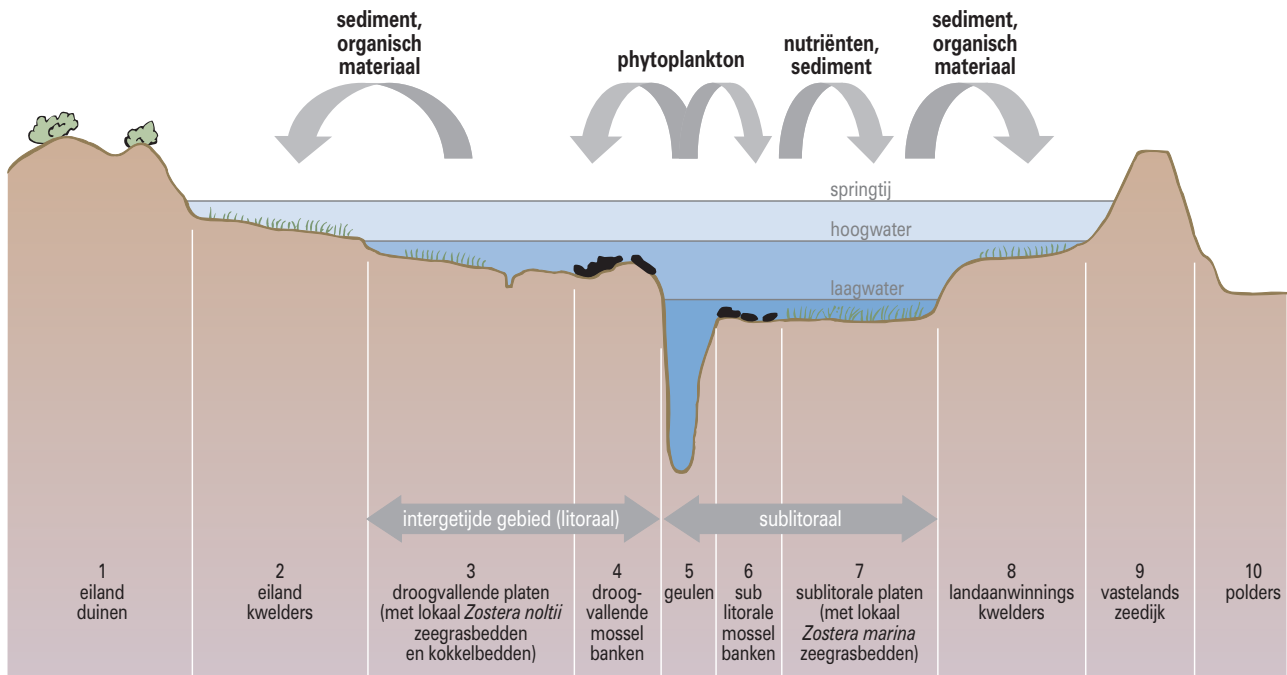
Door het nu voorgestelde project te gebruiken als 'bindmiddel' tussen deze projecten, wordt een zeer grote toegevoegde waarde gecreëerd, met als resultaat een grote versterking van de kennisinfrastructuur rond de Waddenzee.

6. Wetenschappelijke achtergrond

a) Veranderingen in de Waddenzee: het voedselweb 'in de tang'?

Het recent verdwijnen van stabiele mosselbanken uit de Waddenzee is niet de eerste natuuraantasting die heeft plaatsgevonden. Om de oorzaken van deze veranderingen beter te begrijpen, en tegenmaatregelen te formuleren, is het belangrijk om dit verlies in de context te plaatsen van andere grote veranderingen die reeds hebben plaatsgevonden. Als achtergrond bij de voorgenomen herstelmaatregelen en indicatoren ontwikkeling wordt daarom nu eerst een overzicht gegeven van sleutelprocessen in de Waddenzee, en de veranderingen die daarin zijn opgetreden.

Eerder in deze aanvraag is gesteld dat de interactie tussen de verschillende deelhabitats van de Waddenzee (Noordzee, zeegaten, geulen, wadplaten, kwelders) essentieel is om het huidige optredende verlies van natuurwaarden beter te begrijpen. Figuur 1 geeft een overzicht van de ruimtelijke samenhang van een aantal van deze habitats in relatie tot het natuurlijk functioneren van de Waddenzee, op basis van de nu beschikbare kennis. De basis van het voedselweb in estuaria als de Waddenzee wordt gevormd door de primaire produ-



Figuur 1. De belangrijkste habitat typen van de Waddenzee, met hun functionele verbindingen door transport van fytoplankton, nutriënten en slib.

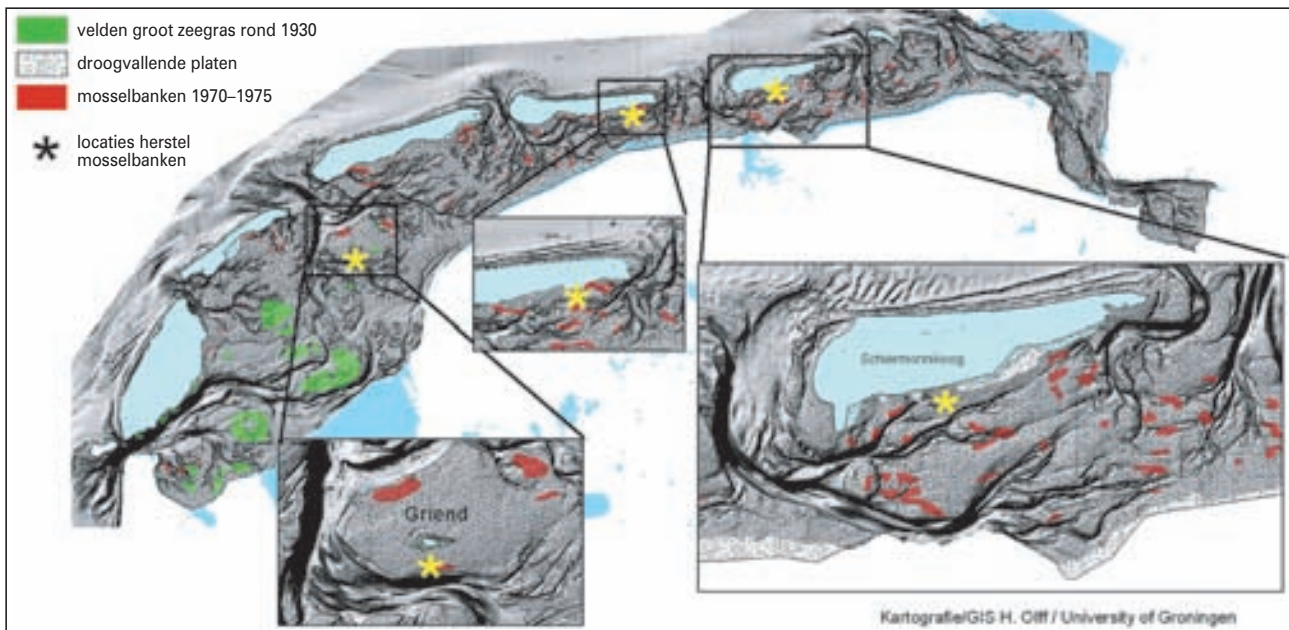
centen: in het water zwevende algen (fytoplankton), algen, diatomeën en cyanobacteriën die en in het bovenste laagje van het sediment leven (microfyto benthos) en hogere planten. Het is waarschijnlijk dat er grote veranderingen zijn opgetreden in het relatieve aandeel van deze componenten. Door toegenomen voedselrijkdom van het zoetwater van rivieren wat via de Rijn (langs de kust), IJssel (via IJsselmeer) en de Eems (via de Dollard) de Waddenzee bereikt, is waarschijnlijk het aandeel van fytoplankton ten opzichte van microfyto benthos toegenomen. Dit gaat gepaard met een vertroebeling van het water, wat een aandeel kan hebben gehad in het uitblijven van herstel van zeegrasvelden.

Kenmerkend voor een natuurlijk functionerende Waddenzee is zeer waarschijnlijk een sterke samenhang geweest tussen de diverse habitattypen wat betreft uitwisseling van slib, organische stof en nutriënten (Fig. 1). Kwelders importeren in het algemeen nutriënten en slib, waardoor deze componenten worden ‘weggevangen’ uit het water van de Waddenzee. De afgenomen lengte van de kwelder-wad overgang door inpoldering gevolgd door aanleg van zeedijken is deze ‘sink-functie’ van kwelders sterk afgenomen. Dit proces is al sinds de 11^e eeuw aan de gang (Tabel 1). Mosselbanken hebben ook een potentieel belangrijke rol in het uit het water filteren van fytoplankton en slib. Fytoplankton wordt gedeeltelijk verteerd, terwijl opgenomen slib weer als pseudofaeces wordt uitgescheiden. Ook zeegrasvelden staan bekend om hun vermogen om sedimentatie van slib te bevorderen. Door het verdwijnen van al deze componenten blijft slib nu veel meer dan vroeger rondzweven in het water, wat de troebelheid sterk vergroot, en de lichtdoorval vermindert (Fig. 3). Ook stijgt de zeespiegel al sinds 1850 met plm. 2 mm per jaar (Tabel 1), door een combinatie van natuurlijke processen (lange-termijn klimaatcycli) en klimaatverandering door menselijke oorzaken. Dit heeft consequenties voor de overstromingsfrequentie van kwelders en de slibhuishouding. Naast deze ‘bottom-up’ veranderingen, zijn er ook al langere tijd een aantal ‘top-down’ veranderingen aan de gang in de Waddenzee. Al sinds de 19^e eeuw is er een sterke achteruitgang van toppredatoren in het voedselweb, waarschijnlijk door directe overbevissing, verlies van specifieke habitats en of voedselbronnen voor deze soorten en zelfs door gifstoffen (in het geval van het verdwijnen van de wulk, *Buccinum undatum*).

Tabel 1. Overzicht van belangrijke veranderingen, met hun oorzaken en consequenties in de Waddenzee gedurende de laatste eeuwen.

Period	Verandering	Oorzaak	Consequentie	Referenties
Vanaf ± 1100 A.D. tot	Afname areaal en lengte (zee-land grens) van kwelders	Landaanwinning, inpoldering eerst door kloosters, dan door boeren en waterschap, RWS	Minder kleinere populaties sedimentatiemogelijkheden voor slib, troebeler water karakteristieke kweldersoorten	(Dijkema 1987)
Vanaf ± 1800	Start grootschalig verlies van grote toppredatoren (bruinvis, roggen, haaien) uit het voedselweb	Overbevissing	Verschuiving van 'top-down' naar 'bottom-up' regulatie van populaties diverse soorten lager in het voedselweb	(Wolff 2000, 2005)
Vanaf ± 1850	Start zeespiegelstijging Noordzee, Waddenzee met plm. 2 mm/jaar	Combinatie natuurlijke en door mensen veroorzaakte klimaatverandering	Kleiner kwelder areaal, dijkdoorbraken	(Behre 2007)
1930	Verlies Zuiderzee als brak estuarium	Aanleggen van de afsluitdijk	Verlies van brakwatersoorten, zoet-zout overgangen	(Dijkema 1987)
1930 - 1950	Verlies vrijwel alle sublitorale (<i>Zostera marina</i>) en litorale (<i>Z. noltii</i>) zeegrasvelden	"Wasting disease", gecombineerd met aanleggen afsluitdijk (verhoging troebelheid water)	Verlies van organismen die aan litorale zeegrasvelden gebonden zijn	(Den Hartog & van Polderman 1975; Katwijk <i>et al.</i> 2000; van der Heide <i>et al.</i> 2007)
Vanaf 1950	Sterke toename planktonische primaire productie mogelijk gevolgd door lichte afname (vanaf 1990); geen informatie over veranderingen in bethische primaire productie (door epiphytobenthos), in andere estuariene gebieden de belangrijkste primaire productiebron	Aanvankelijk sterke stijging eutrofiëring oppervlaktewater door introductie kunstmest en de landbouw en rioolwater en industriële lozingen, daarna lichte daling (sinds 1990) door betere waterzuivering	Bijdrage aan niet herstellen van zeegrasbedden door vertroebeling van water, afname van predatoren die onder water op zicht jagen	(Philippart <i>et al.</i> 2007)
Vanaf 1950	Sterke toename visserijintensiteit en bodemberoering	Toename motorvermogen visserijmeer	Vertroebeling water door bodemverstoring, toename van bijvangsten en totale vangst	
1965	Start mosselzaad kweekpercelen Waddenzee (7000 ha)- oogst maximaal nu van 70-100 miljoen kilo/jr (vanaf ca. 1965) - nu sterk teruggelopen oogst	Ziekte en uitblijven zaadval in Zeeland, o.a. door voltooiën deltawerken, en ziekten	Toename bodemverstoring in de sublitorale zone in de westelijke Waddenzee	
1969	Verlies Lauwerszee als brak estuarium	Aanleggen van de Lauwersmeer dijk	Verlies van brakwatersoorten, zoet-zout overgangen	
Sinds 1980	Stijgen van de gemiddelde temperatuur in Nederland met in totaal 2 graden over een periode van 20 jaar, wat veel hoger is dan op grond van natuurlijke klimaatscycli kan worden verwacht	Broeikas effect, verhoogde uitstoot van CO ₂ door toename gebruik fossiele brandstoffen	Mogelijk meer predatie door bijv garnalen op jonge schelpdieren, doordat predatie in de winter doorgaat	(Beukema & van Dekker 2005; Dekker & Beukema 2007; Brandsma & Ulden 2008)

Period	Verandering	Oorzaak	Consequentie	Referenties
Sinds 1983	Sterke opkomst van invasieve schelpdieren, zoals de Japanse Oester en de Amerikaanse Zwaardschede en andere invasieve soorten, zoals de Chinese wolhandkrab	Uitzetten in kweekbedden door oesterkwekers, transport met ballastwater van	Concurrentie van inheemse soorten door invasieve schepensoorten	(Nehls <i>et al.</i> 2006; Brandt <i>et al.</i> 2008)
1988-1990	Vrijwel geheel wegvissen van litorale mosselbanken	Uitblijven van zaadval in deze jaren, tekort aan mossels	Verdwijnen van droogvallende mosselbanken, en fauna, geassocieerde flora en afname van schelpdieretende vogels als scholekster en eidereend	(Beukema & Cadee 1996; Dankers <i>et al.</i> 2001; Wolff 2005)
Sinds 1990	Sterke afname van vestiging en populatie-grootte van enkele schelpdieren, in het geval van <i>Macoma balthica</i> , tot dan een sleutelsoort, leidend tot het ecologisch uitsterven in westelijke Waddenzee rond 2000	Bodemberoering door kokkel-, mossel en garnalen visserij wat vestigings- en overlevingsmogelijkheden vermindert, en kwaliteit prooi voor vogels	Afname van vogels die van <i>Macoma</i> afhankelijk zijn, zoals de kanoetstrandloper	(Reneerkens <i>et al.</i> 2005; van Gils 2006)
Sinds 2004	Definitieve sluiting van de mechanische kokkelvisserij	Protesten van natuur-organisaties, gebaseerd op wetenschappelijk onderzoek	Mogelijke betere vestiging en handhaving schelpdieren (nog niet aangetoond)	
Sinds 2005	Overstap van 34 kokkel-vissers uit de Waddenzee naar het vissen op Spisula (mesheften) in de Noordzee, ontwikkeling van plannen tot exploitatie venusschelp visserij voor kust van Mauritanië	Verbod op kokkelvisserij in de Waddenzee	onbekend	Waddenzee.nl
Sinds 2006	Toename aantal verstrekte vergunningen voor kokkelvisserij met handmatige methoden (nu 31 vergunningen geldig – verdubbeling tov 2005)	Druk vanuit de schelpdier-visserij sector, met beroep op werkgelegenheid en traditioneel gebruik	Afname standing stock van kokkels (niet gedocumenteerd)	Waddenzee.nl
2008	Intrekken door de Raad van State van de vergunning voor mosselzaadvisserij in de Waddenzee	Protesten van natuur-organisaties met beroep op Europese regels en voorzorgsprincipe	Minder bodemberoering in het sublitoraal, meer beschikbaarheid jonge mossels als voedsel voor schelpdieretende vogels	



Figuur 2. De historische verspreiding van mosselbanken (rond 1975, kartering Dijkema, pers. meded. J.Veen) en velden groot zeegras (rond 1930, naar van der Heide et al 2007) in de waddenzee, met de locaties van het voorgestelde herstelexperiment.

Verreweg de grootste infrastructurele verandering die zich heeft voltrokken is de afsluiting van de Zuiderzee in 1932, door de aanleg van de Afsluitdijk. Helaas zijn de ecologische en abiotische effecten hiervan slechts anekdotisch gedocumenteerd. Wel is duidelijk dat hierdoor de belangrijkste zoet-zout overgangen verdwenen zijn. Ook moet de Zuiderzee een enorm natuurlijk bezinkingsveld voor slib geweest zijn, getuige de zware kleigronden in grote delen van de IJsselmeerpolders. Door het verkleinen van het oppervlakte van het getijdebekken en het verminderen van de bezinking, moet de troebelheid van de Waddenzee na de afsluiting plotseling sterk toegenomen zijn. Kort na de afsluiting van de Zuiderzee zijn de grote velden van groot zeegras die tot dat moment bestonden in de westelijke Waddenzee, grotendeels verdwenen, waarschijnlijk door een combinatie van een ziekte ('wasting disease') en toegenomen troebelheid.

Vanaf 1950 heeft intensivering van de landbouw, en het gebruik van fosfaten in wasmiddelen, geleid tot een grote toename van de nutriëntenbelasting van het Nederlandse oppervlaktewater, vooral met stikstof en fosfaat, en dus ook van de Waddenzee. Pas sinds 1990 is dit probleem enigszins onder controle, door verbetering van bemestingstechnieken, het uitsluiten van fosfaten uit wasmiddelen, en verbeterde zuivering van rioolwater. Sinds die tijd is de waterkwaliteit verbeterd.

Vanaf 1950 is ook de intensiteit van visserij sterk toegenomen in de Waddenzee, vooral gedreven door de toename van het motorvermogen van schepen, wat grotere en zwaardere vistuigen, en nieuwe technieken mogelijk maakte, zoals de boomkorvisserij, en mechanische kokkelvisserij en de mechanische bevissing van wadpieren *Arenicola marina* en recentelijk ook andere diep in de zeebodem levende soorten als de Amerikaanse zwaardschede *Ensis directus* (dit laatste gebeurd niet in de Waddenzee maar in de aansluitende Noordzee-kustzone). Deze technieken leiden echter tot veel meer bodemverstoring dan de technieken die tot dan toe werden gebruikt (zoals staand want, of het handmatig oogsten van ingegraven bodemdieren), met als gevolg directe verstoring van bodemdieren en zeegrassen, en vertroebeling van het water door opwoeling van slib.

Deze bodemverstoring werd nog verder vergroot toen vanaf 1965 de oogst van jonge mossels in Zeeland niet meer mogelijk was, door combinaties van ziektes onder de mossels en afname van habitatkwaliteit door voltooiing van de Deltawerken. Dit leidde ertoe dat

de Zeeuwse mosselvisserij hun activiteiten naar de Waddenzee verplaatsten, onder meer door het intensief opvissen van 1–2 cm grote jonge mossels (zogenaamd mosselzaad) uit de diepere geulen van de Waddenzee, en het overbrengen hiervan naar ondiepere kweekpercelen waar de mossels verder kunnen groeien. De effecten hiervan op biodiversiteit zijn niet bekend, doch worden op dit moment in het PRODUS onderzoek onderzocht.

Het een-na-laatste brakke estuarium van de Waddenzee, de Lauwerszee, werd in 1969 afgesloten door middel van een dijk, ten behoeve van aanleg van militaire oefenterreinen, landbouwgrond, verbetering van de waterkeringen, en verbetering van de waterhuishouding van Noord-Nederland. Hiermee werden wederom zoet-zout overgangen en sedimentatiefuncties voor slib uit het systeem verwijderd, waardoor alleen de Dollard in Nederland nog is overgebleven als laatste systeem waar deze processen worden aangetroffen. Helaas wordt de Dollard sterk beïnvloed door havenactiviteiten aan zowel Duitse (Emden) als Nederlandse zijde (Delfzijl, Eemshaven) en de bouw van een kering in de Eems ten behoeve van de Duitse megascheepsbouw.

In 2004 werd de mechanische kokkelvisserij in Nederland verboden en uitgekocht, nadat onderzoek door NIOZ en RUG de zeer schadelijke effecten op schelpdier- en vogelpopulaties hadden aangetoond en nadat deze conclusies ondersteund raakten door de resultaten van het door LNV opgezette EVA2-proces. Hierdoor is de bodemverstoring waarschijnlijk enigszins afgenomen (hoewel de handmatige bevissing op kokkels inmiddels weer sterk is uitgebreid door de uitgave van 10 extra vergunningen, van 21 naar 31). In elk geval hebben deze maatregelen tot nu toe niet geleid tot grootschalig herstel van mosselbanken. Naast de toename van de handkokkeldruk, heeft ook een overstap van plaatsgevonden van "uitgekochte" kokkelvisserij naar andere schelpdiervisserijen in de Noordzee en in het buitenland (zwaarschedes in de Noordzee kustzone, venusschelpen in Mauretanië), een verplaatsing van problemen dus, in plaats van een oplossing (Tabel 1).

Met ingang van 2008 is door de Raad van State de vergunning tot mosselzaadvissers in de Waddenzee ingetrokken op grond van bezwaren van natuurbeschermingsorganisaties, met een beroep op Europese regelgeving en voorzorgsprincipes. Er kon namelijk niet worden aangetoond dat deze activiteit geen schadelijke effecten had op de natuurwaarden van een onder de Vogel- en Habitatrichtlijn beschermd habitatype.

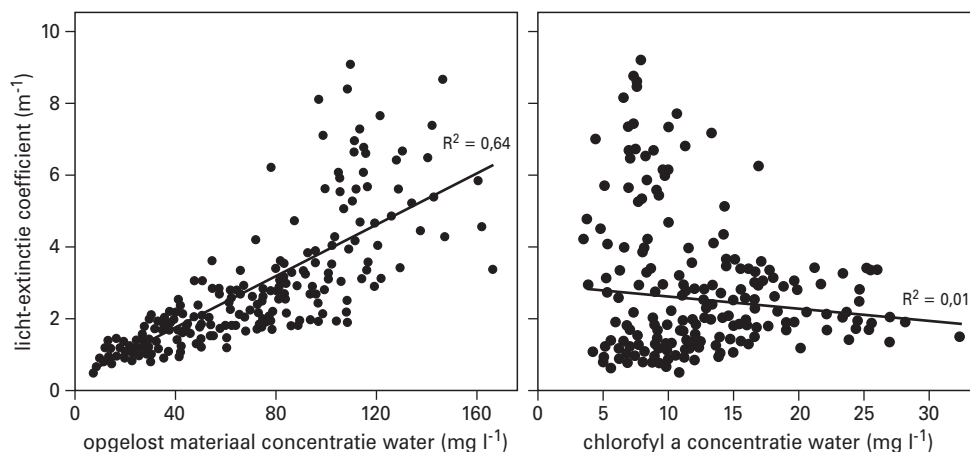
b) Sleutelprocessen in het intergetijde gebied: het belang van biobouwers

Het belang van droogvallende mosselbanken voor biodiversiteit

Droogvallende mosselbanken zijn historisch een belangrijk habitat geweest van de intergetijde (litorale) zone van het Waddengebied (Fig. 2): mosselbanken werden kleinschalig geëxploiteerd door de lokale bevolking, een groot deel van de avifauna was direct of indirect afhankelijk van de voedselbronnen op en rond mosselbanken en mosselbanken leverden structuur en diversiteit in een relatief structuurloze omgeving. Helaas zijn mosselbanken de laatste decennia sterk afgenomen door een combinatie van overexploitatie (visserij) en habitatveranderingen. In de periode 1988-1991 zijn vrijwel alle resterende mosselbanken in de Waddenzee weggevist doordat er een tekort bestond aan jonge mossels voor de Zeeuwse kweek (Beukema & Cadee 1996; Wolff 2005). Daarna is herstel van stabiele banken grotendeels uitgebleven.

Veel studies uit het buitenland laten zien dat droogvallende mosselbanken een bijzonder positief effect hebben op de biodiversiteit van de litorale zone; veel soorten komen alleen, of in veel hogere dichtheden voor op mosselbanken (Albrecht 1998; Gutierrez *et al.* 2003; Gutierrez & Jones 2006). Ook zorgen mosselbanken voor sterke kleinschalige heterogeniteit in milieucondities (Ragnarsson & Raffaelli 1999; Gutierrez & Jones 2006), wat de biodiversiteit ten goede komt. Deze effecten kunnen worden toegeschreven aan vaste struc-

Figuur 3. Het slibgehalte van het water (belangrijke component van totaal opgelost materiaal) voorspelt lichtdoorval veel beter dan phytoplankton concentraties (sterk gerelateerd aan chlorofyl b concentraties). Uit: van der Heide *et al.* (2007)



tuur die mosselbanken bieden, waarop bijv. diverse soorten macroalgen vaste grond onder de voeten vinden, en waarin veel andere soorten bescherming aantreffen tegen predatoren (foto 3, 4). Afhankelijk van de lokale stroomsnelheden en het slibgehalte van het omliggende waddenwater, vormen zich onder, naast of achter mosselbanken slibbige plekken als gevolg van de pseudofaeces productie door mossels (foto 1). Deze slibranden zijn weer op een andere manier aantrekkelijk en verhogen de lokale biodiversiteit. Ook concentreren veel kleinere soorten detritivoren zoals garnalen, en soorten die zich voeden met zooplankton detritivoren, zoals dikkopjes en brakwatergrondels zich voeden in poelen bij mosselbanken (foto 3) (Thiel & Ullrich 2002). Deze soorten vormen vervolgens weer een belangrijke voedselbron voor diverse onder druk staande vogelsoorten, zoals de lepelaar, de scholkester en de wulp, en verschillende soorten roofvissen.

Mosselbanken zijn daarmee broeinesten van biologische activiteit en biodiversiteit op anders kale zandplaten in de Waddenzee (foto 2)– het zijn echte ecosysteembouwers (Jones *et al.* 1994; Gutierrez *et al.* 2003; Thrush *et al.* 2006). Dit belang wordt nu algemeen gewaardeerd vanuit het oogpunt van biodiversiteit. Daarnaast zouden mosselbanken op de rand van geulen een rol kunnen spelen in de stabilisatie van de positie van die geulen (bescherming van de randen tegen erosie) wat gunstig kan werken in geval van zeespiegelstijging (stimulering van sedimentatieprocessen op de platen). Dit is echter nog niet aangetoond.

Troebelheid van het water: een beperkende voor biobouwers?

De huidige troebelheid van de Waddenzee is waarschijnlijk een belangrijke flessenhals in het bereiken van de gestelde natuurdoelen voor de Waddenzee. Deze huidige troebelheid van het water is waarschijnlijk een belangrijke beperking voor het herstel van zowel littorale (*Zostera noltii*) als sublittorale (*Z. marina*) zeegrassvelden. Zeegrassen hebben helder water nodig waardoor het licht tot de bodem doordringt (Hemminga & Duarte 2000; van Katwijk *et al.* 2000; de Boer 2007). Wat zeegrassen betreft maakt het niet uit of de troebelheid door fytoplankton of door sediment in het water wordt veroorzaakt, beide factoren kunnen potentieel een negatief effect hebben op de lichtdoorval door het water.

Uit een analyse van monitoringsdata van Rijkswaterstaat over de periode 1980-2005 blijkt echter dat het slibgehalte van het water veel beter de lichtdoorval voorspelt dan de hoeveelheid algen (afgeleid uit Chl-a concentraties) (Fig. 3 (van der Heide *et al.* 2007)). Mogelijk is het hoge slibgehalte van het water niet alleen een belangrijke verklaring voor het huidige uitblijven van herstel van zeegrassvelden (door het grote effect op lichtdoorval), maar ook voor het uitblijven van herstel van stabiele mosselbanken. Om dit te begrijpen moeten eerst verschillende verklaringen worden langsgelopen.

Mosselbanken en zeegrasvelden hebben elkaar misschien wel nodig. Er zijn diverse aanwijzingen dat zeegrasvelden en mosselbanken elkaar positief beïnvloeden (d.w.z. "elkaar nodig hebben"). Mosselbanken kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan het weer helder worden van het water, door de grote hoeveelheden fytoplankton die ze per dag kunnen consumeren. Hierdoor neemt de lichtdoorval van het water toe, waardoor zeegrasvelden beter kunnen groeien. Daarnaast kunnen mosselbanken nog een positief effect hebben op de ontwikkeling van zeegrasvelden door het beschikbaar maken van nutriënten, welke anders door het fytoplankton zouden worden gemonopoliseerd. Dit is op diverse plekken in het buitenland reeds aangetoond (Reusch *et al.* 1994; Peterson & Heck 2001a, b; Wall *et al.* 2008).

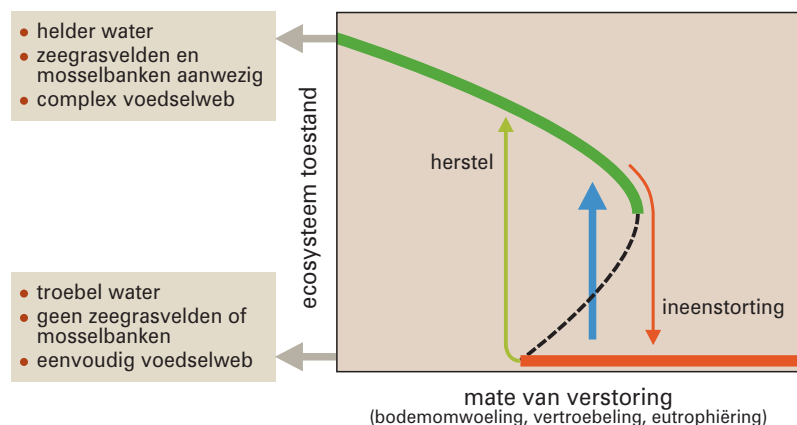
Het positieve effect van mosselbanken op zeegrasvelden gaat mogelijk gepaard met wederzijds voordeel. Zeegrasvelden vormen vaak een 'sink' van slib (Hemminga & Duarte 2000; de Boer 2007). Door reductie van de stroomsnelheid van het water bezinkt meer fijn slib in zeegrasvelden. Dit verwijderen van slib uit het water kan een positief effect hebben op de stabiliteit van mosselbanken. Als dit wederzijdse effect belangrijk is, moet duurzaam herstel van de Waddenzee gepaard gaan met herstel van beide habitat typen, waarbij mossels het eerst kunnen terugkeren (aangezien ze ook het laatst verdwenen zijn).

c) Het belang van terugkoppelingen tussen organismen en abiotische factoren

Zoals al gezegd zijn tussen 1980 en 1990 de meeste meerjarige mosselbedden weggevisht na het uitblijven van broedval en het daarop volgende gebrek aan jonge mosselbanken als bron voor mosselzaad. Herstel van meerjarige mosselbedden hierna heeft sindsdien maar mondjesmaat plaatsgevonden. Dit suggereert dat er processen op gang gekomen kunnen zijn in de Waddenzee die het herstel van mosselbedden nu beperken.

De ecologische theorie relateert een dergelijke afwezigheid van herstel van een ecosysteem na een verstoring aan de aanwezigheid van terugkoppelingen tussen soorten en milieucondities (Scheffer & Carpenter 2003; van de Koppel *et al.* 2005; van der Heide *et al.* 2007). Deze terugkoppelingen veroorzaken een sterk hysteresis effect, d.w.z. dat de omgevingscondities van het systeem eerst drastisch verbeterd moeten worden voordat herstel optreedt. Deze terugkoppelmingsmechanismen lijken aanwezig te zijn in met betrekking tot mosselbedden (Figuur 4). Mosselbedden leggen aanzienlijke hoeveelheden slib langdurig vast. Dit proces zorgt voor helder water, wat de condities voor groei en de stabiliteit van mosselbedden bevordert. Daarnaast stimuleert helder water de groei van zeegrasvelden,

Figuur 4. Veronderstelde systeemdynamiek van de Waddenzee indien mosselbanken en zeegrassen hun milieu voor zichzelf geschikt maken door positieve terugkoppelingen zoals substraatstabilisatie, of het wegvangen van slib uit het water. Herstel na verlies vereist dan veel schonere/minder verstoorte milieucondities dan aanwezig waren op het moment dat deze biobouwers verloren gingen, tenzij er een actieve herstellingreep wordt gepleegd (dikke blauwe pijl)



wat het vastleggen van slib verder bevordert (van der Heide *et al.* 2007). Nadat in de vroege jaren negentig zowel de zeegrasvelden als de meerjarige mosselbanken verdwenen waren, zijn de condities voor de vestiging van nieuwe mosselbedden mogelijk dusdanig verslechterd (bijvoorbeeld, hoge slibmobiliteit in het systeem, dat dit het herstel van natuurlijke mosselbedden aanzienlijk bemoeilijkt).

Er zijn twee routes om uit deze terugkoppelingsimpasse te geraken. De eerste methode is het zeer grote verbetering van de omgevingsfactoren (bijvoorbeeld, veel minder slibtoevoer naar de Waddenzee, minder omwoeling van de bodem door garnalenvisserij) zodat mosselbanken uit zichzelf kunnen herstellen (de dikke pijl in figuur 4). Deze weg zou ecologisch de meest wenselijke zijn, maar is economisch wellicht moeilijk te realiseren. De andere route is om het systeem een "zetje" te geven, waardoor oude terugkoppelingsmechanismen weer in werking treden en het oorspronkelijke systeem zich herstelt (de dikke pijl in figuur 4). De haalbaarheid van deze laatste route willen we onderzoeken in dit voorstel door experimenteel banken te herstellen door middel van verschillende behandelingen.

d) Waarom zijn mosselbanken niet meer stabiel?

Mossels zijn zogenaamde filterfeeders, wat betekent dat ze hun voedsel (zwevend organisch materiaal, algen, klein zooplankton) uit het water filteren (Dame and Dankers, 1988). Hierdoor vormen mossels en andere filterfeeders een belangrijke koppeling tussen bentische en pelagische processen (Norkko *et al.* 2001). Mossels voeren hierbij een soort 'voorselectie' uit van het materiaal wat ze uit het water filteren, waarbij de geweigerde bestanddelen, samen met de niet verteerde bestanddelen, worden uitgescheiden als zogenaamde pseudofaeces (Jorgensen 1996; Ward & Shumway 2004). Bij een toenemend gehalte aan slib-, dood organisch materiaal en algen van het water produceren mossels en andere filterfeeders steeds grotere hoeveelheden van deze pseudofaeces (Bayne *et al.* 1989; Bayne *et al.* 1993; Macisaac & Rocha 1995; Hawkins *et al.* 1998). Deze pseudofaeces worden in eerste instantie op en direct naast de zich ontwikkelende mosselbank gedeponerd, vooral in gebieden met wat lagere stroomsnelheden van het water. Instabiele mosselbedden kunnen daarom bestaan uit schelpenlagen, afgewisseld met fijn sediment. Droogvallende mosselbanken vestigen zich slechts onder specifieke condities aan de rand van enigszins beschut liggende geulen. Hier zijn de stroomsnelheden laag genoeg om de initiële vestiging mogelijk te maken, maar hoog genoeg om voldoende aanvoer van voedsel (fytoplankton, zwevende organische stof) te garanderen, maar niet zo hoog dat de mossels meteen van hun substraat en van elkaar worden gerukt (Widdows *et al.* 2002). Echter, bij de huidige hoge slibgehalten van het water produceren mossels dagelijks waarschijnlijk meer pseudofaeces dan door het getij kan worden afgevoerd, waardoor er slib kan accumuleren tussen en onder de mossels. Via hechtdraden kunnen mossels zich via elkaar 'aan de haren uit de modder trekken' (Carrington 2002), en zullen dit doen om het volgende tij weer ongestoord door het slib te kunnen filtreren. Hierdoor destabiliseren ze hun eigen ondergrond.

Het uitblijven van herstel van mosselbanken in de Waddenzee na 1990 is enigszins opmerkelijk. Door de hogere nutriëntenaanvoer naar de Waddenzee is de fytoplankton productie tegenwoordig veel hoger dan vroeger. Dit verhoogt de voedselbeschikbaarheid voor filterfeeders, waardoor mosselbanken sneller zouden moeten aangroeien als de vestiging van broed gelijk zou zijn gebleven, en daardoor zich juist beter moeten ontwikkelen. Dat dit niet gebeurt kan op een aantal mogelijke manieren worden verklaard. De hypothesen hiervoor vallen uiteen in twee groepen:

Groep 1:

Verklaringen die te maken hebben met reproductie, dispersie en vestiging

- 1) Er is nu onvoldoende productie van larven door de overgebleven mossels, door de lage dichtheid is hun reproductief vermogen nu te laag om te compenseren voor de natuurlijke mortaliteit van larven, en jonge mossels zoals de sterfte ten gevolge van predatie en weerscondities.
- 2) Mossellarven en jonge mossels worden meer dan vroeger opgegeten door predatoren (zoals groter zooplankton, garnalen), welke predatoren nu door hogere watertemperaturen (vooral in de winter en voorjaar) meer actief zouden kunnen blijven. Hierdoor blijven de dichtheden van mossels zo laag, dat ze geen "steun bij elkaar" kunnen vinden door middel van onderlinge verbindingen met hechtdraden, waardoor geen stabiele banken worden gevormd.
- 3) De kwaliteit van de bodems en de vestigingscondities op het substraat van jonge mossels zijn beperkend geworden door toename van bodemverstorende visserij (garnalen-, kokkel- en mosselzaadvissers) waardoor de kritische dichtheden waarbij mosselbanken stabiel worden, niet meer bereikt worden.

Groep 2:

Hypothesen die te maken met handhaving van eenmaal gevestigde banken

- 4) Eenmaal gevestigde mosselbanken zijn niet meer stabiel, en verdwijnen meer dan vroeger door winterstormen en/of ijsgang, doordat de intensiteit en/of frequentie van deze verstoringen is toegenomen,
- 5) Eenmaal gevestigde mosselbanken zijn niet meer stabiel, en verdwijnen door winterstormen, doordat er intern iets is veranderd in de structuur van mosselbanken wat hun stabiliteit vermindert. Een mogelijke hypothese hiervoor is dat de huidige hoge slibgehalten van het water leiden tot een hogere afzetting van pseudofaeces, waar de mossels vervolgens op groeien. Een dergelijk sliblaag onder een laag mossels zal sterk instabiel zijn bij hoge stroomsnelheden van het water.
- 6) De predatie door vogels op de volwassen mossels is toegenomen, door gestegen populatieaantallen (NB de aantallen van vrijwel alle schelpdiereters, inclusief zilvermeewen, zijn de laatste 15 jaar sterk afgenomen; SOVON-rapporten en publicaties).
- 7) Volwassen mossels hebben te weinig voedsel (lage fytoplankton productie), waardoor de groei en/of stabiliteit van de banken wordt verlaagd.

Niet al deze hypothesen zijn even waarschijnlijk, sommige zijn we op basis van logisch redeneren of eerder onderzoek minder waarschijnlijk, andere kunnen we op dit moment niet uitsluiten.

Hypothese (1) is niet zo waarschijnlijk – ook al is de mosselzaadproductie afgenomen, nog steeds werden tot voor kort grote hoeveelheden zaad sublitoraal opgevist (totdat de rechter dit verbod). Bovendien is er voordurende vestiging van mossels op objecten die in het waddenwater worden gehangen, en is er ieder voorjaar weer nieuwe rekrutering op alle pieren aan het Noordzeestrand op Texel. Ook zijn er recent successen geboekt met mosselzaadinstallaties (MZI's – vingen in 2007 2 miljoen kilo mosselzaad (1-2 cm grote mossels).

Hypothese (2) is waarschijnlijk veel belangrijker geworden dan voorheen omdat door het vrijwel ontbreken van stabiele oude mosselbanken, jonge mossels die gevoelig zijn voor predatie zich niet tussen de beschermende ouden kunnen vestigen, maar open en bloot op de platen liggen. De discrepantie tussen het veelvuldig vestigen van broed op pieren en in waddenwater hangende substraten, terwijl de vestiging op sublitorale en litorale wadbodem achterwege blijft, suggereert dat de vestigingssubstraatkwaliteit inderdaad een probleem kan zijn.

Hypothese (3) is ook nog steeds een mogelijke verklaring voor het uitblijven van herstel van mosselbedden op wadplaten. Op dit moment worden in de Nederlandse

Waddenzee de intergetijdegebieden nog steeds intensief bevestigd door garnalenkotters, en in de rijkste delen van de Waddenzee zijn handkockelaars actief, in delen van de westelijke Waddenzee de mechanische wadpierenvisserij. Het is ook nog niet bekend over welke tijdschaal eventuele sedimentverslechtingen na bodemberoering zich herstellen. Voor de sublitorale mossels is geopperd dat bodemberoering, vanwege een toename van het slibgehalte in het water, een negatief effect heeft op de vestiging van mossels.

Hypothese (4) is niet zo waarschijnlijk. De intensiteit van stormen in het Waddengebied is tussen 1990 en 1996 veel lager geweest dan in de 20 jaar daarvoor, terwijl toen juist vestiging achterwege bleef. De ijsgang is ook sterk afgenomen, wat klassiek altijd als een hoofdoorzaak van het verdwijnen van gevestigde banken werd gezien.

Hypothese (5) is een goede mogelijkheid. Waar vroeger (bij lage slibgehalten van het water) mosselbanken verticaal groeiden doordat nieuwe mossels zich op afgestorven of gepredeerde mossels vestigden, groeien mosselbanken nu doordat een dunne laag mossels zich bevindt op een groeiende laag slib. Zulke mosselbanken zullen in de winter makkelijk wegstormen, doordat de dunne lagen mossel geen 'fundering' meer hebben. Daarnaast lijkt de sterkte van hechttraden van mossel het kleinst in de herfst (Mooser & Carrington 2006; Mooser & Leba 2006), wanneer juist de meeste stormen optreden. Ook zal grote hoeveelheid fijn slib die zich onder de dunne laag mossels bevindt, snel sterk anaeroob worden, door bacteriële afbraak van organisch materiaal. Door de hoge biodepositie van mossels onder eutrofe omstandigheden neemt de activiteit van sulfaat-reducerende bacteriën sterk toe, wat leidt tot een hoge productie van waterstofsulfide gas (H_2S) (Giles and Pilditch, 2006, Vinther *et al.*, 2008), mogelijk tot niveaus die toxisch zijn voor de mossels. De diepzwarte, stinkende laag onder de dunne laag mossels van veel huidige mosselbanken laat dit effect zien en ruiken. Beide processen kunnen ervoor zorgen ervoor dat het huidige hoge slibgehalte van de huidige Waddenzee de vorming van stabiele mosselbanken verhindert. Het is erg belangrijk dat deze effecten in een praktijkproef onderzocht worden. Als deze hypothese waar blijkt te zijn, heeft dat grote consequenties voor toekomstig beleid gericht op stimulering van de vorming van mosselbanken (en zeegrasvelden, die met grote stabiele mosselbanken kunnen samenhangen).

Hypothese (6) is niet zo waarschijnlijk – de aantallen scholeksters nemen juist af, en totale aantallen scholeksters, zilvermeeuwen en andere schelpdiereters zijn veel lager dan toen er nog wel veel mosselbanken waren in de Waddenzee. In het geval van kanoeten die op nonnetjes foerageren is de ratio predatoren/prooien gelijk gebleven (Kraan *et al.* MS)

Hypothese (7) is niet waarschijnlijk – ook al neemt de eutrofiëring iets af de laatste 10 jaar, deze is nog steeds vele malen hoger dan aan het begin van de vorige eeuw, toen er grote oppervlakten mosselbanken waren in de Waddenzee.

De praktijkproeven worden zo opgezet dat onderscheidt kan worden gemaakt tussen beide groepen hypothesen. Ook worden zoveel mogelijk metingen gedaan waarbij individuele hypothesen worden onderscheiden.

e) Wat zeggen stabiele isotopen gehalten van organismen

Diverse chemische elementen komen van nature voor met een verschillend atoom gewicht vanwege verschillen in het aantal neutronen in de kern. Deze verschillende verschijningsvormen noemt men isotopen en er wordt onderscheid gemaakt tussen radioactieve en stabiele isotopen. Voor koolstof zijn er bijvoorbeeld van nature de stabiele isotopen koolstof 12 en 13 en het radioactieve isotoop koolstof 14. De chemische eigenschappen van isotopen zijn nagenoeg identiek, maar door de kleine verschillen in massa zijn er minieme verschillen in reactiesnelheden en gedrag. Deze kleine verschillen in massa leiden tot isotopfractionering, dat wil zeggen dat er verschillen in de isotoop verdeling tussen stoffen en

organismen optreedt. Dit vindt in het bijzonder plaats voor de lichte elementen en bij biologische processen. Het aandeel van de verschillende isotopen kan met behulp van gevoelige apparatuur (isotoop-ratio massa spectrometers) bepaald worden. Stabiele isotopen worden gemeten als de afwijking van de ratio van de zware tot lichte isotoop ten opzichte van een standaard: de zogenaamde delta notaties in promille ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{34}\text{S}$).

De stabiele isotopen van koolstof, stikstof en zwavel worden veelvuldig gebruikt in de ecologie vanwege de unieke informatie die ze leveren over milieuveranderingen (Dawson & Siegwolf 2007) en de structuur en functioneren van ecosystemen. Vooral voor het begrijpen van de sleutelprocessen in estuaria hebben ze hun waarde meer dan bewezen (Bianchi 2007). De stabiele isotopen komen van nature voor en de fractionatie van de isotopen door biologische processen geeft dus informatie over het verloop van sleutelprocessen in de natuur over langere perioden van tijd. Diverse methodieken geven informatie over de korte tijdschaal (bijvoorbeeld darminhoud onderzoek voor voedselweb beschrijving), terwijl de wetenschappelijke vraag veelal op de lange termijn ligt: wat eet een dier over het jaar heen. Hierin ligt kracht van stabiele isotopen: ze integreren over de tijd en geven dus een representatiever beeld.

Tijdens fotosyntheses vindt er fractionering van isotopen plaats met als gevolg dat organisch materiaal verarmd is aan het zware koolstofisotoop ^{13}C . Door deze fractionatie en door het gebruik van kooldioxide in de atmosfeer of in het water zijn er goed meetbare verschillen in de isotoop verdelingen tussen hogere planten op het land, algen in de zee, zeegrassen, en algen op het sediment. Deze isotoop verdeling van koolstof blijft behouden als dieren het organisch materiaal consumeren; dit bestaat bekend als het principe “you are what you eat”. Door de koolstofisotoopsamenstelling van dieren in de Waddenzee te meten is het dus mogelijk te bepalen of ze afhankelijk zijn van hogere planten, algen in de zee, zeegrassen en/of algen op het sediment die al dan niet geresuspendeerd (zwevend door opwoeling) zijn. De afhankelijkheid van dieren van bepaalde primaire producenten is van direct belang voor een beter beheer van heterogene ecosystemen met diverse primaire energiebronnen zoals de Waddenzee. Tevens is het van essentieel belang om uit te vinden of mosselbedden voornamelijk afhankelijk zijn van geresuspendeerde benthische algen dan wel fytoplankton. Dit onderscheid is eenduidig te meten door de koolstof en zwavel isotoop samenstelling van mosselen, sedimenten en gesuspendeerd materiaal te meten.



Foto 4. Detail van een jonge mosselbank bij Schiermonnikoog, met Japanse oesters, mossels, zee-eik en slib. De mossels en oesters zijn bedekt met zeepokken. (Foto H Olff)

Stikstof isotopen zijn complementair aan die van die koolstof. Enerzijds is er een duidelijke verandering van stikstofisotopen tijdens trofische transfers in het voedselweb. Voor ieder trofisch niveau neemt de stikstof isotoop waarde met ongeveer 3.5 promille toe en meting van stikstofisotoop ratios laat dus toe om direct en onafhankelijk het trofisch niveau van primaire consumenten en predatoren te bepalen. Anderzijds is stikstof één van de belangrijke voedingsstoffen die tot eutrofiëring hebben geleid. Het blijkt dat planten en dieren in sterk geëutrofiëerde systemen verrijkt zijn in het zwaardere stikstof isotoop. Door een ruimtelijke bemonstering van planten in de Waddenzee zal het mogelijk zijn om de bijdrage van landafkomstig stikstof (eutrofiëring) en stikstof van de zee te onderscheiden. De verrijking van stikstof 15 van dieren ten opzichte van hun planten in het ecosysteem geeft directe informatie over de lengte van de voedselketen: hoe hoger de stikstof isotoopwaarde hoe hoger het trofische niveau.

Zeewater is rijk aan sulfaat en de isotoop samenstelling van zeewater is nagenoeg constant over de hele wereld. Echter tijdens sulfaatreductie en in het bijzonder de oxidatie van gereduceerd zwavel vindt er veel discriminatie van isotopen plaats met als gevolg dat sulfide en sulfide mineralen in het sediment (verantwoordelijk voor de zwarte en grijze kleur van wad sedimenten) verarmd zijn in het zware zwavel isotoop. Deze verarming kan men uitstekend gebruiken om op ecosysteem schaal anaerobe processen (processen onder zuurstofloze condities) te kwantificeren en een onderscheid te maken tussen benthische planten en fytoplankton (zoals hierboven vermeld). De balans tussen organische sedimentatie en erosie binnen een mosselbed is van belang voor het voorkomen van anaerobe processen en dus de aantasting van het leefmilieu van mosselen door het giftige sulfide. Zwavel isotopen van sedimenten binnen een mosselbed integreren de lange-termijn redox condities van het systeem. Een dergelijke lange-termijn integrator is meer relevant dan een korte termijn redox meting.

Samengevat, door een gebruik van reeds gestarte Waddenzeebrede bemonstering van benthos, alsmede de verzameling van monsters in de andere gerelateerde projecten, en deze monsters te analyseren op koolstof, stikstof en zwavel isotopen denken we informatie te krijgen over de volgende kernvragen: wat zijn de primaire voedselbronnen voor mosselbedden en hoe hangen die af van locatie en doorzicht van het systeem, in hoeverre heeft een mosselbed invloed op interne en nabije voedselwebstructuren en in hoeverre treden anaerobe condities op in mosselbedden en waar zijn deze van afhankelijk. De ruimtelijke verdeling van stikstof isotopen van plantaardig materiaal zal inzicht geven in de ruimtelijke verdeling van eutrofiëring en dus leiden tot identificatie van optimale locaties voor mosselbedden.

7. Praktische uitwerking herstelproject en indicatoren ontwikkeling

a) Praktijkproef herstel mosselbanken Schiermonnikoog, Ameland en Griend

i) Locatiekeuze

Overwegingen bij de locatiekeuze

Goed ontwikkelde mosselbanken kunnen niet overal zomaar hersteld worden. Dit kan alleen op specifieke locaties waar aan een aantal randvoorwaarden is voldaan. Deze locaties moeten waarschijnlijk aan de volgende randvoorwaarden voldoen:

- 1) De droogvalduur mag niet te lang of te kort zijn. Een te hoge locatie beperkt de tijdsduur per tij dat de mossels voedsel uit het water kunnen filteren, ter wijl een te korte droogval duur kan leiden tot een hoge predatiedruk door bijv. zeesterren (Hunter & Naylor 1993) (het laatste is een bekend probleem voor sublitorale mosselbanken, inclusief "kweek"-percelen).

- 2) De stroomsnelheid van het water bij opkomend of afgaand tijd mag niet te laag zijn, want anders is er onvoldoende aanvoer van voedsel, teveel sedimentatie van fijn slib, en te weinig afvoer van pseudofaeces, waardoor er kans is dat de zich ontwikkelende mosselbank bedolven raakt in slib, wat ook weer de stabiliteit kan verlagen (Brinkman *et al.* 2002).
- 3) De stroomsnelheid van het water en de expositie van de bank (golffhoogte) mag niet te hoog zijn, anders is de kans op wegspoelen/erosie van de bank te groot, vooral bij stormen. Dit betekent dat banken op enigszins beschutte plekken (zoals in de luwte van de Waddeneilanden) verwacht worden (Fig. 2), waar het sediment voldoende stabiel is om vestiging en handhaving mogelijk te maken, en toch voldoende aanvoer van voedsel, en afvoer van pseudofaeces is (Brinkman *et al.* 2002).
- 4) Aanwezigheid van een al bestaande bank heeft de voorkeur, om te voorkomen dat te grote concentraties van strandkrabben en/of vliegende predatoren de bank kansloos maken.
- 5) De aanwezigheid van een geschikte ondergrond waar zich al mosselschelpen in bevinden kan de vestiging wellicht bevorderen (Dare & Edwards 1976).

Een goede indicatie waar de kans op herstel van mosselbanken het grootst is, biedt de kartering van mosselbanken rond 1975 van K. Dijkema (zie Fig. 2). Op een aantal van de door Dijkema aangegeven zijn nu nog instabiele banken aanwezig, met name in de oostelijke Waddenzee. Het onderzoek zal zich op deze locaties concentreren.

Daarnaast zijn er een aantal praktische overwegingen ten aanzien van de locatiekeuze:

- 6) Aansluiting bij de 'droge' terreinen van deelnemende natuurorganisaties is gewenst – zodat plaatselijk herstel van landschapsecologische processen over habitatgrenzen heen plaats kan vinden (wad-kwelder interacties)
- 7) De locaties zijn bij laag water goed vanaf de wal bereikbaar: dit verhoogt de veiligheid van projectmedewerkers
- 8) De locaties zijn in de buurt van een veldstation waar onderzoekers en projectmedewerkers kunnen worden gehuisvest.
- 9) De locaties liggen binnen een voor visserij gesloten gebied, zodat de zich ontwikkelende mosselbanken niet gedurende de looptijd van de praktijkproef worden weggevisst.

Locatiekeuze

Het herstelonderzoek concentreert zich vooralsnog op drie locaties. Mocht de praktijkproef op korte termijn duidelijk succes opleveren, zal deze met meer locaties worden uitgebreid. Deze locaties zijn aangegeven in Fig. 2:

- A) Instabiele mosselbanken onder Schiermonnikoog: Direct onder de kust van Schiermonnikoog liggen op dit moment (september 2008) een aantal tamelijk instabiele mosselbanken met een redelijk oppervlak (een tot enkele hectares). Plaatselijk zijn deze banken redelijk ontwikkeld (Foto 1), doch op veel plekken spoelen ze regelmatig weg gedurende winterstormen, en/of ontbreekt vestiging van nieuwe mossels. Deze locaties vallen binnen de grenzen van het Nationaal Park Schiermonnikoog, en daarmee binnen het eigendom van Natuurmonumenten. De locaties zijn goed vanaf het eiland bereikbaar, en onderzoek kan plaatsvinden vanuit het veldstation De Herdershut (RuG). Alle plekken liggen binnen een voor visserij gesloten gebied.
- B) Voormalige mosselbanken aan de Blauwe Slenk ten zuiden van Griend. In ieder geval vanaf het begin van de zestiger jaren (J. Veen & J. van de Kam pers. med.), tot 1989 lagen ten noordwesten en ten zuiden van Griend grote mosselbanken (Fig. 2). Deze werden in de winter van 1989/1990 vrijwel volledig weggevisst. In de zomer van 1994 vestigde zich op de plek van de zuidelijke mosselbank opnieuw mosselzaad, dat echter tijdens de daaropvolgende winter meteen weer werd weggevisst. Het wad ten zuiden

van Griend is nu voor visserij gesloten, Griend is in beheer bij Natuurmonumenten, het gebiedje is goed toegankelijk vanuit de Blauwe Slenk, en onderzoekers kunnen in het nieuwe vogelwachtershuisje op Griend verblijven.

- C) Het wad ten zuiden van Ameland waar tot ca. 1990 mooie mosselbankcomplexen lagen. Momenteel liggen er verspreid wel kleine mosselbankjes die er samen met gegroepeerde Japanse oesters voorkomen, maar de bankjes zijn zeer instabiel (IFG-Ameland pers. med.).

ii) Opzet van de herstelwerkzaamheden met verschillende methoden

In de praktijkproef worden drie behandelingen onderscheiden, waarbij het steeds gaat om herhaalde plots van 20 m bij 20 m (zie hieronder). Met de verschillende behandelingen kan onderscheid worden gemaakt tussen de diverse hypothesen genoemd in sectie 5D van dit voorstel.

A) Controle:

Het verloop van bestaande mosselbanken wordt gevolgd zonder verdere ingrepen – de mate van predatie op volwassen mossels wordt over meerdere jaren gevolgd als test van hypothese 2) en 6) (predatie, zie sectie 5D). Als een groot deel van de volwassen mosselen opgegeten wordt (dwz, veel open, dode exemplaren worden aangetroffen), dan is dit een bewijs voor deze hypothese

B) Stimulering vestiging (vestigingshypothesen – hypothese 3)):

(1) Een grofmazig stevig net van een biologisch afbreekbaar vezelig touw wordt over de wadbodem gespannen. Dit net kan een aanhechtingsplek zijn voor vestiging, en zal bovendien de stabiliteit van het sediment bevorderen.

(2) Over een vergelijkbaar oppervlak wordt een grote dichtheid aan levende kokkels uitgezet. Oude levende kokkels die iets boven het wad uitsteken blijken heel vaak als vestigingsplaats voor mosselbroed te worden gebruikt (A. Dekinga & T. Piersma pers. waarn.).

(3) Over dit oppervlak wordt mosselbroed (mosselen kleiner dan een cm) neergelegd, en wel op 2 manieren: klaal op de ondergrond (3a) en uitgespreid over het grofmazig net (3b).

Daarnaast worden pilot-experimenten uitgevoerd met het spannen van een net op een bed van oude schelpen. Indien dit een succes heeft, wordt de behandeling op grotere schaal toegepast

C) Reductie overslibbing (handhavingshypothesen – hypothese 4) en 5)):

Elke maand worden lokale slib (pseudofaeces) accumulaties binnen plots van zich ontwikkelende mosselbanken vanuit een bootje bij afgaand tij *voorzichtig* weggespoeld (het slib wordt in oplossing gebracht). Als dit na enkele seizoenen leidt tot de ontwikkeling van een stabiele bank, is dit bewijs voor de Overslibbingshypothese. Voor zover wij dit kunnen overzien is dit in eerste instantie alleen mogelijk onder Schiermonnikoog, omdat daar instabiele banken al voorkomen die zich voor deze behandeling lenen.

Elk plot is 20 m x 20 m groot (schaaleffecten zijn belangrijk, doch behandelingen moeten nog uitvoerbaar en onderzoekbaar blijven). Elke behandeling wordt 5 x herhaald per lokatie. De 15 plots worden ruimtelijk gerangschikt in een randomized blok design met 5 blokken, waarbij elk blok bestaat uit 3 plots met de 3 verschillende behandeling.

De volgende parameters worden gemeten:

- Bemonstering van de stratigrafie van de mosselbank (verticale profielen ter onderzoek meerdere schelplagen, aanwezigheid van slib onder de mossellaag van de bank), bepaling van aandeel schelpen en korrelgrootte verdeling sediment op verschillende diepten
- Bepaling slibdikte bovenop mossels
- Dynamiek in ruimte en tijd van de mosselbedden, zand en slibaccumulaties (fijnschalige karteringen)
- Bepalen relatie slibdikte onder de mossels als voorspeller van de overlevingskans lokale patches over de winter (stabiliteitsbepaling). Deze ophoping volgen we door het jaar heen. Daarnaast wordt deze meting in een groter aantal locaties rond het experiment uitgevoerd (30 plekken) om logistische regressiemodellen te ontwikkelen voor de kans op wegspoelen van een bank als functie van de karakteristieken van de ondergrond. De resultaten worden geverifieerd met experimenten in het veld en in het lab.
- Bemonstering van stabiele isotopen (C,N,S) van de mossels en diverse geassocieerde organismen, voor het opsporen van vitaliteitsindicatoren (bijv: reactie van $\delta^{34}\text{S}$ bij blijvend uitblijven van overslibbing -> minder H_2S vorming)
- Bemonstering en kartering van overig macrobenthos – met name van soorten die vestiging van mossels kunnen faciliteren, zoals kokerwormen *Lanice* (Foto 5) (Callaway 2003)
- Bepalen met stabiele N isotopen of er een stijging is in relatief trofisch niveau van mossels bij bepaalde behandelingen door groter aandeel microzoöplankton ten opzichte van fytoplankton in het dieet (Davenport *et al.* 2000; Wong & Levinton 2006) bij uitblijven overslibbing.
- Bepalen verticale profielen in redox potentiaal (mate van anaerobie) van de verschillende behandelingen
- Dichtheids- en groeibepaling van de mossels in patches met verschillende ondergrond, met scheiding in levende en dode exemplaren (open bij laagwater).
- Bepaling biodiversiteit organismen in laagwaterpoelen (bijv. grondels, garnalen, jonge vissen, macroalgen)
- Observaties vogelbezoek (o.a. scholekster, wulp, tureluur, rosse grutto, lepelaar) in plots met de verschillende behandelingen - laagwatertellingen



Foto 5. Kokerwormen kunnen een vestigingssubstraat vormen voor nieuwe mosselbanken (Foto H Olf)

iii) Monitoring van de meest effectieve methode, verklaring van uitblijven van herstel in sommige situaties

Op grond van de kansen op vestiging en 'overleving' van eenmaal gevestigde experimentele mosselbanken zullen we uitspraken kunnen doen over de meest effectieve methode om de vestiging van nieuwe mosselbanken te bevorderen, en ook over manieren waarop we deze mosselbanken relatief stabiel kunnen maken. Zowel de vestiging als de stabiliteit zijn relatieve maten, weergegeven door procentuele bedekkingen in de nazomer, winter en voorjaar. Additionele parameters zoals sedimentkarakteristieken, gelaagdheid en biodiversiteit (epibenthische fauna zowel als predatoren) zullen tussen behandelingen worden vergeleken en extra gewicht geven aan de mogelijk te prefereren herstelprocedures. Door het vergelijken van experimentele vestiging tussen de drie onderzoekslocaties zullen we enig inzicht krijgen in de grootschalige context van vestigingskansen, hoewel de eerlijkheid gebied te zeggen dat het aantal onderzoekslocaties (3) in dit geval nog heel laag is. De metingen aan voedselweb posities van verschillende soortengroepen die ofwel rond en in de experimentele mosselplots zijn verzameld dan wel ver daarbuiten, zullen ons een idee geven over de manier waarop de aanwezigheid van mosselbanken de trofische relaties beïnvloeden (zie ook AIO projecten).

8) Taakverdeling tussen de projectmedewerkers

Het werk binnen het project, waarvan de samenhang tot nu toe is geschetst, wordt verdeeld over een aantal projectmedewerkers. Er wordt in het project gekozen voor organisatie in de vorm van postdocs, AIO's (promovendi) en technisch assistenten, omdat dit in het algemeen de beste garantie geeft op kwaliteit en kwantiteit van de output van het project (zowel rapporten als wetenschappelijke publicaties). Daarnaast betekent deze vorm dat er een onafhankelijke kwaliteitstoets plaatsvindt in de vorm van het peer-review systeem dat gebruikelijk is in de wetenschap.

Deze projectmedewerkers werken nauw samen met een team van vaste medewerkers van de betrokken natuurbeschermingsorganisaties voor de uitvoering, vertaling en toepassing van de resultaten.

De personele kant van het project wordt als volgt georganiseerd:

A) Senior onderzoeksmedewerker/technisch assistent (aan te stellen bij RuG, detachering bij NIOZ) (aan te stellen bij NIOZ, afd Marine Biogeochemistry/Marine Ecology)

De medewerker is verantwoordelijk voor de logistieke uitvoering van de mosselbank herstelexperimenten, en voor de verzameling, registratie en voorbereiding van de chemische analyses. Daarnaast heeft de medewerker, samen met de postdoc, een rol in het compileren van de gegevens die in het project verzameld worden (database ontwikkeling), en een rol in de ruimtelijke analyses (met geografische informatiesystemen) van de data.

B) Onderzoeksmedewerker/technisch assistent (aan te stellen bij RuG, detachering bij NIOZ, afd. Marine Biogeochemistry)

Deze medewerker voert de monstervoorbereiding (drogen, malen) en chemische analyses uit van de stabiele isotopenanalyses uit die voor het gehele project moeten worden uitgevoerd. Naar schatting bedraagt het hier 12,000 monsters per jaar die worden geanalyseerd. Het lab van Sinninghe Damsté op het NIOZ, Texel, in samenwerking met het lab van Middelburg, CEME, Yerseke heeft de infrastructuur om dergelijke grote aantallen monsters te hanteren, Daarvoor zal een deel van de begroote analysekosten gebruikt wordt

voor noodzakelijke aanschaf en onderhoud van de betreffende apparatuur (massaspectrometers). Het betreft hier analyse van stabiele isotopen van zowel C, N en S.

C) Postdoctoraal onderzoeker (aan te stellen bij RuG/CEES - afd Community & Conservation Ecology)

Deze onderzoeker is de wetenschappelijk coördinator van het project, en verzorgt de integratie van resultaten ten aanzien van voedselweb structuur, alsmede de analyse van de ruimtelijke gegevens (statistiek, GIS), interpretatie, coördinatie rapportage, disseminatie en implementatie resultaten. Deze persoon zorgt daarnaast voor de praktische vertaling van de onderzoeksresultaten van het project naar kaarten van kansrijkdom voor herstel en mate van aantasting. Daarnaast heeft deze medewerker een belangrijke rol in het ontwikkelen van een geïntegreerde database met alle onderzoeksresultaten die in het project ontwikkeld worden, zoals de grote aantallen chemische analyses (stabiele isotopen) die vericht worden.

D) Promovendus (AIO) Promotores: Prof. J. Middelburg & Prof. J. Sinninghe Damsté, UU/NIOZ (Aan te stellen bij RuG, detachering bij CEME, afd. Ecosystem Studies)

In dit project worden methoden ontwikkeld en gekalibreerd om stabiele isotopen te gebruiken als indicatoren voor voedselweb aantasting en herstel. Naast stabiele isotopen worden hiervoor ook andere biochemische biomarkers ingezet, o.a. gebaseerd op pigment en vetzuur analyses. Een belangrijk thema in het project is te onderscheiden hoe de verschillende inputs van energie en nutriënten aan de basis van het voedselweb, te weten fytoplankton, microfytobenthos en detritus gemengd worden in het dieet van filterfeeders en detritivoren, en hoe de signalen van deze voedselweb fundamenteën zich vervolgens doorvertalen in het dieet van soorten op hogere trofische niveaus. Ook zal onderzocht worden of de pseudofaeces van mossels een specifiek biochemisch signaal bevatten, waardoor hun belang voor andere organismen in het voedselweb via beïnvloeding van stofkringlopen bepaald kan worden. Op deze manier kan het effect van biobouwers als mossels op kringlopen gescheiden worden van hun belang als habitatvormers (vast substraat). Zie verder onderdeel 6e van deze aanvraag voor meer details over de methoden en vragen van dit project.

E) Promovendus (AIO) Aan te stellen bij RuG/CEES – afd Animal Ecology, ism NIOZ afd Marine Ecology) Promotor: T. Piersma, copromotor: H. van der Veer
Ruimtelijke en temporele dieetverschuivingen in predatoren in het waddenecosystem (vogels, vissen, krab) in relatie tot mosselbanken

In dit project wordt onderzocht of aanwezigheid van mosselbanken leidt tot een complexer voedselweb. Dit deelproject zal zich richten op een drietal soorten, die ieder een grote variatie in dieet kunnen vertonen en daarmee als geschikte 'voedselweb-graadmeters' kunnen worden gezien:

(1) Rosse grutto *Limosa lapponica*: deze steltloper, die overigens in de Nederlandse Waddenzee een toename in de overwinterende aantallen laat zien, eet zowel de detritivore wadpieren, als de microfytobenthivore nonnetjes, evenals andere wormen en grondeltjes en garnalen. Wij verwachten dat het aandeel wormen in hun dieet vooral op de wat betreft voedselweb complexiteit verarmde delen van de Waddenzee (de westelijke Waddenzee) zal zijn toegenomen, en het aandeel kleine schelpdieren afgenomen. Het ligt in de verwachting dat bij herstel van het Wadden-ecosysteem het dieet zal verschuiven naar het eten van microfytobenthivoren. We zullen waarnemingen verrichten aan het dieet door middel van visuele waarnemingen, de analyse van uitwerpselen waarin kenmerkende voedselresten terug te vinden zijn, en isotoopanalyses van bloed. Een waardevol aspect van bloedanalyse is dat het de dieet samenstelling van de voorgaande maand integreert (onderzoek aan kanoeten door M.W. Dietz & T. Piersma

in press), en het is fortuinlijk dat in de NIOZ-archieven, bloedmonsters van rosse grutto's gevangen in verschillende delen van de Waddenzee sinds 1996 worden bewaard, zodat we in staat zullen zijn ruimtelijke veranderingen over een periode van 15 jaar op te sporen. Een interessante bijkomstigheid van deze soort is de mogelijkheid vergelijkingen te maken met harders op de Banc d'Arguin, Maurentanie, een veel minder verstoord, en zeer complex, Wadden-ecosysteem.

- (2) Harder *Mugil cephalus* sp.: deze grazende trekvis is kenmerkend voor estuariene gebieden inclusief de Waddenzee en graastop zee gras en macroalgen zoals zeesla, maar kan ook leven van dierlijk voedsel zoals wadslakjes *Hydrobia ulvae*. Door middel van maag-analyses van gevangen harders (voor een deel betrokken via de met staand want vissende vissers verenigt in "De Goede Vissers") zullen we de ruimtelijke en temporele veranderingen in het dieet van harders beschrijven, en ook gebruik maken van isotoopanalyses van spierweefsel. Ook bij deze soort zullen we speciaal gaan kijken naar trofische veranderingen in relatie tot mosselbank nherstel. Ook bij deze soort hebben we de mogelijkheid vergelijkingen te maken met harders op de Banc d'Arguin, een veel minder verstoord, en zeer complex, Wadden ecosysteem.
- (3) Strandkrab *Carcinus maenas*: deze omnivore krab kan leven van (macro)algen, aas van gestorven zeedieren en kan actief prederen op ingegraven schelpdieren en wormen. Afgezien van deze algemene kennis over de breedheid van het dieet, is er van het dieet van strandkrabben bitter weinig bekend, en in deze studie zullen we vooral door middel van gerichte isotoop analyses van lichaamsweefsel uitzoeken hoe de lichaamsgrootte, ruimtelijke en seizoensafhankelijke variatie in dieet is. Opnieuw zullen we speciale aandacht geven aan verschillen in dieet in relatie tot de al dan niet aanwezigheid van mosselbanken. Het interessante van strandkrabben is de mogelijkheid om in zeewater aquaria calibratie tests doen aan de fractioneringsprocessen van de stabiele isotopen in verschillende weefsels in krabben die met verschillende diëten gevoerd zullen worden. Dit zal belangrijke input leveren voor de algemene isotopen surveys die in het kader van dit Waddenfondsproject zullen worden uitgevoerd.

F) Promovendus (AIO) Aan te stellen bij RuG/CEES, detachering bij CEME, Yerseke afd. Spatial Ecology)

Ontrafeling van de factoren die de vestiging en stabiliteit van mosselbanken bepalen.

Promotor: H. Olff, copromotor: J. van de Koppel

Deze AIO zal zich focussen op de effecten van sedimentophoping onder mosselbanken op de stabiliteit van het mosselbed. In de afgelopen 20 jaar is de sediment beschikbaarheid in de Waddenzee belangrijk toegenomen. Dat heeft geleid tot een belangrijke toename van de ophoping van fijn sediment op en onder mosselbanken, welke actief door de mossels wordt gebonden door de productie van pseudofaeces. Daarnaast is door bodemomwoeling de hoeveelheid schelpensubstraat (vaak aanwezig op de locatie van oude mosselbanken) sterk verminderd, hetgeen de vestiging van mosselbanken verder bemoeilijkt.

Deze AIO gaat de hypothese onderzoeken dat verslibbing van mosselbanken en afname van schelprijke substraten een belangrijke factor is in het verminderen van de stabiliteit en persistentie van mosselbanken in de Waddenzee.

De werkzaamheden van deze AIO vallen uiteen in vier onderdelen

- 1) Vergelijking van slibophoping in natuurlijke banken in relatie met de stabiliteit, welke ruimtelijk expliciet bepaald gaat worden. Deze data wordt weer gerelateerd aan de beschrijvingen van de biodiversiteit in de bank. Ook wordt gekeken naar de effecten van het onderliggende substraat (sedimenttype, schelpenfractie). Mosselbanken in de oostelijke Waddenzee in Nederland worden vergeleken met mosselbanken in de Duitse Wadden zee, welke zich onder meer natuurlijke omstandigheden ontwikkelen.
- 2) Monitoren van de ontwikkeling van de in dit project aangelegde mosselbanken, waarbij geconcentreerd wordt op de ontwikkeling van biomassa, vorming van ruimtelijke patro-

nen/structuur op meerdere schalen, en de ophoping van slib.

3) Experimenteel testen van de relatie tussen slib- en schelpen ophoping en de stabiliteit van mosselbanken. Dit wordt gedaan met behulp van kunstmatige clusters (4m²) waar mossels worden ingezaaid op een aangebrachte laag slib van verschillende dikte, of met een mengsel van schelpen en slib.

4) Het bepalen van drempelwaarden voor instabiliteit van mosselbanken als functie van de golfenergie op verschillende substraten (slib/schelpen).

Te gebruiken methoden: De ruimtelijke structuur van mosselbanken wordt bepaald met behulp van een op afstand bedienbare digitale camera welke gekoppeld wordt aan een helium ballon (Blimp) waar het NIOO-CEME over beschikt. Biomassa wordt geschat met behulp van bemonstering op een gestratificeerd grid.

Sedimentdynamiek op de langere termijn willen we bepalen met behulp van een 3D laser scanner, welke de verhoging van de mossel clusters ruimtelijk expliciet op 1mm nauwkeurig kan inmeten. Dit zal gecombineerd worden met metalen plaatjes die onder het bed geplaatst worden voor de start van de herstelexperimenten. Sediment dynamiek op de korte termijn kan bepaald worden met luminofoor-tracers.

Voor het bepalen van drempelwaarden voor de instabiliteit van mosselbanken willen we gebruik maken van de golf-flume (een “stromingsgoot”) op het NIOO-CEME, welke ons in staat stelt sediment erosie en mosselbed instabiliteit nauwkeurig te bepalen onder gecontroleerde condities met een specifieke golflaag.

9) Vervolgstappen: hoe kunnen resultaten van het project bijdragen aan herstel op grotere schaal?

Dit project is gericht op de realisatie van mosselbanken op de korte termijn. Er ligt echter tevens een grote kans in het perspectief wat geboden wordt; het project vormt een sterke basis voor een toekomstig natuurherstelprogramma in de Waddenzee. Concreet zijn er drie aanknopingspunten voor de toekomst:

1. Herstel van Biobouwers.

Indien de aanleg van mosselbanken kan worden bewerkstelligd, dan biedt dit kansen voor de toekomst. Het voorstel richt zich in eerste instantie op een beperkt areaal, maar dit areaal kan mogelijk worden uitgebreid. Met het herstel van de mosselbanken op grotere schaal zullen de ecologische processen en soorten die met dergelijke banken geassocieerd zijn, terugkeren. Dit zal een directe versterking van natuurwaarden betekenen. Maar meer nog; de ontwikkeling van mosselbanken kan bijdragen aan de verbetering van de habitat van zeegrasvelden, indien er voldoende mosselareaal bijkomt om de kwaliteit van het water te verbeteren. Zeegrasvelden vormen weer hun eigen habitat, en als zodanig kan het herstel van mosselbanken fungeren als hefboom om grotere herstelprocessen in gang te zetten.

2. Gerichte kansen voor natuurherstel.

De natuur van het Waddengebied gaat een onzekere nabije toekomst tegemoet. Stijging van watertemperatuur en de zeespiegel door klimaatverandering zorgen voor nieuwe omstandigheden die zich in het recente verleden niet hebben voorgedaan. Klassieke monitoringsactiviteiten in de Waddenzee, zoals van waterkwaliteitsparameters door Rijkswaterstaat, en monitoring van vogels en zeezoogdieren, zijn niet gevoelig en/of kleinschalig genoeg om verschuivingen in de rijkdom en de complexiteit van het voedselweb waar te nemen. Dit project levert een nieuw monitoringsinstrument wat is gebaseerd op een set procesindicatoren die ontwikkeld worden met behulp van isotopen. Hiermee kan de mate van herstel van de voedselweb structuur worden bepaald. Deze indicatoren kunnen zo wor-

den gebruikt om een Waddenzee-brede kanskaart voor natuurherstel te ontwikkelen. Aan de hand van deze kanskaart kan beter worden ingeschat welke locaties meer of minder geschikt zijn voor natuurherstel. Daarmee kunnen herstelmaatregelen effectiever worden ingezet.

Deze inzichten vormen een belangrijk instrument voor de nabije toekomst, nu de maatschappelijke vraag naar versterking van natuurherstel toeneemt. Actieve pogingen tot herstel in het Waddenzee gebied hebben zich tot op heden geconcentreerd op binnendijkse gebieden en kwelders. Herstel van het buitendijkse wad is urgent, maar vormt een complex probleem. Meer inzicht in de ruimtelijke en temporele karakteristieken van de ecologische sleutelprocessen zijn dan van wezenlijk belang om gepaste maatregelen te kunnen nemen. De nieuwe methoden zullen vooral toepassing vinden bij de overheidsdiensten die verantwoordelijk zijn voor monitoring in het Waddengebied. Daarnaast hebben de betrokken natuurorganisaties grote belangstelling voor deze methoden.

3. Versterking van samenwerkingsverbanden.

Dit project is opgezet om verschillende partners bij elkaar te brengen. Er is bij natuurorganisaties en beheersinstanties grote behoefte aan een integratief project dat in staat is belangrijke inhoudelijke verbindingen te leggen tussen diverse nu lopende grote initiatieven op het gebied van onderzoek en uitvoering van herstelmaatregelen in de Waddenzee. Daarnaast is er een grote behoefte om bestaande en nieuwe inzichten operationeel in te kunnen zetten. Hiertoe is een concreet samenwerkingsverband nodig. Het huidige consortium kan vooral effectief opereren omdat het verbonden wordt door een concrete behoefte aan inzicht in een actueel probleem. De uitkomsten van dit voorstel voorzien in een duidelijke vraag en zullen zeker in praktijk worden ingebracht. De voorgestelde maatregelen zullen daarnaast als belangrijk eindproduct hebben dat praktijkkennis wordt ontwikkeld bij de huidige partners en de beleidsmakers over herstel van natte natuur in het Waddengebied. Voorts kan deze praktijkkennis die op de locaties van de herstelmaatregelen is opgedaan, breder worden toegepast op meer locaties, na bekend is welke herstelmaatregelen het meest effectief zijn. Als zodanig kan dit voorstel fungeren als een format voor samenwerking binnen toekomstige herstelprogramma's in de Waddenzee.

10) Projectrisico's

Door de breedte van dit project zijn de risico's beperkt. Door in te zetten op locaties waar al jonge mosselbanken aan het vestigen zijn (Schiermonnikoog) versus waar die niet meer zijn (Ameland, Griend) zal in ieder geval resultaat verzameld worden die leidt tot beter begrip van de problematiek, en is de kans op het slagen van herstel groot.

Door de variatie in herstelmaatregelen die wordt uitgetoetst, waarbij zowel mogelijke beperkingen in de vestigingsfase als in de handhavingfase getracht wordt op te heffen, is de kans op succes van het slagen van ten minste sommige behandelingen daarnaast ook groot.

Er worden geen problemen met ontheffingen NB wet of andere vergunningverlening verwacht, aangezien het hier zeer beperkte ingrepen betreft die juist de natuurwaarden versterken. Door de experimenten te beperken tot gebieden die gesloten zijn voor de visserij zijn er geen belangenconflicten in gebruik van bepaalde gebieden.

Doordat Natuurmonumenten dit project indient namens de samenwerkende natuurbeschermingsorganisaties Waddenzee, welke zich unaniem achter dit project hebben gesteld, zijn er ook geen bezwaren vanuit die kant te verwachten tegen het project.

De uitvoering van de experimenten in de directe nabijheid van goed uitgeruste onderzoeks-

stations zijn er geen grote logistieke problemen te verwachten (onderkomen projectmedewerkers, apparatuur, materiaal, verwerking monsters). Bovendien zal ten aanzien van logistiek en uitvoering maximale samenwerking worden gezocht met de relevante overheidsinstanties (LNV, Rijkswaterstaat), welke al grote belangstelling hebben getoond voor het project.

Een projectrisico wat niet geheel uitgesloten kan worden is dat de beperkende factoren voor herstel van stabiele mosselbanken en biodiversiteit uiteindelijk buiten de controle van het experiment liggen. Vooral kunnen dit zijn klimatologische factoren (stijging temperatuur) en de extinctie van toppredatoren, welke mogelijke de predatoren van mossels vroeger onder controle hielden. Maar wel zal procesgericht onderzoek plaatsvinden om de rol van deze factoren als oorzaak van uitblijven van herstel te identificeren, wat uiteindelijk dan toch een waardevolle uitkomst van het project zou zijn. In dat geval kunnen aanvullende maatregelen worden geformuleerd om beperkende factoren op te heffen. Ten aanzien van het gebruik van stabiele isotopen voor bepaling voedselweb structuur en ecosysteem functioneren in estuaria: dit is een methode die nu al meer dan 20 jaar gebruikt wordt, en daarom goed uitontwikkeld en getest is (Bianchi 2007; Dawson & Siegwolf 2007). Maar merkwaardig genoeg nooit grootschalig is toegepast op de Nederlandse Waddenzee. Daarom is de kans op succes voor dit deel van het project zeer groot.

11) Bronnen

- Albrecht A.S. (1998). Soft bottom versus hard rock: Community ecology of macroalgae on intertidal mussel beds in the Wadden Sea. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 229, 85-109.
- Bayne B.L., Hawkins A.J.S., Navarro E. & Iglesias I.P. (1989). Effects of seston concentration on feeding, digestion and growth in the mussel *Mytilus edulis*. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 55, 47-54.
- Bayne B.L., Iglesias J.I.P., Hawkins A.J.S., Navarro E., Heral M. & Deslouspaoli J.M. (1993). Feeding behavior of the Mussel, *Mytilus edulis* - Response to variations in quantity and organic content of the seston. *J. Mar. Biol. Soc. UK*, 73, 813-829.
- Behre K.E. (2007). A new Holocene sea-level curve for the southern North Sea. *Biotropica*, 36, 82-102.
- Beukema J.J. & Cadee G.C. (1996). Consequences of the sudden removal of nearly all mussels and cockles from the Dutch Wadden sea. *Marine Ecology-Pubblicazioni Della Stazione Zoologica Di Napoli I*, 17, 279-289.
- Beukema J.J. & Dekker R. (2005). Decline of recruitment success in cockles and other bivalves in the Wadden Sea: possible role of climate change, predation on postlarvae and fisheries. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 287, 149-167.
- Bianchi T.S. (2007). *Biogeochemistry of estuaries*. Oxford University Press, Oxford.
- Brandsma T. & van Ulden A. (2008). De toestand van het klimaat in 2008. In: KNMI De Bilt, p. 48.
- Brandt G., Wehrmann A. & Wirtz K.W. (2008). Rapid invasion of *Crassostrea gigas* into the German Wadden Sea dominated by larval supply. *J. Sea Res.*, 59, 279-296.
- Brinkman A.G., Dankers N. & van Stralen M. (2002). An analysis of mussel bed habitats in the Dutch Wadden Sea. *Helgoland Mar. Res.*, 56, 59-75.
- Callaway R. (2003). Long-term effects of imitation polychaete tubes on benthic fauna: they anchor *Mytilus edulis* (L.) banks. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 283, 115-132.
- Carrington E. (2002). The ecomechanics of mussel attachment: From molecules to ecosystems. *Integr. Comp. Biol.*, 42, 846-852.
- Dankers N., Brinkman A.G., Meijboom A. & Dijkman E. (2001). Recovery of intertidal mussel beds in the Waddensea: use of habitat maps in the management of the fishery. *Hydrobiologia*, 465, 21-30.
- Dare P.J. & Edwards D.B. (1976). Experiments on survival, growth and yield of relaid seed mussels (*Mytilus edulis*) in Manai Straits, North Wales. *Journal Du Conseil. Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, 37, 16-28.
- Davenport J., Smith R. & Packer M. (2000). Mussels *Mytilus edulis*: significant consumers and destroyers of mesozooplankton. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 198, 131-137.
- Dawson T.E. & Siegwolf R.T.W. (eds.) (2007). *Stable isotopes as indicators of ecological change*. Elsevier, Berlin.
- de Boer W.F. (2007). Seagrass-sediment interactions, positive feedbacks and critical thresholds for occurrence: a review. *Hydrobiologia*, 591, 5-24.
- Dekker R. & Beukema J.J. (2007). Long-term and large-scale variability in productivity of the tellinid bivalve *Macoma balthica* on Wadden Sea tidal flats. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 337, 117-134.
- Den Hartog C. & Polderman P.J.G. (1975). Changes in the seagrass populations of the Dutch Waddenzee. *Aquat. Bot.*, 1, 141-147.
- Dijkema K.S. (1987). Changes in salt-marsh areas in the Netherlands Wadden Sea after 1600. In: *Vegetation between land and sea* (eds. Huiskens AHL, Blom CWPM & Rozema J). Dordrecht Dr. W. Junk Publishers.
- Gutierrez J.L. & Jones C.G. (2006). Physical ecosystem engineers as agents of biogeochemical heterogeneity. *Bioscience*, 56, 227-236.

- Gutierrez J.L., Jones C.G., Strayer D.L. & Iribarne O.O. (2003). Mollusks as ecosystem engineers: the role of shell production in aquatic habitats. *Oikos*, 101, 79-90.
- Hawkins A.J.S., Bayne B.L., Bougrier S., Heral M., Iglesias J.I.P., Navarro E., Smith R.F.M. & Urrutia M.B. (1998). Some general relationships in comparing the feeding physiology of suspension-feeding bivalve molluscs. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 219, 87-103.
- Hemminga M.A. & Duarte C.M. (2000). *Seagrass Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hunter E. & Naylor E. (1993). Intertidal migration by the shore crab *Carcinus maenas*. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 101, 131-138.
- Jones C.G., Lawton J.H. & Shachak M. (1994). Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, 69, 373-386.
- Jorgensen C.B. (1996). Bivalve filter feeding revisited. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 142, 287-302.
- Macisaac H.J. & Rocha R. (1995). Effects of suspended clay on Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) feces and pseudofaeces production. *Arch. Hydrobiol.*, 135, 53-64.
- Mooser G.M. & Carrington E. (2006). Seasonal variation in mussel byssal thread mechanics. *J. Exp. Biol.*, 209, 1996-2003.
- Mooser G.M. & Leba H. (2006). Seasonal influence of wave action on thread production in *Mytilus edulis*. *J. Exp. Biol.*, 209, 881-890.
- Nehls G., Diederich S., Thielgtes D.W. & Strasser M. (2006). Wadden Sea mussel beds invaded by oysters and slipper limpets: competition or climate control? *Helgoland Mar. Res.*, 60, 135-143.
- Norkko A., Hewitt J.E., Thrush S.F. & Funnell G.A. (2001). Benthic-pelagic coupling and suspension-feeding bivalves: Linking site-specific sediment flux and biodeposition to benthic community structure. *Limnol. Oceanogr.*, 46, 2067-2072.
- Olf H., De Leeuw J., Bakker J.P., Platerink R.J., Van Wijnen H.J. & De Munck W. (1997). Vegetation succession and herbivory in a salt marsh: changes induced by sea level rise and silt deposition along an elevational gradient. *J. Ecol.*, 85, 799-814.
- Peterson B.J. & Heck K.L. (2001a). An experimental test of the mechanism by which suspension feeding bivalves elevate seagrass productivity. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 218, 115-125.
- Peterson B.J. & Heck K.L. (2001b). Positive interactions between suspension-feeding bivalves and seagrass - a facultative mutualism. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 213, 143-155.
- Philippart C.J.M., Beukema J.J., Cadee G.C., Dekker R., Goedhart P.W., van Iperen J.M., Leopold M.F. & Herman P.M.J. (2007). Impacts of nutrient reduction on coastal communities. *Ecosystems*, 10, 95-118.
- Ragnarsson S.A. & Raffaelli D. (1999). Effects of the mussel *Mytilus edulis* L. on the invertebrate fauna of sediments. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 241, 31-43.
- Reneerkens J., Piersma T. & Spaans B. (2005). *De Waddensee als kruispunt van vogeltrekwegen*. In: NIOZ report Texel.
- Reusch T.B.H., Chapman A.R.O. & Groger J.P. (1994). Blue mussels *Mytilus edulis* do not interfere with eelgrass *Zostera marina* but fertilize shoot growth through biodeposition. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 108, 265-282.
- Scheffer M. & Carpenter S.R. (2003). Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends Ecol. Evol.*, 18, 648-656.
- Thiel M. & Ullrich N. (2002). Hard rock versus soft bottom: the fauna associated with intertidal mussel beds on hard bottoms along the coast of Chile, and considerations on the functional role of mussel beds. *Helgoland Mar. Res.*, 56, 21-30.
- Thrush S.F., Hewitt J.E., Gibbs M., Lundquist C. & Norkko A. (2006). Functional role of large organisms in intertidal communities: Community effects and ecosystem function. *Ecosystems*, 9, 1029-1040.
- van de Koppel J., Rietkerk M., Dankers N. & Herman P.M.J. (2005). Scale-dependent feedback and regular spatial patterns in young mussel beds. *Am. Nat.*, 165, E66-E77.
- van der Heide T., van Nes E.H., Geerling G.W., Smolders A.J.P., Bouma T.J. & van Katwijk M.M. (2007). Positive feedbacks in seagrass ecosystems: Implications for success in conservation and restoration. *Ecosystems*, 10, 1311-1322.
- van Gils J.A. (2006). Shellfish dredging pushes a flexible avian top predator out of a marine protected area. *PLOS Biology*, 4, 2399-2404.
- van Katwijk M.M., Hermus D.C.R., de Jong D.J., Asmus R.M. & de Jonge V.N. (2000). Habitat suitability of the Wadden Sea for restoration of *Zostera marina* beds. *Helgoland Mar. Res.*, 54, 117-128.
- Wall C.C., Peterson B.J. & Gobler C.J. (2008). Facilitation of seagrass *Zostera marina* productivity by suspension-feeding bivalves. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 357, 165-174.
- Ward J.E. & Shumway S.E. (2004). Separating the grain from the chaff: particle selection in suspension- and deposit-feeding bivalves. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 300, 83-130.
- Widdows J., Lucas J.S., Brinsley M.D., Salkeld P.N. & Staff F.J. (2002). Investigation of the effects of current velocity on mussel feeding and mussel bed stability using an annular flume. *Helgoland Mar. Res.*, 56, 3-12.
- Wolff W.J. (2000). Causes of extirpations in the Wadden Sea, an estuarine area in the Netherlands. *Conserv. Biol.*, 14, 876-885.
- Wolff W.J. (2005). The exploitation of living resources in the Dutch Wadden Sea: a historical overview. *Helgoland Mar. Res.*, 59, 31-38.
- Wong W.H. & Levinton J.S. (2006). The trophic linkage between zooplankton and benthic suspension feeders: direct evidence from analyses of bivalve faecal pellets. *Mar. Biol.*, 148, 799-805.