

De levende natuur als ecosysteemvormer in kustgebieden

De effecten van biologische activiteiten en materialen in de ecologie van de zandige kust.

H. Peletier & G.M. Janssen 2004

Rapport RIKZ/2004.005

Inhoudsopgave

.....

Inhoudsopgave 3

Samenvatting 5

1 Inleiding 9

2 Biologische stabilisatie en destabilisatie in kustsystemen, effecten van de levende natuur 13

2.1 Ontstaan biogeen sediment 13

2.2 Biologische sediment stabilisatie 13

2.2.1 Stabilisatie door bacteriën, blauwwieren, diatomeeën 13

2.2.2 Stabilisatie door macrofyten 16

2.2.3 Stabilisatie door filter feeders 17

2.2.4 Stabilisatie door deposit feeders 17

2.2.5 Stabilisatie door zeegrasvelden, macroalgenmatten en kweldervegetatie 21

3 Biologische destabilisatie in kustsystemen door de werkzaamheid van organismen 23

3.1 Kruip en verblijfsporen 23

3.2 Sediment eters 24

4 Synthese van biologische stabilisatie en destabilisatie van de verschillende morfologische zones (kustzone, strand, wadplaten en kwelders) in het Nederlandse kustgebied. 29

5 Conclusie 31

6 Aanbevelingen 33

Literatuur 35

Samenvatting

Wereldwijd vindt erosie plaats van zandige kusten. Ook in Nederland moeten jaarlijks maatregelen worden genomen om de erosie tegen te gaan. Met het oog op de te verwachten ontwikkelingen door veranderingen in het klimaat, zal het erosieprobleem bovendien steeds groter worden. In Nederland wordt erosie bij voorkeur bestreden door het overbrengen van zand van dieper water naar de meer nabij de kust gelegen zone en het strand. Uit de in dit rapport beschreven gegevens, afkomstig uit verschillende literatuurbronnen blijken organismen een belangrijke rol te spelen in de processen die uiteindelijk tot erosie of sedimentatie leiden. Organismen kunnen sediment zowel stabiliseren als destabiliseren. Het rapport geeft hiervan vele voorbeelden.

In mariene kustsystemen kan een leefomgeving veranderen door de aanwezigheid van marien fytoplankton, microbiële matten, de wortelende vegetatie, migrerende en slijmafscheidende organismen, organismen die deeltjes uit het water verkitten door het op te eten en weer uit te scheiden, ontstaan riffen en bedden van gravende en kruipende organismen (zie overzicht tab.1). Een aantal van deze organismen stabiliseren of destabiliseren hun omgeving zodat het meer of minder tegen erosie bestand is. Een dicht netwerk van blauwwierdraden veroorzaakt sediment stabilisatie. Diatomeeën produceren slijmstoffen (EPS) die het sediment vastkitten en de erosie beperken. Mucus excretie is een algemeen verschijnsel van organismen die in het sediment wonen zoals meiofauna en polychaeten. Filtrerende schelpdieren vangen zwevende stof in en hebben een stabiliserende werking op sediment transport. Filtreerders (sabellaria, mosselen, oesters) vormen stabiele riffen, verschillende taxa (sponzen, zeesterren, zeekomkommers en kwalpoliepen) verzamelen zich tot groepen die elkaar voordeel bieden bij het invangen van deze partikels. Zo zijn er tal van voorbeelden waarin organismen een invloed uitoefenen op de dode natuur.

Het omwerken van sediment door organismen gebeurt in bijna alle kustgebieden. De meest effectieve bioturbators zijn kreeften en garnalen. Zij komen vaak in hoge dichtheden voor en monopoliseren de benthische gemeenschap volledig. Naast organismen die sedimentpartikels van de bodem eten en zo het sediment bewerken zijn er ook organismen die het sediment verstoren doordat ze lopen en kruipen over het oppervlak, een schuilplaats zoeken, macrobenthos eten en herbivoren die zich met rhizomen voeden, het omwoelen van de bodem op deze manieren noemen we bioturbatie. Al deze gravers met hun kokers en holen destabiliseren het sediment en hebben effect op erosie processen in mariene kustsystemen.

In tabel 1 worden verschillende voorbeelden van organismen in kustgebieden gegeven die met hun activiteit een effect hebben op de dode natuur.

In tabel 2 wordt een schematisch overzicht gegeven van de (de-)stabiliserende werking van organismen in de verschillende morfologische zones in de Nederlandse kustgebieden.

Belangrijke stabiliseerders zijn microalgen en kwelder- en duinvegetaties. Filtreerders die ook banken en riffen vormen en een aantal polychaeten (vooral kokerwormen) stabiliseren het sediment ook.

Destabiliserend zijn de activiteiten van een aantal polychaeten, amphipoden, isopoden en enkele crustacea. Menselijke activiteiten zoals de boomkorvisserij en betreding in duingebieden hebben ook een destabiliserend effect.

Het verdient aanbeveling de kennis over de rol van de levende natuur in kustgebieden te gebruiken voor een optimalisatie van het beheer en beleid van de kust. Daartoe is het noodzakelijk een vervolgstap te zetten op deze inventarisatie. Daarbij moeten de volgende aspecten aan de orde komen: het kwantificeren van de rol van de levende natuur in het Nederlandse kustgebied, het opstellen van een voor het beleid en beheer bruikbaar model waarin de processen goed worden beschreven én een nadere studie naar de effecten van menselijke activiteiten op de (de-)stabiliserende werking van organismen in de kustzone.

Tabel 1
Voorbeelden van ecosysteem vormers in kustgebieden.

Organisme	Activiteit	Effect	Referentie
Marien fytoplankton	Bloeien phytoplankton Deeltjes absorberen licht	Vergroot temperatuur oppervlaktewater	Townsend et al., 1992
Cyanobacterien en Diatomeeen	Uitscheiden organische verbindingen	Kitten zand en vormen matten	West, 1990; Paterson, 2001
Macrophyten	Wier bedden	Reduktie golven	Carpenter, 1986
Marine meiofauna	Biodepositie/bioturbatie	Verandert nutrient flux Zuurstofhuishouding	Reichelt, 1991
Macrofauna	Graven	Fysische en chemische en biologische parameters sediment	Meadows, 1991
Marine zooplankton	Filtreert partikel	Pellet transport	Fowler, 1986
Koralline algen	Bindt sediment	Reduceert golfslag	Anderson, 1992
Mosselen/oesters	Secretie byssus draden	Vermindert erosie	Widdows2002
Riffen/sabellaria	Rif vorming	Vermindert golfslag	Vorberg, 1995
Kweldervegetatie	Groei	Reduceert erosie	Widdows et al
Helm	Groei	Legt zand vast	Klijn 1981

Tabel 2

Schematisch overzicht van de (de-) stabiliserende werking van organismen in de verschillende morfologische zones in de kust.

		kustzone	strand	wadplaten	kwelder	duinen
microbiële activiteit			bacteriematten	bacteriematten	bacteriematten, algen	
prim. productie	microalgen		blauwwiermatten	microalgen	blauwwiermatten	microalgen
	macroalgen	laminaria			ulva, enteromorpha	
	hogere planten		vloedmerk		kwelderplanten	duinvegetatie
sec. productie	macrobenthos	polychaeten	polychaeten	polychaeten		
		amphipoden	amphipoden	Corophium		
		polychaeten	isopoden	Macoma		
		filtreerders	polychaeten	Hydrobia		
		sponzen	dode schelpen	polychaeten		
				filtreerders		
				banken, riffen		
				corophium, nereis		
	epibenthos	garnalen/krabben				
	vogels	zwarte zee-eend		vogels	ganzen/eenden	
	vissen	(juv.) platvis				

stabilisatie

destabilisatie

1 Inleiding

Ecologische ingenieurs zijn organismen die direct of indirect beschikbare bronnen moduleren door fysische veranderingen in biotische en abiotische materialen. Zij veranderen en creëren dus habitats. Hieronder een aantal voorbeelden:

- Een belangrijke omwerker (bioturbator) van sediment in terrestrische systemen is de aardworm (*Lumbricus terrestris*). Door microbiële activiteiten worden de faeces van aardwormen tot stabiele kleine fragmenten geformeerd dit is een sleutelfactor in de vorming van aarde (Bouche and Aladdan, 1997).
- Bevers (*Castor canadensis*) klieven bomen die voor de constructie van dammen worden gebruikt, zo verandert de omgeving in moerasgebied (fig.1).
- Groeiende veenmosgebieden, waardoor verlanding optreedt.
- Ganzen eten wortelstokken hierdoor verwoestijnen grote delen van de arctische bodem rondom de Hudson baai.

Figuur 1.
Bevers als ecologische ingenieurs.



Spelen ecologische ingenieurs ook een rol in kustgebieden ? Weer een paar voorbeelden (zie voor een overzicht tabel 1).

- Korallen, *Sabellaria*, mosselen en oesters veranderen hun omgeving door het invangen van partikels en vormen stabiele riffen en banken.
- Op een stabiel veld van geaccumuleerde naalden van sponzen kan een dichte laag van suspension feeders zoals mosdiertjes, manteldieren, poliepen, zeeanemonen, kwallen en korallen ontstaan (Amtz and Gallardo, 1994).
- In beschutte kustgebieden binden kruipende bodemalgen het sediment door hun mucus excretie en verhogen zo de sedimentcohesie.

-
- De verticale kokers van de worm *Lanice conchilega* reduceren de stroomsterkte en vormen zo een karakteristiek habitat.

In het Nederlandse kustgebied zijn 3 regio's te onderscheiden met grote morfologische verschillen:

1. de Delta kust, gekenmerkt door schiereilanden
2. de Hollandse kust, gekenmerkt door aaneengesloten kust – en duingebied
3. de Waddenkust, gekenmerkt door een reeks barrière eilanden

In deze regio's worden een aantal morfologische zones onderscheiden zoals de kustzone, strand, wadplaten, kwelders en duinen. Binnen deze morfologische zones zijn, in eroderende kustvakken waar de zandmassa afneemt, verschillende maatregelen nodig om deze kustzones te verdedigen.

Kustverdedigingsmaatregelen worden onderscheiden in zachte (zandsuppleties, duinaanplant) en harde maatregelen (strandhoofden, paalrijen, vooroeververdediging, duinverdediging en strandmuren). Door het uitvoeren van deze beheermaatregelen wordt getracht de basiskustlijn stabiel te houden. Een belangrijk aspect is hierbij het voorkomen van erosie; het afslijten van land door de werking van wind en zee. Structurele kusterosie betekent een geleidelijke, doorgaande afname van de zandhoeveelheid in een kustvak. Het geleidelijke zandverlies resulteert in een landwaartse verplaatsing van de kustlijn. Deze sediment erosie is afhankelijk van de interactie tussen fysische processen, sediment eigenschappen en biotische processen. Voor wat betreft de biotische processen gaat het om stabiliseerders en destabiliseerders.

Sedimenterosie is de resultante van stabiliserende en destabiliserende effecten op sedimenten. Stabiliteit in de kustzone wordt dus vaak bereikt door de aanleg van kustwerken. Maar wat is de rol van activiteiten van levende organismen in deze kustzones. Dit document beschrijft stabiliserende en destabiliserende effecten van de levende natuur in de kustzone met name door interacties tussen organismen en het substraat. Voorbeelden van deze interacties zijn: Diep wortelende vegetatie zoals helm (*Ammophila arenaria*), en biestarwegras (*Elytrigia juncea*) die door het stuivende zand vast te leggen de stabiliteit in het duingebied vergroten.

Bodemalgen (microphytobenthos) die in grote dichtheden voorkomen en het sediment vastkitten.

Kokerwormen, hoge dichtheden van wormen die kokers vormen zoals *Pygospio elegans* en de schelpkokerworm (*Lanice conchilega*) reduceren door hun kokers de stroomsnelheid en hebben dus ook een sediment stabiliserend effect (Eckman et al., 1981).

Sediment stabilisatie in getijde gebieden wordt ook versterkt door het filtreren van zeewater door schelpdieren en het invangen van sediment op mossel-en-oesterbanken en riffen. Schelpdieren in de Waddenzee bijvoorbeeld filtreren eens in de twee weken een volume water gelijk aan het volume water van de hele Waddenzee.

Klimaatveranderingen en de daaraan gekoppelde ontwikkeling van nieuwe soorten kunnen ook effect hebben op de stabiliteit in de kustzone. Een recent voorbeeld van grote invloed op de stabiliteit in kustgebieden is de rif vormende polychaete worm *Ficopomatus enigmaticus* die als nieuwkomer vanuit de Indische Oceaan in estuaria aan de Argentijnse kust voorkomt en daar riffen met een diameter van 4 meter en hoogte van een ½ meter bouwt (Palomo and Iribarne, 2000).

Destabiliserende effecten in de kustzone zijn de verschillende activiteiten van de bodemfauna in de bovenste sediment lagen zoals graven (bioturbatie), grazen, kruipen, maken van holen en vluchtruimten.

In sterk dynamische gebieden is het sediment transport te hoog voor bentische organismen om te leven. Ook in gebieden zonder waterbeweging kunnen bentische organismen niet goed gedijen. Bioturbatie speelt voornamelijk een rol in het gebied tussen deze extremen.

Kennis over deze stabiliserende en destabiliserende organismen en processen in de kustzone is van belang in verband met mogelijke effecten op het sedimenttransport en de uitvoering van de kustverdedigingswerken. Dit document beschrijft het effect van de verschillende organismen op hun omgeving en inventariseert de rol van de levende natuur op de sedimentdynamiek in de kustzone. Zijn er aanpassingen van het beheer van de kustzone mogelijk en noodzakelijk?

2 Biologische stabilisatie en destabilisatie in kustsystemen, effecten van de levende natuur

Organismen veranderen hun omgeving waardoor het meer of juist minder tegen erosie bestand is. Een aantal biotische processen die leiden tot stabilisatie en destabilisatie zijn:

- Ontstaan biogeen sediment.
- Biologische sediment stabilisatie; vastkitten zand door microbiële matten, tegengaan verstuiving door aanplant helm, invangen sediment door 'suspension feeders' (mosselbanken, oesterbanken, riffen) en wortelende planten (zeegras).
- Bewerken (bioturbatie) van het sediment door fauna; kruip-en-verblijfssporen, bewerken sediment door "deposit feeders", voedselrelaties, grotere predatoren en grazers.

2.1 Ontstaan biogeen sediment

Mariene sedimenten zijn te onderscheiden in lithogene en biogene sedimenten. Lithogene sedimenten ontstaan door fysische en chemische afbraak of verwerking van steen. Biogeen sediment is opgebouwd uit skeletten en schelpen van mariene organismen. Sommige biogene sedimenten bestaan uit calciumcarbonaat andere uit silicaat. Gelaagde microbiële matten die biogeen materiaal produceren zijn analoog aan de in het precambrium gevormde stromatolieten (fig.2), dit zijn zeer fijn gelaagde steenformaties van ca. 3 miljard jaar oud. De schelpen van planktonische foraminiferen bestaan uit kalk. Kalk en krijtsteen kusten bestaan voornamelijk uit deze door de oceaan omhoog gewerkte foraminifeer skeletten.

Figuur 2
Stromatolieten.



2.2 Biologische sediment stabilisatie

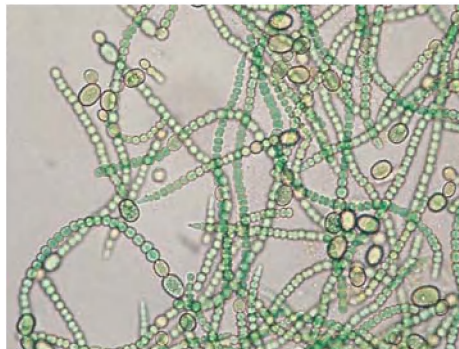
2.2.1 Stabilisatie door bacteriën, blauwvieren, diatomeeën

Organismen die bij stabiliserende processen een primaire rol spelen zijn microbiële matten, ééncellige bodem-diatomeeën en schimmels. Deze organismen stimuleren door de excretie van stofwisselingsproducten de

aggregatie van slik en fijn zand (diameter 0.004- 0.25 mm) tot korrels met een diameter van 1-2 mm. De aanwezigheid van deze aggregaten op het strand reduceert de wind erosie, dit is dus een belangrijke eerste stap in het vastleggen van zand.

Op beschutte stranden en in getijdengebieden komen blauwwiermatten voor, deze matten bestaan uit een dicht netwerk van draden (fig.3). De matten kunnen bestaan uit verschillende soorten zoals *Lyngbya*, *Oscillatoria* en *Microcoleus* deze soorten zijn mobiel en koloniseren het zand zodat een stevige structuur ontstaat die niet gemakkelijk wordt verstoord. Deze blauwwiermatten die ook purper bacteriën bevatten hebben dus ook een duidelijke sediment bindende werking (Grant and Gust, 1987). Deze gelaagde microbiële matten komen veel in intergetijde gebieden voor, met name in de tropen bereiken dergelijke matten een respectabele dikte door de hoge temperatuur en lichtintensiteit.

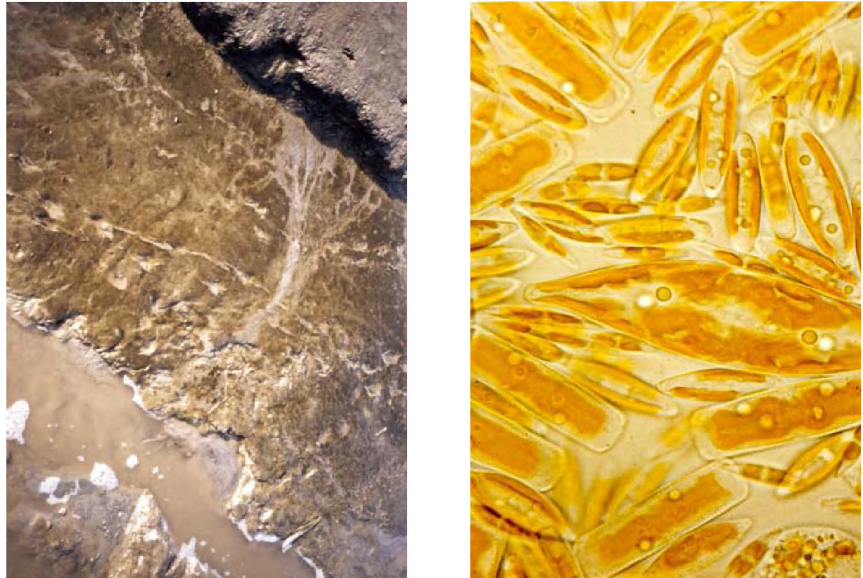
.....
Figuur 3
Blauwwierdraden.



De benthische microflora (microphytobenthos) van zand en slikplaten bestaat verder uit bodem diatomeeën. In gebieden met een hoge dynamiek bestaan deze benthische gemeenschappen uit soorten die in staat zijn zich aan het sediment te hechten de epipsamische fractie. Op grofzandige sedimenten in geëxponeerde gebieden is de diatomeeën biomassa vaak laag en bestaat vnl. uit deze episamische diatomeeën. Deze vastgehechte fractie kan door wind-en-getijgolven geresuspendeerd en geëxporteerd worden (Nelson et al., 1999; De Jonge and Beusekom, 1995). Op beschutte zand-en-slikplaten is de benthische microflora relatief het talrijkst en bestaat uit een diatomeeën fractie die, afhankelijk van de getij-en lichtcyclus door het sediment migreert, de epipelische fractie (fig.4). Tijdens dit migreren scheiden deze bodemdiatomeeën grote hoeveelheden extracellulaire producten (extracellular polymeric substances, EPS) vnl. polysachariden uit, hierdoor wordt het sediment vastgekit (fig.5). Deze EPS productie is per diatomeeën soort verschillend, sediment stabiliteit is dus ook een functie van de microphytobenthos soortsamstelling in getijdengebieden. Door snelle groei ontstaat een mat van diatomeeën, deze diatomeeënmat heeft een duidelijk effect op de kritische schuifspanning, de schuifspanning die leidt tot transport van het sediment. Een hoge diatomeeëndichtheid geeft een lagere schuifspanning dus minder sediment erosie en resuspensie van de bodemalgen met als gevolg meer sediment-stabiliteit (Sutherland et al., 1998; Lucas et al, 2000; Delgado et al., 1991; Underwood and Paterson, 1993; Tolhurst et al., 1999; Austen et al., 1999; Paterson et al., 1990; Madsen et al., 1993; Grant et al., 1986; Vos et al., 1988; Lionel et al., 1996; Blanchard et al., 1997; Sundbeck et al., 1990; Yallop et al., 1994; Nelson et al. 1999, Paterson and Hagerthey 2001.) (fig. 6 en 7). De grootste toename van de sediment stabiliteit werd gemeten op hoog gelegen stations in de getijdenzone en het meest extreem was dit op de stations met een dichte diatomeeën populatie.

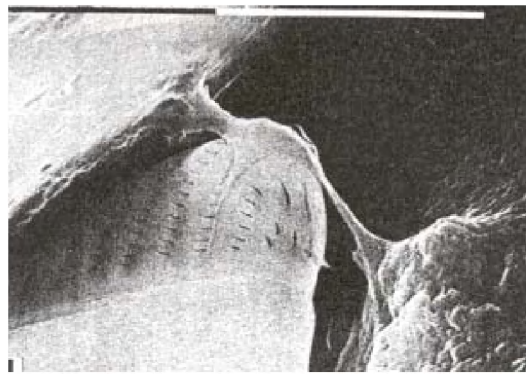
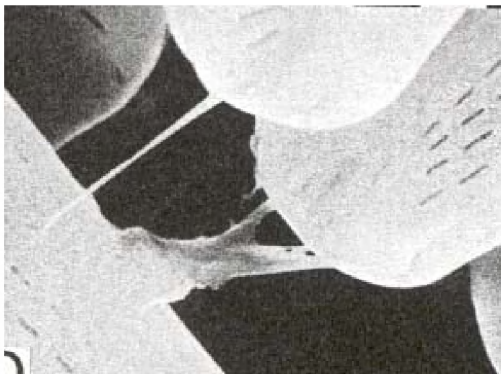
Figuur 4

Bodemdiatomeeën (links een algenmat, rechts de individuele cellen).



Figuur 5

Zandkorrels vastgekit door het uitscheiden van mucusdraden door diatomeeën.



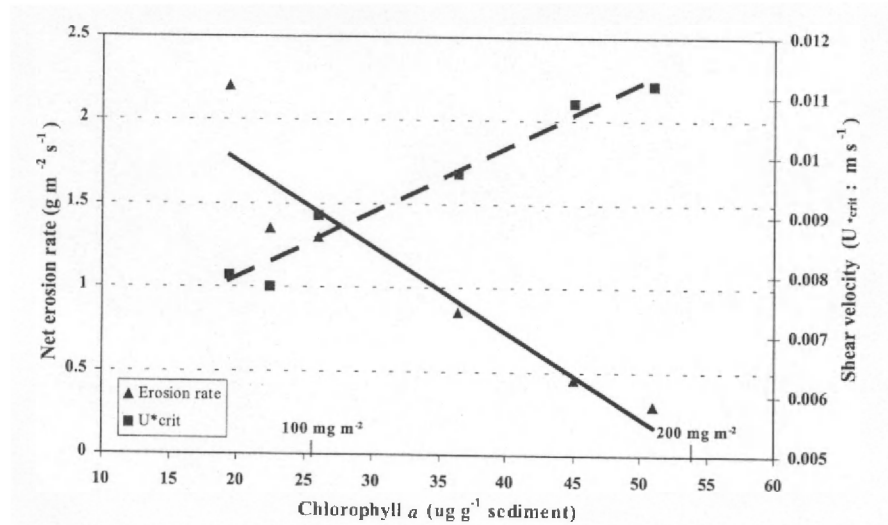
Figuur 6

Sedimentoplaag met een diatomeeën. EM. Opnames.



Figuur 7

Relatie tussen sediment erosie (driehoek) en microphytobenthos dichtheid (vierkant).
Widdows, 2002, Sutherland, 1998.



2.2.2 Stabilisatie door macrofyten

Helm wordt gebruikt om verstuing duurzaam tegen te gaan en aanstuiving te bevorderen (fig.8). In Nederland worden twee soorten helm gebruikt *Ammophila arenaria* en *Calammophila baltica* (Noordse helm). Goed aangeslagen helm stoelt goed uit en is in staat een groot oppervalk stuifvrij te maken en te houden. De zandvang wordt door helm gestimuleerd, bij gematigde zand aanvoer is de helm in staat met de aanwas mee te groeien, hierdoor ontstaat een dynamische begroeiing. Deze begroeiing van de bodem oppervlak heeft een duidelijk effect op de windsterkte en het zandtransport (fig.9).

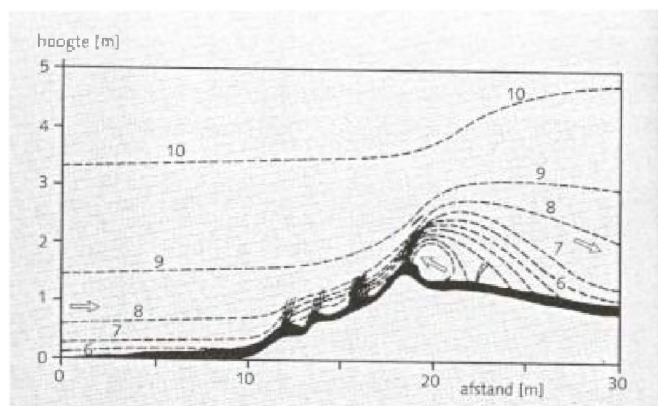
Figuur 8

Erosie in een duingebied.



Figuur 9

Effect van duinvegetatie op de windsnelheid in m/sec.



2.2.3 Stabilisatie door "filter feeders"

"Filter feeders" zijn algemeen in kustgebieden. Zij transporteren grote hoeveelheden materiaal tussen de waterkolom en de bodem. Sommige filtreerders filteren partikels uit het water via hun voedselorganen andere gebruiken netten die samengesteld zijn uit mucusdraden om partikels in te vangen. Een aantal filtreerders wijzigen de beschikbaarheid van het basismateriaal zo wordt het geschikt voor andere organismen. Filtreerders modificeren hun omgeving en creëren andere habitats, ze worden dan ook beschouwd als ecologische ingenieurs. Het invangen van sediment en het voorkomen in grote dichtheden van deze filtreerders bevordert de sediment stabilisatie.

2.2.4 Stabilisatie door deposit feeders.

Uitscheidingsproducten van kreeftachtigen zoals *Corophium volutator* en de worm *Nereis diversicolor* stabiliseren sedimenten. Deze uitscheidingsprodukten bestaan uit 1-2 μm brede draden die de sediment deeltjes samenbinden (Meadows et al., 1990). In veld experimenten werd de abundantie van *Corophium* gereduceerd door besproeiing van het sediment met een insecticide. Hierdoor nam de begrazing af en de diatomeeëndichtheid toe met als gevolg een toename van de polysaccharidensecretie en een toename van de schuifspanning van het sediment (Gerdol and Hughes, 1993).

Riffen

Een van de belangrijkste biologische structuren die een belangrijke functie hebben in de ecologie van kustsystemen zijn koraalriffen. Riffen zijn lange, smalle ondiepten in zee, steil omhoog rijkend uit een rotsachtige bodem. Het grootste rif op aarde is het 'Great Barrier' Reef ten oosten van Australië, dit rif is 145 km breed en 2000 km. lang. Koraalriffen zijn opgebouwd door kolonievormende koraaldieren met medewerking van zeepokken, tweekleppigen, kokerwormen, mosdiertjes, wormen, slakken, foraminiferen en kalkwieren. De steenkoralen van de *Hexacorallia*-orde *Scleractinia* zijn de belangrijkste rifbouwers. In de kalksteenskeletten leven Myriaden (minuscule koraalpoliepen) in symbiose met zooxanthellen (eencellige algen) in hun weefsel. Dankzij deze symbiose kunnen de poliepen van deze koraaltypen calciumcarbonaat afscheiden zodat hun kalkskelet kan groeien. Planktonische foraminiferen dragen ook bij aan de vorming van riffen. Dit zijn mariene protozoen met een kalkschaal die uit calcium carbonaat bestaat (fig.10). Ze komen massaal voor, de lege cellen bedekken enorme gebieden van de oceaانبodem speciaal in de Atlantische en Indische oceaan. In het 'Great Barrier' rif van Australië is de sediment bijdrage van foraminiferen (Amphistegina, Baculogypsina en Calcarina) ca. 30% (Yamano et al., 2000).

.....
Figuur 10
Foraminiferen.



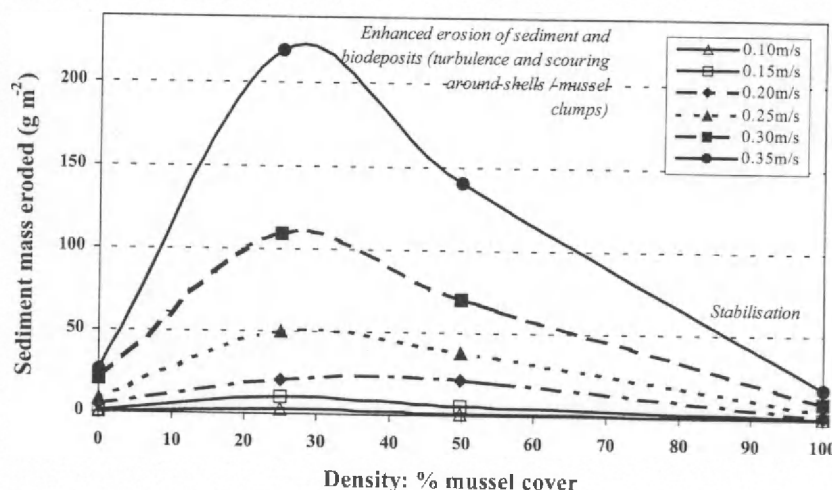
Ook kunnen er riffen gevormd worden door verschillende wormsoorten. De rifvormende worm *Diplochaetetes mexicanus* maakt 10 cm lange gangen, de wanden bestaan uit calciet. Deze rifbouwers vestigen zich op zachte bodems en stabiliseren het sediment, produceren biogeen detritus en bieden nieuwe ecologische niches voor endo- en epilitische organismen (Fischer et al., 1989).

Mossel- en oesterbanken

Mosselen hechten zich met behulp van byssus draden die ze afscheiden vast aan dijkvoeten, meerpalen of schelpfragmenten. Waar sterke turbulentie is vormen de mosselen 4-5 zoveel draden vergeleken met meer rustige plaatsen. Hierdoor ontstaat een dicht aaneengesloten laag van mosselen. Door biogene depositie van fijnkorrelig materiaal in de vorm van faeces en pseudofaeces wordt sediment vastgelegd waar de mosselen boven op liggen ze vormen dus hun eigen specifieke leefomgeving (Hild, and Gunther, 1999). Biodepositie snelheden van *Mytilus edulis* zijn gekwantificeerd en gerelateerd aan populatiedichtheden in een mossel bed. Deze biodepositie-snelheden zijn veel groter dan de natuurlijke sedimentatiesnelheden. Bij hoge mosseldichtheden (>1400 mosselen m^{-2}) neemt de sediment erosie met een factor 10 af in gebieden met veel slik, de ruwe oppervlaktestructuur van deze banken reduceert de golfsnelheid. In zandige gebieden is de relatie tussen mosseldichtheid en sediment erosie niet lineair, dit wordt veroorzaakt door veranderingen in het stromingspatroon rond mosselfragmenten (Widdows and Brinsley, 2002). Maximale erosie ontstaat bij een mosselbedekking van 25-50%, bij een afname en een toename van de mosselbedekking neemt de sediment erosie weer af, het sterkst bij een stroomsnelheid van ca 0,35 m/s. (fig.11). Mosselbanken zijn van belang voor de zandbalans van de Waddenzee (Oost,1996), ze kunnen meer dan een meter boven de omringende platen uitrijzen. Oude banken zijn zeer stormbestendig en stabiliseren kreekpatronen, omdat kleilagen en schelpenlagen relatief weinig erosie ondergaan. In de jaren 70 bevatte de Nederlandse Waddenzee 4120 ha aan mosselbanken in de jaren 80 nam het gebied, vanwege intensieve bevissing en strenge winters, sterk af. In 1991 was er helemaal niets over. Sindsdien (vooral sinds 1998) treedt weer herstel op van ca. 2000 ha. In het verleden kwamen banken van inheemse oesters (*Ostrea edulis*) algemeen voor in de Noordzee (fig. 12). Oesterbedden werden ook tot de voornaamste kenmerken van de getijdengeulen in de Waddenzee gerekend en hebben waarschijnlijk een rol gespeeld in de stabilisatie van sedimenten. De laatste levende exemplaren zijn in 1940 waargenomen (Hagmeier, 1941).

Figuur 11

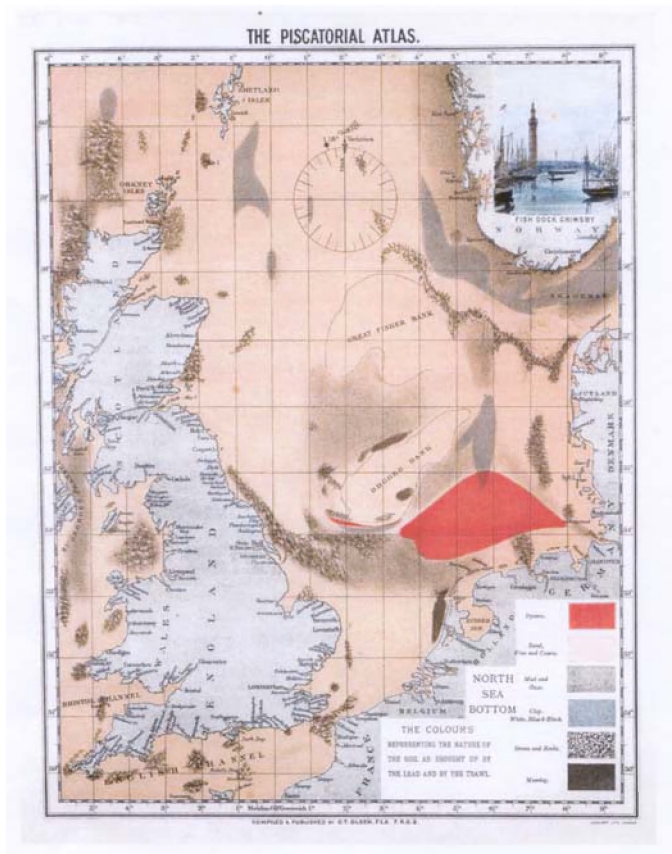
Effect van de mosseldichtheid (*Mytilus edulis*) en de stroomsnelheid op de sedimenterosie (Widdows, 2002).



Sinds enige jaren is de japanse oester een nieuwkomer in de Nederlandse kust (Waddenzee en Delta). De aanzienlijke verbreiding van deze nieuwe soort zal van invloed kunnen zijn op de stabiliteit van sedimenten.

Figuur 12

De Noordzee bodem in 1888 (rood zijn de Oestergronden)



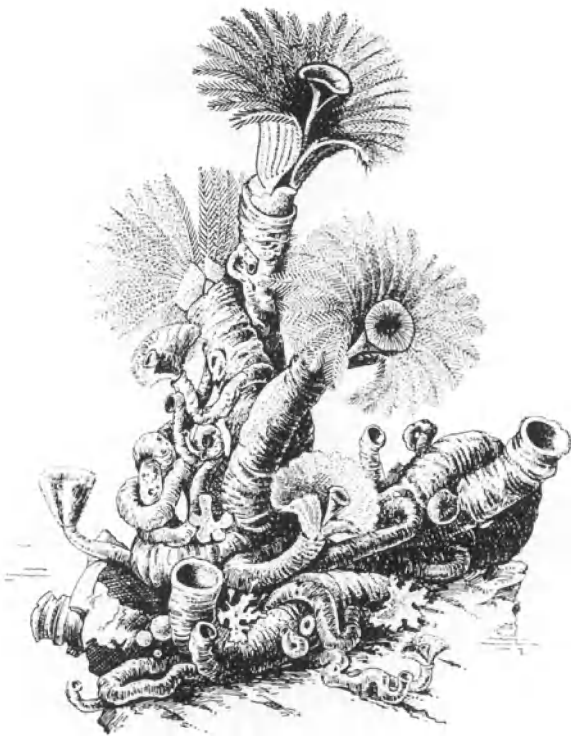
Kokerwormen

Veel polychaeten bouwen kokers met behulp van afscheidings producten uit klieren. De kokers zijn soms flexibele slijm schachten maar vaker onbuigzaam door afgescheiden organische componenten zoals poly-sachariden en proteïnen, die in contact met water hard worden (fig.13). In Nederland voorkomende kokerwormen vormen ook kokers van kalk, zand, schelpstukjes of klei. Enkele voorbeelden zijn; goudkammetje (*Pectinaria koreni*, koker-zand), *Pygospio elegans* (koker-zand), franjeworm (*Polydora ciliata*, koker-klei) en de schelpkokerworm (*Lanice conchilega*, koker- zand- en schelpfragmenten). Op zandplaten in de Waddenzee (laag litoraal) en in aangrenzende gebieden in de Noordzee tot het diepe sublitoraal worden hoge dichtheden (ca. 2800 ind. m²) van de schelpkokerworm *Lanice conchilega* waargenomen. De worm huist in een koker die 2-3 cm boven het sediment oppervlak uitsteekt en tot 20 cm diep in de bodem zit. Grote dichtheden van deze worm veranderen het stromingspatroon en reduceren de stroomsnelheid bij de bodem aanzienlijk (Zühlke et al. 1998). Doordoor wordt sediment ingevangen en veranderen fysische karakteristieken en hydrodynamische omstandigheden in het Lanice veld.

Schelpkokerwormen gemeenschappen liggen daardoor als een verhoging op de platen. In Frankrijk wordt sediment stabilisatie ook geïnduceerd door hoge dichtheden van de kokerbewonende borstelworm *Owenia fusiformis* (Thiebaut et al., 1997). Kokers van *Pygospio elegans*, die bestaan uit fijn zand bijeengehouden door slijm, stabiliseren het sediment ook. De stabilisatie is het sterkst wanneer ze in grote dichtheden op zandbanken in de Noordzee worden aangetroffen (Brey, 1991; Reise, 2001, fig.14). Maar zelfs een lage dichtheid van kokers heeft een sediment stabiliserend effect (Friedrichs et al., 2000). In Argentinië leeft de polychaet *Laeonereis acuta* in holletjes met een u vorm in

de bovenste 5 cm van de bodem en vormt daar sedimentheuvels. Dit materiaal is meer coherent en stabiliseert het sediment (Palomo and Iribarne, 2000). Uit experimenten in een stroomgoot bleek dat sediment minder snel resuspendeerd bij een hoge dichtheid van kokers van de polychaet *Diopatra cuprea* (Luckenbach, 1986) een polychaet die in hoge dichtheden in Columbia (USA) voorkomt.

.....
Figuur 13
Kokerwormen.



.....
Figuur 14
Pychospio banken op een zandbank in de Noordzee (Reise, 2001). Inzet: palpen die plankton invangen.



Een recent voorbeeld van grote invloed op de stabiliteit van de kust is een rifvormende polychaete worm die als nieuwkomer vanuit de Indische oceaan in estuaria aan de Argentijnse kust voorkomt en daar riffen met een diameter van 4 meter en een hoogte van ½ meter bouwt.

De kokerworm *Sabellaria spinulosa* heeft zwevende zandkorrels nodig om zijn buisjes te bouwen. Rifgemeenschappen kwamen daarom alleen voor in zeer geëxponeerde gebieden zoals getijde geulen. De riffen kunnen een dikte bereiken tot zo'n 0,5-1 meter. Vroeger kwamen in de Duitse Waddenzee veel uitgestrekte *Sabellaria* riffen voor. De riffen waren een veel voorkomende sublitorale structuur langs de glooiingen van de noordelijke zeegaten (Hagmeier and Kändler, 1927). In de jaren 90 zijn op twee plaatsen in het sublitoraal van de Jade langs de Duitse Noordzeekust nog levende *Sabellaria* riffen waargenomen, nu worden alleen op deze plaatsen nog compacte klompen lege kokers gevonden. Levende *Sabellaria spinulosa* is in Nederland recent waargenomen op stenen in de Zeeuwse Delta (Oosterschelde, Westerschelde, Voordelta) en op kustmatige aangelegde riffen op 8km van de kust bij Noordwijk (Stikvoort and Faasse, 2000, Van Moorsel, 1994). Van *Sabellaria alveolata* (fig.15) zijn grote rifarealen bekend uit de baai van Mont St. Michel in Frankrijk, waar in het intergetijde gebied tot honderden hectaren voorkomen (Caline, 1982).

.....
Figuur 15
Sabellaria riffen op het strand bij La Gachère
(Vendée, Frankrijk). Foto's Ed Stikvoort



2.2.5 Stabilisatie door zeegrasvelden, macroalgenmatten en kweldervegetatie

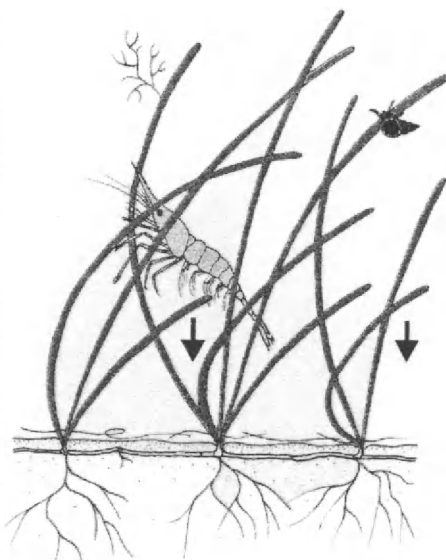
Zeegras

In Nederland komen twee soorten voor: Groot zeegras (*Zostera marina*) en Klein zeegras (*Zostera noltii*). Groot zeegras kan een lengte bereiken van meer dan 2 meter, met bladeren van 2 tot 5 mm breed. Klein zeegras is 20 cm lang met bladeren van ca 1,5 mm. Zeegrassen komen solitair voor maar ook in dichte goed ontwikkelde bedden. Een netwerk van ondergrondse wortelstokken biedt bescherming tegen losraken. De wortels stabiliseren de bodem en de bladeren verminderen de golf en getijstroom (fig.16). Door deze afname in turbulentie wordt fijn materiaal op de bodem afgezet met als resultaat een geleidelijke ophoging van de bodem. Zeegrasvelden creëren een eigen leefmilieu waardoor ook allerlei andere soorten zich hier kunnen vestigen zoals zeenaalden (*Syngnathus rostellatus* en *S. acus*). Onderzoek in een intergetijde gebied in de Baltische Zee met veel mosselbanken (*Mytilus edulis*)

en zeegras (*Zostera marina*) toonde aan dat, na het verwijderen van het zeegras, de mosselen tijdens een storm veel sneller losraken en wegspoelen. Ook bij normale klimaatomstandigheden had het zeegrasveld een sterke invloed op de verspreiding van de mossel aggregaten. In zeegrasvelden worden zelfs weer nieuwe mosselbanken gevormd (Reusch and Chapman, 1995). Andere zeegrasplanten (*Thalassia*) groeien goed in Caraïbische koraalriffen en spelen hier een belangrijke rol in de stabilisatie van sediment in het meer beschutte deel van het rif.

Figuur 16

Habitat effecten van een zeegrasveld (reductie stroomsterkte, invangen sediment, sediment stabilisatie). Widdows, 2002, Den Hartog, 2001.



Macroalgenmatten

In Europese estuaria komen plaatselijk dichte macroalgenmatten voor, deze matten bestaan vaak uit zeesla en darmwiersoorten (*Ulva*, *Enteromorpha*). Recente studies uitgevoerd in experimentele opstellingen in het laboratorium hebben het effect van deze matten op de hydrodynamica en de sediment dynamiek gekwantificeerd (Romano et al., submitted). Hieruit bleek dat een bij een toename van de bedekking met darmwier van 60 % en een stroomsnelheid van 0,25m/s en 0,14m/s de sediment erosie met respectievelijk 60% en 90% werd gereduceerd.

Kweldervegetaties

Het Engels slijkgras (*Spartina anglica*) is vanwege een dicht net van wortelstokken een belangrijke sediment stabilisator in kweldergebieden (Meyer et al., 1997). Ook de stengels hebben een duidelijk effect op de stroomsnelheid. Uit onderzoek uitgevoerd in een stroomgoot bleek dat bij een dichtheid van > 400 stengels m² de stroomsnelheid met 75% werd gereduceerd ten opzicht van sediment zonder slijkgras (ongepubliceerde data, Widdow et.al. 2002). Bij een dichtheid van < 400 stengels m² neemt de stroomsterkte weer snel toe.

3 Biologische destabilisatie in kustsystemen door de werkzaamheid van organismen

3.1 Kruip en verblijfsporen

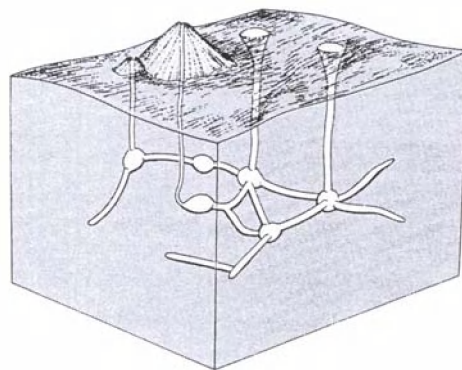
In getijdengebieden in het Waddengebied foerageren verschillende vogels op de zand en slikplaten, hierdoor raakt de bovenste laag van het sediment los en kan sneller eroderen (Cadée, 1990, 2001).

Verder wordt dit sediment gedestabiliseerd door migrerende meifauna en organismen die een schuilplaats zoeken en organismen die hopen en burchten maken zoals kreeften, krabben en garnalen. In de Noordzee wordt het bodemoppervlak verstoord door zich ingravende platvis. Twee gravende krabben (*Chasmagnathus granulata* en *Uca uruguayensis*) zijn in getijdengebieden in Argentinië belangrijke bioturbators. De gangen van *Chasmagnathus* zijn altijd open en vangen deeltjes klei en slik, rijk aan organische stof in, hierdoor verandert de sedimentsamenstelling. *Chasmagnathus* stabiliseert het sediment door het verplaatsen van fijn en samenhangend sediment naar het oppervlak. *Uca* echter verstoort het sediment door de productie van pellets en maakt daardoor de erosie gemakkelijker. Het dagelijkse sediment transport was dan ook lager in gebieden met een hoge *Chasmagnathus* dichtheid (Botto and Iribarne, 2000).

Om beschutting te vinden verbergen garnalen en platvissen zich in het sediment. Tegelvissen (*Caulolatilus*) maken zelfs gaten in de zeebodem met een diameter van 4-5m en een diepte van tenminste 2-3 m op zandbanken in Long Island (Able et al. 1987).

De kreeft *Callianassa subterranea* is algemeen in de Noordzee, de dichtheid is ongeveer veertig per vierkante meter. Het kreeftje vormt op vulkanen lijkende bergjes op de zeebodem (burchten) die wel veertig centimeter kunnen worden (fig.17). Door het graven en met zeewater ventileren van deze burcht draagt het kreeftje bij aan het omwoelen en zuurstofrijk maken van de zeebodem (Stamhuis, 1997). De burcht-bewonende kreeft *Callianassa californiensis* graaft tot een diepte van ca 1 m in de zeebodem, de hele populatie zet jaarlijks een 56 cm dikke laag sediment om (Myrick and Flessa, 1996; Ziebis et al., 1996). De versturende werking van bodemberoering door boomkorvisserij op deze structuren is onbekend, maar zou aanzienlijk kunnen zijn.

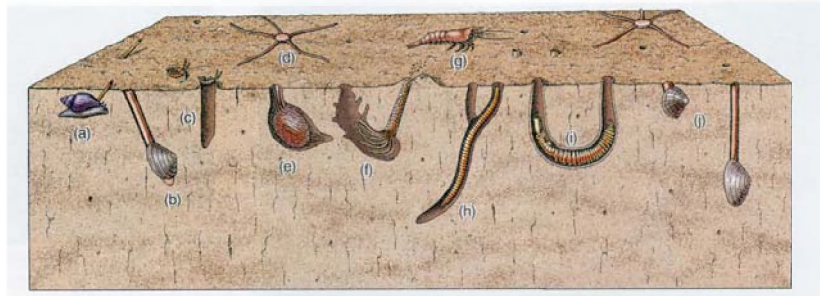
Figuur 17
Callianassa burchten (h=30cm, b=35cm, l=40cm). Stamhuis 1997.



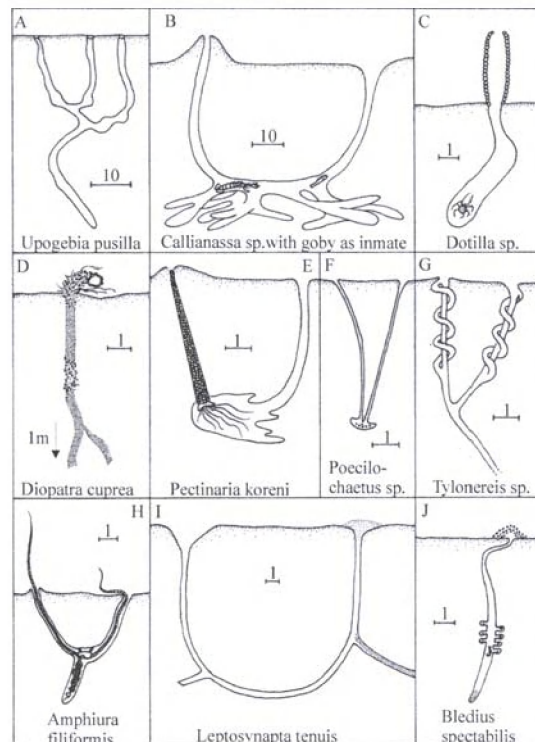
3.2 Sediment eters

Sediment eters zijn de belangrijkste bioturbators in getijdengebieden (Boudreau, 1988). Al deze gravers destabiliseren met hun kokers en holen het sediment in mariene kustsystemen (fig. 18) en veroorzaken een sterke toename van de sediment resuspensie. De meeste zijn u of y vormig (fig. 19) en hebben een stevige polysacharide bekleding. Deze organismen brengen sediment van diepere lagen naar boven (de polychaet *Heteromastus*, de tweekleppige *Macoma balthica*) of oppervlakte materiaal naar diepere lagen (de polychaet *Scolelepis*).

Figuur 18
Infauna en epifauna van intergetijde gebieden.

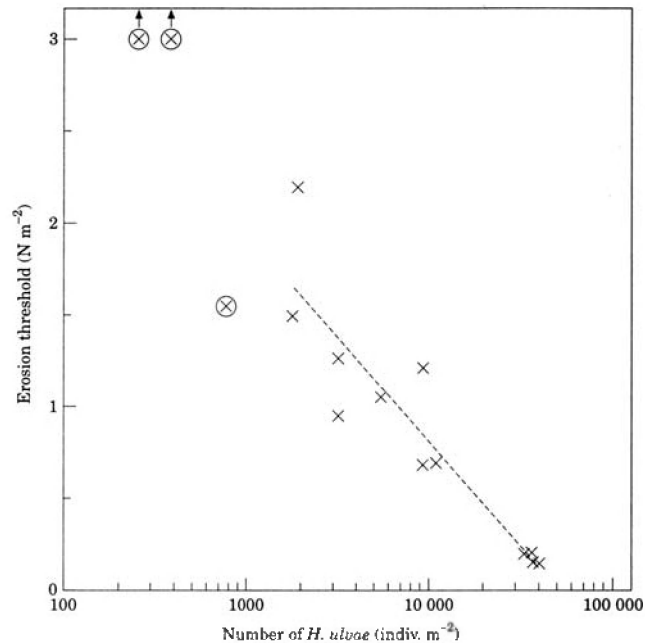


Figuur 19
Gangen en kokers van sediment bewerkers (bioturbators).
Reise, 2002.

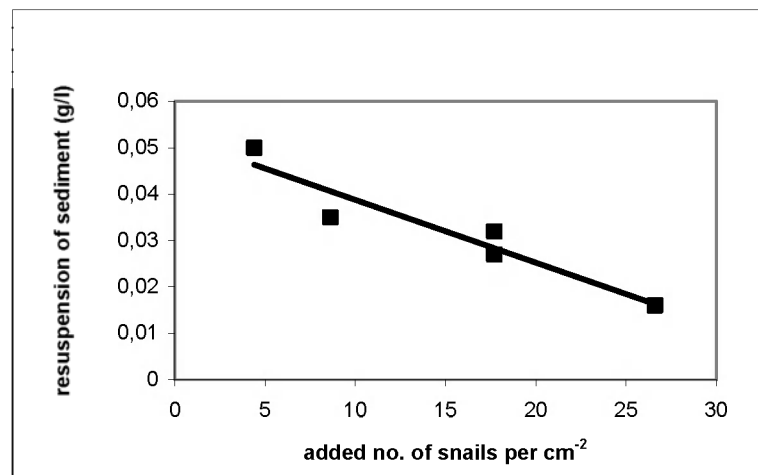


Wadslakjes (*Hydrobia ulvae*) begrazen microalgen matten hierdoor wordt de sedimentbinding verstoord met als gevolg een verlaging van de erosiedrempel (fig. 20, Austen et al., 1999; Blanchard et al., 1997). Echter bij zeer hoge dichtheden van de wadslakjes neemt de snelheid waarmee het sediment wordt gesuspenderd weer af, dit wordt veroorzaakt door het massaal uitscheiden van slijmsporen tijdens graasactiviteiten (Peletier et al., fig.21). De productie van faecopellets verlaagd weer de stabiliteit van het sediment, de pellets worden gemakkelijker geërodeerd.

Figuur 20
Relatie tussen de aantallen wadslakjes (*Hydrobia ulvae*) en de erosiedrempel (Austen, 1999).



Figuur 21
Relatie tussen aantallen wadslakjes (*Hydrobia ulvae*) en de sediment resuspensie. Peletier et al. Submitted.



Een sterke toename van de *Macoma* dichtheid leidde in het Humber estuarium (UK) tot een toegenomen erosie met als resultaat een grotere sediment afzetting op de boven het estuarium gelegen kwelders (Widdows et al., 2000). Uit studies uitgevoerd in het laboratorium blijkt dat er een duidelijke relatie is tussen de dichtheid van de schelpdieren en de erosie snelheid (fig.22). De erosiesnelheid neemt significant toe door de activiteiten van *Macoma* en is

afhankelijk van de dichtheid. Andere veldgegevens bevestigen de functionele relatie tussen de *Macoma* dichtheid en de hoeveelheid geresuspendeerd materiaal bij een realistische maximum stroomsnelheid, meer resuspensie bij een hoge *Macoma* dichtheid.

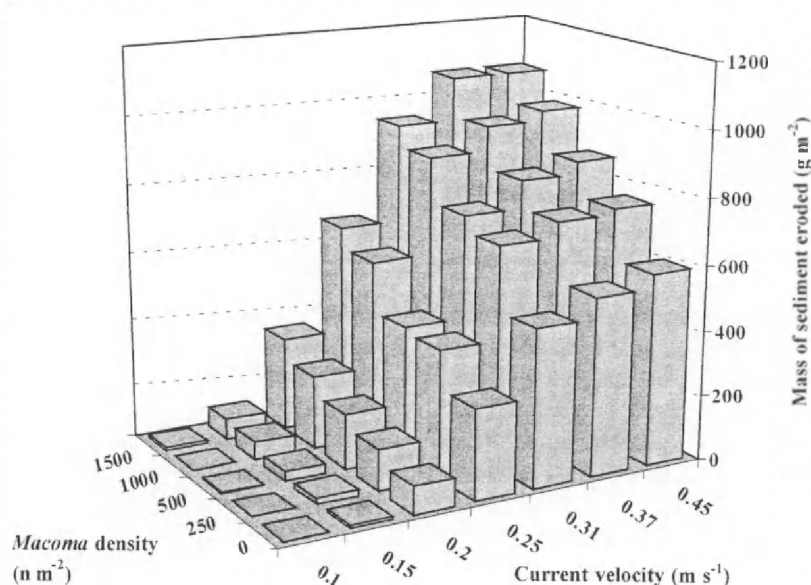
Uit experimenten uitgevoerd in een stroomgoot bleek dat bij een stroomsnelheid van $<20\text{ cm s}^{-1}$ de actieve resuspensie door *Corophium* belangrijker is dan natuurlijke resuspensie. De kritische erosie snelheid nam toe met de toename van de *Corophium* dichtheid (Deckere et al., 2000). In andere gebieden (Bay of Fundy, Canada) werd geen effect van de dichtheid van *Corophium* op de kritische erosie snelheid gevonden (Grant and Daborn, 1994).

Sediment mobiliteit heeft ook effect op de zonering van macrofauna in intergetijd gebieden (Konigshafen, Germany). Juvenielen van *Pygospio elegans*, *Scoloplos armiger*, *Hydrobia ulvae* en *Macoma balthica* werden door getijstroom uit het sediment gespoeld terwijl er geen effect op de dichtheid van *Capitella capitata* en de oligochaeten *Tubificoides benedii* en *T. pseudogaster* werd gevonden (Zühlke and Reise, 1994).

Kustvogels fourageren op slijkgarnalen (*Corophium*) die op hun beurt de diatomeeën matten begrazen met als resultaat dat de productie van polysachariden door diatomeeën afnam met als gevolg een afname van de sedimentstabiliteit (Daborn et al., 1993).

Figuur 22

Invloed van de dichtheid van *Macoma* en de stroomsnelheid op de sediment erosie (Widdows, 1998).



Grotere predatoren en grazers

De predatoren van de macrofauna en de grazers van de wortelstokken veroorzaken ook een aanzienlijke verstoring van het sediment. Op side-scan sonar opnames van de bodem van de Bering Zee waren 4 m lange, 2 m brede en 0.4 diepe sporen in het sediment te zien, deze werden veroorzaakt door de activiteiten van grijze walvissen (*Eschrichtius robustus*) die zich voeden met benthische amphipoden (Johnson and Nelson, 1984). Hierdoor wordt de mat die is ontstaan door de kokers van de amphipoden verstoord en neemt de invloed van de golfwerking toe. Ook werden tijdens deze tocht lange sporen van walrussen (*Odobenus rosmarus*) gevonden. Door de invloed van golfslag en toenemende erosie ontstaan in deze gebieden grote kuilen.

Pijlstaartroggen (*Dasyatis*) maken holen met een diameter van 1 m. en diepte van 30 cm. (Howard et al. 1977). Ook in de Waddenzee zijn vergelijkbare

kuilen gevonden, deze zijn gemaakt door bergeenden en eidereenden (*Tadorna tadorna*, *Somateria mollissima*, Cadée 1990). Kokmeeuwen (*Larus ridibundus*) maken op zoek naar voedsel 3 m lange, 15 cm brede en 5 cm diepe sporen in het sediment. Flamingo's (*Phoenicopterus ruber*) maken karakteristieke gaten met een diameter van 1 meter en een heuvel in het midden. De zeeotter (*Enhydra lutris*) maakt kuilen met een doorsnede van 15-45 cm en een diepte van 50 cm om schelpdieren uit te graven (Calkins, 1977). Voedsel zoekende krabben (*Cancer pagurus*) graven holen met een diameter van 50 cm (Hall et al., 1991). Plantenetters zoals sneeuwganzen, grauwe ganzen, en eenden begrazen wortelstokken en verstoren zo het sediment (Reise, 2002). Al deze voorbeelden geven aan hoe belangrijk deze predatoren en herbivoren zijn in het bewerken van het sediment.

4 Synthese van biologische stabilisatie en destabilisatie van de verschillende morfologische zones (kustzone, strand, wadplaten en kwelders) in het Nederlandse kustgebied.

.....

Kustzone

Stabiliserende effecten zijn:

- Kokerwormen vormen kokers van kalk, zand, schelpstukjes of klei. Voorbeelden uit de kustzone zijn; goudkammetje (*Pectinaria koreni*, koker-zand), *Pygospio elegans* (koker-zand), franjeworm (*Polydora ciliata*, koker-klei) en de schelpkokerworm (*Lanice conchilega*, koker-zand-en schelpfragmenten). Grote dichtheden van deze kokers reduceren de stroomsnelheid bij de bodem aanzienlijk, hierdoor wordt sediment ingevangen en veranderen fysische karakteristieken en hydrodynamische omstandigheden in deze kokervelden. Zelfs een lage dichtheid van kokers heeft een sediment stabiliserend effect.
- Door filterfeeders wordt sediment ingevangen en als pseudofaeces weer afgegeven als aaneengeklonterde deeltjes. De effecten van de aanwezigheid van aaneengesloten populaties van schelpdieren, zoals *Ensis* sp. en *Spisula subtruncata* zijn nog onbekend.
- Over de rol van algen en microbiële matten in de kustzone is niets bekend.

Destabiliserende effecten zijn:

- Gravende amphipoden *Pontocrates*, *Bathyporeia*, *Haustorius*, de isopode *Eurydice pulchra* en de polychaeten (*Arenicola marina*, *Nephtys cirrosa*) verstoren het sediment. Ook de gravende activiteiten van crustacea, zoals garnalen en krabben, evenals de bodemberoering door (juvenile) platvissen hebben een destabiliserend effect.
- Duikende zeevogels (zwarte zeeend) die in de bodem op zoek gaan naar voedsel, zoals *Spisula subtruncata*, woelen de bodem om.

Strand

Stabiliserende effecten zijn:

- Op beschutte stranden komen blauwwiermatten voor die het zand koloniseren en stabiliseren.
- Eveneens op beschutte stranden zorgt de aanwezigheid van polychaeten, zoals *Pygospio elegans* en *Arenicola marina* voor stabilisatie van het sediment. Op alle stranden komen veel individuen voor van *Scolelepis squamata*. Deze polychaet zou eenzelfde stabiliserende werking kunnen hebben.
- Het is zeker ook denkbaar dat de schelpresten van dode schelpdieren afkomstig uit de kustzone stabiliserend werken op het strand. De aanwezigheid van dit materiaal speelt zeker een rol bij de verstuiving van zand dat van invloed is op de duinvorming.
- De aanwezigheid van allerlei organisch materiaal dat zich verzamelt bij de HW-lijn als vloedmerk speelt een belangrijke rol in het vastleggen van zand en in het proces van primaire duinvorming.

Destabiliserende effecten zijn:

- Bij laag water bevindt de isopode *Eurydice pulchra* zich tot 10 cm in het zand en bij hoogwater zwemmen ze vlakbij de bodem. Het moment van ingraven en er weer uitkomen mobiliseert sediment. Dit zelfde gedrag wordt vertoond door juveniele garnalen.
- Verder wordt door graafactiviteiten van de amphipode *Bathyporeia* spp. en *Haustorius arenarius* en de wormen *Nephtys cirrosa* en

Scolecopsis squamata (gemshoornworm) die in dichtheden van duizenden per m⁻² kunnen voorkomen, het sediment omgewerkt. Ook andere polychaeten spelen een dergelijke rol, zij het in minder hoge dichtheden.

Duinen

Stabiliserende effecten zijn:

- Diep wortelende vegetatie zoals helm en biestarwegras leggen het stuivende zand vast en vergroten de stabiliteit van het duingebied.
- Bij het vastleggen van stuifkuilen in het duingebied spelen algen een grote rol.

Destabiliserende effecten zijn:

- Intensieve betreding waardoor de vegetatie wordt vernield heeft een sterk destabiliserend effect.

Wadplaten

Stabiliserende effecten zijn:

- Door het uitscheiden van extracellulaire producten door microalgen op de bodem wordt sediment vastgekit en gestabiliseerd.
- Filterfeeders zoals mosselen, oesters en kokkels vangen sedimentpartikels in en stabiliseren zo het sediment.
- Uitscheidingsproducten (mucusdraden) van kreeftachtigen (*Corophium volutator*) en wormen (*Nereis diversicolor*) stabiliseren sedimenten.
- Op mosselbanken wordt door biogene depositie van faeces sediment vastgelegd.
- Mosselbanken reduceren de golfsnelheid door de ruwe oppervlaktestructuren.

Destabiliserende effecten zijn:

- Het foerageren van vogels verstoort de bovenste sedimentlaag hierdoor erodeert het sediment.
- Gravende organismen zoals de polychaet *Heteromastus*, de tweekleppige *Macoma balthica*, het wadslakje (*Hydrobia ulvae*) en de slijkgarnaal (*Corophium volutator*) destabiliseren het sediment.

Kwelders

Stabiliserende effecten zijn:

- Kwelderplanten vooral Engels slijkgras is vanwege een dicht net van wortelstokken een belangrijke sediment stabilisator.
- De stengels van kwelderplanten reduceren ook de stroomsnelheid, waardoor het sediment bezinkt en wordt vastgelegd.

Destabiliserende effecten zijn:

- Planten eters zoals sneeuwganzen, grauwe ganzen en eenden begrazen wortelstokken van kwelderplanten en verstoren het sediment.

5 Conclusie

Organismen transformeren hun omgeving. Processen zoals stabilisatie en destabilisatie spelen hierbij een belangrijke rol. De belangrijkste biostabiliseerders zijn de suspensie feeders zoals mossels en oesters, zij vangen sediment in en vormen banken en riffen, structuren die op zich ook de stroomsnelheid reduceren. In droogvallende gebieden modifieren blauwwieren en het microphytobenthos de omgeving door het sediment direct te binden met behulp van kitstoffen, door de vorming van een stabiliserende mat wordt het sediment minder snel geërodeerd.

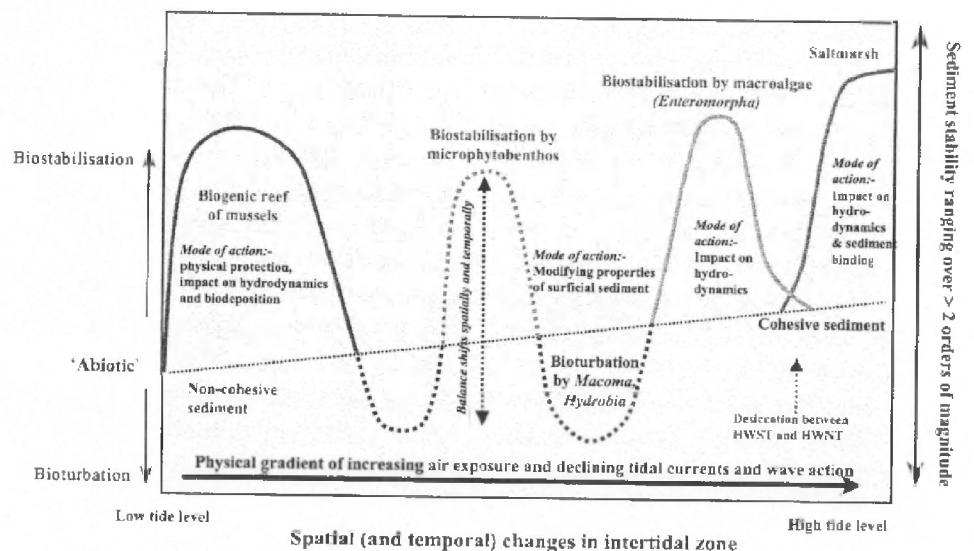
Helm en biestarwegras zijn goede stabiliseersers omdat het stuivende zand goed vastgelegd wordt. Zeegrasvelden en macroalgen reduceren de stroomsterkte. Hierdoor is sedimentatie mogelijk, neemt de dynamiek in het gebied af en ontstaan nieuwe mogelijkheden voor andere organismen. Een goed ontwikkelde kweldervegetatie vermindert lokaal de stroomsnelheid, het sediment bezinkt en wordt vastgelegd door het wortelstelsel.

In mariene sedimenten zijn de belangrijkste destabiliseerders de benthische fauna zoals grazende slakken en de gravende activiteiten van tweekleppigen, wormen, kreeftachtigen en krabben. Zij verstoren de sediment structuur. De effecten van bioturbatie zijn het sterkst in de bovenste 10 cm van het sediment (Boudreau, 1998). Het sediment wordt in verticale richting getransporteerd, hierdoor veranderen sediment eigenschappen en oppervlakte structuren. De invloed van de golfwerking op het sediment wordt sterker en de sediment erosie neemt toe.

6 Aanbevelingen

In de toekomst zijn door toenemende stormen en de zeespiegelrijzing veranderingen in de sedimentdynamiek te verwachten. Kusten worden onderworpen aan sterke fysische krachten, hun biota toont een grote overeenkomst tussen continenten en verschillende klimaatzones. Inventariseren van alle organismen, stabiliseerders en destabiliseerders, in kustgebieden wereldwijd kan verdere informatie leveren over de rol van deze organismen in erosieprocessen van de kustzone. Klimaatveranderingen hebben ook effect op het voorkomen van organismen in de kustzone, is er sprake van 'nieuwe' organismen of ontwikkelen bepaalde soorten zich massaal. Bij de restauratie van Wetlands, die in veel landen wordt uitgevoerd, is het van belang voordat de maatregelen worden uitgevoerd voorspellingen te doen over de ontwikkeling van de sediment balans en de rol van de levende natuur. Van belang is modellen te ontwikkelen voor de verschillende kustgebieden om effecten van de levende natuur op stabilisatie en destabilisatie processen te kwantificeren en effecten hiervan op het beheer van kustgebieden te inventariseren. Voor het intergetijde gebied is een beschrijvend model beschikbaar (fig.23). Dit model toont de balans tussen biostabilisatie en bioturbatie in ruimte en tijd van het intergetijde gebied. Voor andere kustzones is het noodzakelijk deze modellen te ontwikkelen zodat een duidelijk inzicht wordt verkregen in biostabilisatie en bioturbatie en het effect op eroderende processen. Misschien is het mogelijk aan de hand van deze modellen een beter inzicht te krijgen in sedimentatie en erosie processen zodat door het aanpassen van een aantal beheersmaatregelen de kosten voor het beheer van de kust gereduceerd kunnen worden.

Figuur 23
Schematische weergave van aantal biologische en fysische processen die invloed hebben op de sediment stabiliteit in een getijdegebied. Widdows, 2002.



Able K.W., Twichell D.C., Grimes C.B., Jones R.S. 1987.

Tilefish of the genus *Caulolatilus* construct burrows in the sea floor. Bull. Mar. Sci. 40: 1-10.

Anderson R.H. 1992.

Diversity of eukaryotic algae. Biodiv. Conserv. 1: 267-292.

Amtz W.E., Brey T., Gallardo V.A. 1994.

Antarctic zoobenthos. Oceanogr. Mar. Biol. ANN. Rev. 32, 241-304.

Austen I., Andersen T.J., Edolvang K. 1999.

The influence of benthic diatoms and invertebrates on the erodibility of an intertidal mudflat, the Danish Wadden Sea. Est. Coast. and Shelf Science 49(1): 99-111.

Blanchard G.F., Sauriau P.G., Cariou Le Gall V., Gouleau Garet M.J., Olivier F. 1997.

Kinetics of tidal resuspension of microbiota: testing the effects of sediment cohesiveness and bioturbation using flume experiments. Mar. Ecol. Progress Ser. 1997 151 (1-3): 17-25.

Botto F., Iribarne O. 2000.

Contrasting effects of two burrowing crabs (*Chasmagnathus granulata* and *Uca uruguayensis*) on sediment composition and transport in estuarine environments. Est. Coast. and Shelf Science 51(2): 141-151.

Bouche M.B., AlAddan F., 1997.

Earthworms, water infiltration and soil stability: Some new assessments. Soil Biology and Biochemistry mar.-apr. 29 (3-4) : 441-452.

Brey T. 1991.

Interactions in soft bottom benthic communities: Quantitative aspects of behaviour in the surface deposit feeders *Pygospio elegans* (Polychaeta) and *Macoma balthica* (Bivalve). Helgolander Meeresuntersuchungen 1991, 45 (3): 301-316.

Cadée G.C. 1990.

Feeding traces and bioturbation by birds on a tidal flat, Dutch Wadden Sea. Ichnos 1:23-30.

Cadée G. C. 2001.

Sediment dynamics by bioturbating organisms. In Ecological Studies, vol. 151. ed. K.Reise, Ecological comparisons of sedimentary Shores.

Calkins D.G. 1977.

Feeding behavior and major prey species of the sea otter, *Enhydra lutris*, in Mantague Strait, Prince William Sound, Alaska. Fish. Bull. 6:125-131.

Caline B. 1982.

Le secteur occidental de la baie du Mont-Saint-Michel. Morphologie sedimentologie et cartographie de l'estran. Documents du BRGM no 42.

Carpenter S.R., Lodge D.M. 1986.

Effects of submerged macrophytes on ecosystem processes. *Aquat. Bot.* 26:341-370.

Daborn G.R., Amos C.L., Brylinsky M., Christian H., Drapeau G., Faas R.W., Grant J., Long B., Paterson D.M. 1993.

An ecological cascade effect: Migratory birds affect stability of intertidal sediments. *Limnol. and Oceanogr.* 38(1): 225-231.

De Deckere E.M.G.T., van de Koppel J., Heip C.H.R. 2000.

The influence of *Corophium volutator* abundance on resuspension. *Hydrobiologia* 426 (1-3): 37-42.

De Jonge V.N., van Beusekom J.E.E. 1995.

Wind- and tide-induced resuspension of sediment and microphytobenthos from tidal flats in the Ems estuary. *Limnology and Oceanography*. 1995; 40 (4): 766-778.

Delgado M., de Jonge V.N., Peletier H. 1991.

Experiments on resuspension of natural microphytobenthos populations. *Mar. Biol.* 108 (2): 321-328.

Den Hartog C., Phillips R.C. 2001.

Common structures and properties of seagrass beds fringing the coasts of the world. In: Reise K. *Ecological comparisons of sedimentary shores* Springer Berlin pp 195-212.

Eckman J.E., Nowell A.R.M., Jumars P.A. 1981.

Sediment destabilisation by animal tubes. *J. Mar. Res.* Vol. 39: 361-374.

Fischer R., Oliver C.G., Reitner J. 1989.

Skeletal structure, growth and paleoecology of the patch reef-building polychaete worm *Diplochaetetes mexicanus* Wilson, 1986 from the Oligocene of Baja California (Mexico). *Geobos* 22(6):761-776.

Fowler S.W., Knauer G.A. 1986.

Role of large particles in the transport of elements and organic compounds through the oceanic water column. *Prog. Oceanogr.* 16:147-194.

Friedrichs M., Graf G., Springer B. 2000.

Skimming flow induced over a simulated polychaete tube lawn at low population densities. *MEPS* 192: 219-228.

Gerdol V., Hughes R.G. 1993.

Effect of the amphipod *Corophium volutator* on the colonisation of mud by the halophyte *Salicornia europea*. *Mar. Ecol. Progress Ser.* 1993, 97 (1): 61-69.

Grant J., Bathmann T., Mills E.L. 1986.

The interaction between benthic diatom films and sediment transport. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* Vol 23:225-238.

Grant J., Daborn G. 1994.

The effects of bioturbation on sediment transport on an intertidal mudflat. *Netherlands Journal of Sea Research.* 1994; 32 (1): 63-72.

Grant J., Gust G. 1987.

Prediction of coastal sediment stability from photopigment content of mats of purple sulphur bacteria. *Nature* Vol. 330: 244-246.

Gurney W.S.C., Lawton J.H. 1996.

The population dynamics of ecosystems engineers *Oikos* 1996; 76 (2): 273-283.

Hagmeier A., Kändler R. 1927.

Neue Untersuchungen im nordfriesischen Wattenmeer und auf den fiskalischen Austernbänken. *Wiss. Meeresunters* 16:1-90.

Hagmeier A. 1941.

Die intensive Nutzung des Nordfriesischen Wattenmeeres durch Austern- und Muschelkultur. *Z. Fisch.* 39:105-165.

Hall S.J., Basford D.J., Robertson M.R., Raffaelli D.G., Tuck I. 1999.

Patterns of recolonisation and the importance of pit digging by the crab *Cancer pagurus* in a subtidal sand habitat. *Mar. Ecol. Prog. Series* 72:93-102.

Hild A., Gunther C.P. 1999.

Ecosystem engineers: *Mytilus edulis* and *Lanice conchilega*. In: Dittmann S. The Wadden Sea ecosystem: stability properties and mechanism. 1999: 43-49.

Howard J.D., Mayou T.V., Heard R.W. 1977.

Biogenic sedimentary structures formed by rays. *J. Sed. Petrol* 47:339-346.

Johnson K.R., Nelson C.H. 1984.

Side-scan sonar assessment of Gray whale feeding in the Bering Sea. *Science* 225:1150-1152.

Klijin J.A. 1981.

Nederlandse kustduinen, geomorfologie en bodem. PUDOC Wageningen.

Lionel D., Grenz C., Plante Cuny M.R. 1996.

Experimental study of microphytobenthos resuspension *Comptes Rendus de L Academie des Sciences Series 3. Sciences de la Vie.* 1996 ; 319 (6) :529-535.

Lucas C.H., Widdows J., Brinsley M.D., Salkeld P.N., Herman P.M.J. 2000.

Benthic pelagic exchange of microalgae at a tidal flat ! Pigment analysis. *MEPS* 196:59-73.

Luckenbach M.W. 1986.

Sediment stability around animal tubes: the role of hydrodynamic processes and biotic activity. *Limnol. Oceanogr.* 31:779-787.

Madsen K.N., Nilson P., Sundback K. 1993.

The influence of benthic microalgae on the stability of a subtidal sediment. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 170(2): 159-177.

Mc Lachlan A.J.E., Dounn T.E., Wessels F. 1993.

Sandy beach macrofauna communities and their control by the physical environment: a geographical comparison. *J. Coastal Res.* 15: 27-38.

Meadows P.S., Tait J., Hussain S.A. 1990.

Effects of estuarine infauna on sediment stability and particle sedimentation. *Hydrobiologia* 190(3): 263-266.

Meadows P.S. 1991.

The environmental impact of burrows and burrowing animals, conclusions and a model. *Symp. Zool. Soc. Lond.* 63:327-338.

Meyer D.L., Townsend E.C., Thayer G.W. 1997.

Stabilization and erosion control value of oyster cultch for intertidal marsh. *Restoration Ecology*. 1997; 5 (1): 93-99.

Myrick J.L., Flessa K.W. 1996.

Bioturbation rates in Bahía la Choya, Mexico. *Cienc. Mar.* 22:23-46.

Nelson J.R., Eckman J.E., Robertson C.Y., Marinelli R.L., Jahnke R.A. 1999.

Benthic microalgal biomass and irradiance at the sea floor on the continental shelf of the South Atlantic Bight: Spatial and temporal variability and storm effects. *Continental Shelf Research Mar.* 1999;19(4):477-505.

Oost A.P. 1996.

Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian inlet : a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins. *Geologica Ultraiectiona* 126.

Palomo G., Iribarne O. 2000.

Sediment bioturbation by Polychaete feeding may promote sediment stability. *Bulletin of Marine Science* 67(1): 249-257.

Paterson D.M., Crawford R.M., Little C. 1990.

Subaerial exposure and changes in the stability of intertidal estuarine sediments. *Estuarine coastal and Shelf science* 30(6): 541-556.

Paterson D.M., Hagerthey S.E. 2001.

Biogenic stabilisation and disturbances in coastal sediments. In *Ecological Studies*, 151. K.Reise (ed), Ecological comparisons of sedimentary shores.

Peletier H., Gieskes W.W.C., Rijssel van M.

Dual effect of Mud Snails on Diatom-enhanced sediment stability (submitted)

Reichelt A.C., 1991.

Environmental effects of meiofaunal burrowing. *Symp. Zool. Soc. Lond.* 63: 33-52.

Reise K. (Ed.) 2001.

Ecological comparisons of sedimentary shores *Ecological Studies*, Vol. 151 Springer Verlag Berlin.

Reise K. 2002.

Sediment mediated species interactions in coastal waters. *Journal of Sea Research* 48(2002):127-141.

Reusch T.B.H., Chapman A.R.O. 1995.

Storm effects on eelgrass (*Zostera marina* L.) and blue mussel (*Mytilus edulis* L.) beds. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 1995; 192 (2): 257-271.

Stamhuis E.J. 1997,

Burrow architecture and turbative activity of the thalassinid shrimp *Callinassa subterranea* from the central North Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*151:155-163.

Stikvoort E., Faasse M.A., 2001.

Honingraatwormen (*Sabellaria alveolata*), *Het Zeepaard* 61(3).

Sündback K., Jonsson B., Nilsson P., Lindstrom. 1990.

Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow-water sediment system: an experimental study. *Mar. Ecol. Prog. Series*, 58:261-274.

Sutherland T.F., Grant J., Amos C.L. 1998.

The effect of carbohydrate production by the diatom *Nitzschia curvilineata* on the erodibility of sediment. *Limnology and Oceanography*. 1998; 43 (1): 65-72.

Thiebaut E., Cabioch L., Dauvin J.C., Gentil F. 1997.

Spatio temporal persistence of the *Abra alba Pectinaria koreni* muddy fine sand community of eastern Bay of Seine *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 77(4): 1165-1185.

Tolhurst T.J., Riethmuller R., Paterson D.M. 2000.

In situ versus laboratory analysis of sediment stability from intertidal mudflats. *Continental Shelf Research*, 2000; 20 (10-11): 1317-1334.

Townsend D.W., Keller M.D., Sieracki M.E., Ackleson S.G. 1992.

Spring phytoplankton blooms in the absence of vertical water column stratification. *Nature* 360: 59-62.

Underwood G.J.C., Paterson D.M. 1993.

Seasonal changes in diatom biomass, sediment stability and biogenic stabilization in the Severn Estuary. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 1993; 73 (4): 871-887.

Van Moorsel G.W.N.M., 1994. Monitoring kunstgronden Noordzee. 1993.

Rapport nr. 94.05 Bureau Waardenburg Culenburg.

Vos P.C., de Boer P.L., Misdorp R. 1988.

Sediment stabilisation by benthic diatoms in intertidal sandy shoals: quantitative and qualitative observations. In: Tide influenced sedimentary environments and facies edited by PL de Boer et al. Reidel Publishing Company, Boston pp. 511-526.

West N.E. 1990.

Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions. *Adv. Ecol. Res.* 20:180-223.

Widdows J., Brown S., Brinsley M.D., Salkeld P.N., Elliott M. 2000.

Temporal changes in intertidal sediment erodability: influence of biological and climate factors. *Con. Shelf Res.* 20 (10-11): 1275-1289.

Widdows J., Brinsley M. 2002.

Impact of biotic and abiotic processes on sediment dynamics and the consequences to the structure and functioning of the intertidal zone. *Journal of Sea Research* 48(2002): 143-156.

Widdows J., Lucas J.S., Brinsley M.D., Salkeld P.N., Staff F.J. 2002.

Investigations of the effects of current velocity on mussel feeding and mussel bed stability using an annular flume. *Helgol. Mar. Res.* 56:3-12.

Willows R., Widdows J., Wood R.G. 1998.

Influence of an infaunal bivalve on the erosion of an intertidal cohesive sediment: a flume and modeling study. *Limnol and Oceanography* 43(6): 1332-1343.

Yallop M.L., de Winder B., Paterson D.M., Stal L.J. 1994.

Comparative structure, primary production, and biogenic stabilization of cohesive and non-cohesive marine sediments inhabited by microphytobenthos. *Est. Coastal Shelf Sci.* 39:565-582.

Yamano H., Miyajima T., Koike I. 2000.

Importance of foraminifera for the formation and maintenance of a coral sand cay: Green Island, Australia. *Coral Reefs* 2000 19 (1): 51-58.

Zühlke R., Blome D., van Bernenk H., Dittmann S. 1998.

Effects of the tube-building polychaete *Lanice conchilega* (Pallas) on benthic macrofauna and nematoden in an intertidal sandflat. *Senckenbergiana Maritima* 29 (1-6): 131-138.

Zühlke R., Reise K., 1994.

Response of macrofauna to drifting tidal sediments. *Helgolander Meerenuntersuchungen* 48(2-3): 277-289.

Ziebis W., Forster S., Hüttel M., Jorgensen B.B. 1996.

Complex burrows of the mud shrimp *Callinassa truncata* and their geochemical impact in the sea bed. *Nature* 382:619-622.