



PROGRAMMA **NAAR EEN**  
**RIJKE WADDENZEE**

# MOOIWERK MOOIWAD

**Rijke Onderwaterbestortingen  
Waddenzee**



## “Rijke Onderwaterbestortingen Waddenzee”

### Contacts

**WOUTER GOTJE, JELMER  
CLEVERINGA &  
MAARTEN DE JONG**

M 06 27841177/50736850  
E [jelmer.cleveringa@arcadis.com](mailto:jelmer.cleveringa@arcadis.com)

Arcadis Nederland  
B.V.  
Postbus 137  
8000 AC Zwolle  
The Netherlands

---

### Opdrachtgever:

**PROGRAMMA NAAR EEN  
RIJKE WADDENZEE**

Het rapport “Rijke Onderwaterbestortingen Waddenzee” is uitgevoerd door Arcadis in opdracht van het Programma naar een Rijke Waddenzee (PRW).

[@rijkwaddenzee](https://twitter.com/rijkwaddenzee)

[www.rijkwaddenzee.nl](http://www.rijkwaddenzee.nl)

## Rijke Waddenzee

Het Programma naar een Rijke Waddenzee heeft Arcadis gevraagd om dit rapport te maken. De Waddenzee is namelijk een hoogdynamische gebied. Onderwater verplaatsen geulen zich. Dit heeft gevolgen. Ondermeer voor de kustveiligheid en de ligging van vaargeulen. Maar denk ook aan het toegankelijk kunnen houden van havens. Daarom zijn er op meerdere plekken onderwaterbestortingen in de Waddenzee. Zo kan er worden bijgestuurd. PRW vraagt zich af in hoeverre de maatregelen die worden genomen voor kustveiligheid en vaargeulmanagement ook kansen biedt voor de natuur? Kan het bijvoorbeeld een hard substraat (aanhechtingsplek) voor planten en dieren zijn in de Waddenzee? Zodat er een hogere biodiversiteit ontstaat? Het antwoord daarop vindt u in deze verkenning.

### Contact:

Rick Timmerman, [rick.timmerman@rws.nl](mailto:rick.timmerman@rws.nl), 06-12.80.34.40

# MOOIWERK

# MOOIWAD



# CONTENTS

<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>5</b>
1.1	Aanleiding	5
1.2	Doelstelling	5
<b>2</b>	<b>BESTORTINGEN IN WADDENZEE</b>	<b>6</b>
2.1	Hard substraat en bestortingen	6
2.2	Locaties bestortingen in de Waddenzee per kombergingsgebied	7
2.3	De doelen van bestortingen	12
2.4	Beheerder en beleid in de Waddenzee	14
<b>3</b>	<b>BESCHRIJVING ABIOTIEK WADDENZEE</b>	<b>15</b>
3.1	Waterdiepte	15
3.2	Sedimentatie & erosie	15
3.3	Saliniteit	16
3.4	Maximale stroomsnelheid & bodemschuifspanning	17
3.5	Korrelgrootte & slibgehalte in de bodem	19
3.6	Sedimentconcentratie in de waterkolom	20
3.7	Generiek denkmodel abiotiek Waddenzee	21
<b>4</b>	<b>DE ECOLOGIE IN DE WADDENZEE</b>	<b>23</b>
4.1	Beknopte beschrijving van het sublitoraal	23
4.2	Onderzoek naar ecologische waarden hard substraat in de Waddenzee	25
4.3	Aanvullende opmerkingen over de ecologische waarden van bestortingen	28
<b>5</b>	<b>STORTMATERIALEN EN ECOLOGISCHE OPTIMALISATIE</b>	<b>30</b>
5.1	Inleiding	30
5.2	Chemische samenstelling en begroeiing	31
5.3	Mogelijkheden tot optimalisatie	32
<b>6</b>	<b>KANSRIJKE OPTIES VOOR BESTORTINGEN</b>	<b>34</b>
6.1	Inleiding	34
6.2	Selectiecriteria gebieden	34
6.3	Opties voor hard substraat onderwater	35
<b>7</b>	<b>DISCUSSIE; RESULTATEN VAN DE KENNISTAFEL</b>	<b>38</b>

7.1	Wat zijn “Rijke onderwaterbestortingen”?	38
7.2	Beslisboom ten behoeve van het optimaliseren van het hard substraat	39
7.3	Locaties met hardsubstraat in de Waddenzee	41
7.4	Waarnemingen aan de biotiek	41
7.5	Abiotische factoren	41
7.6	Materialen en technieken	41
7.7	Dijkversterking Texel en Afsluitdijk	42
<b>8</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>43</b>
8.1	Conclusies	43
8.2	Aanbevelingen	45
<b>9</b>	<b>LITERATUUR</b>	<b>466</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Op verschillende plekken in de Waddenzee is onder de laagwaterlijn hard substraat aanwezig in de vorm van bestortingen met stortsteen, basaltblokken en staalslakken. Bestortingen worden op de vooroever van waterkeringen aangebracht om erosie aan de teen te voorkomen of te beperken en om de stabiliteit te garanderen. Onderwater bestortingen worden ook ingezet om erosie door geulmigratie tegen te gaan, als getijdegeulen te dicht het voorland naderen en de stabiliteit van het dijklichaam bedreigen.

Hard substraat heeft specifieke ecologische waarden, onder andere omdat het vestigingsmogelijkheden biedt voor organismen die zich niet op de zand- en slibbodems in de Waddenzee kunnen vestigen. Hierbij kan onder andere gedacht worden aan de aanwezigheid van, zeeanemonen, zeesterren, mosdieren, zeenaaktslakken, zeepokken, hydropoliepen en wieren. Ook bieden dergelijke structuren habitat aan wormen, kreeftachtigen en vissen. Enkele vissoorten gebruiken hard substraat tevens als paaiplaatsen.

De abiotische omstandigheden bij het harde substraat verschillen per locaties in de Waddenzee. Zo zijn bij de koppen van de Waddeneilanden en de Kop van Noord-Holland de stroomsnelheden hoog en de slibconcentraties relatief laag. Achter in de getijdebekkens, bijvoorbeeld in de omgeving van Lauwersoog en Harlingen, worden juist hoge concentraties slib aangetroffen. Door verschillen in abiotische omstandigheden zullen de ecologische waarden op hard substraat naar verwachting ook anders zijn.

In Zeeland is en wordt er gezocht naar ecologisch rijkere bestortingen en waarschijnlijk is dat ook mogelijk in de Waddenzee. Optimalisaties in het ontwerp van onderwaterbestortingen zijn afhankelijk van de specifieke condities ter plaatse. Voor de Waddenzee is al breed gekeken naar de mogelijkheden om met hard substraat specifieke natuurwaarden te versterken. Hierbij zijn alle mogelijke locaties beschouwd, met inbegrip van de droogvallende delen van het wad en de zeedijken. Het voorliggende rapport heeft betrekking op bestortingen die altijd onder water liggen. De brede vraag vanuit het Programma naar een Rijke Waddenzee (PRW) is daarbij welke rollen onderwaterbestortingen vervullen voor natuur en beheer en of deze rollen kunnen worden geoptimaliseerd.

## 1.2 Doelstelling

Vanuit het Programma naar een Rijke Waddenzee is er behoefte aan een verkenning “Rijke onderwater bestortingen”, waarin:

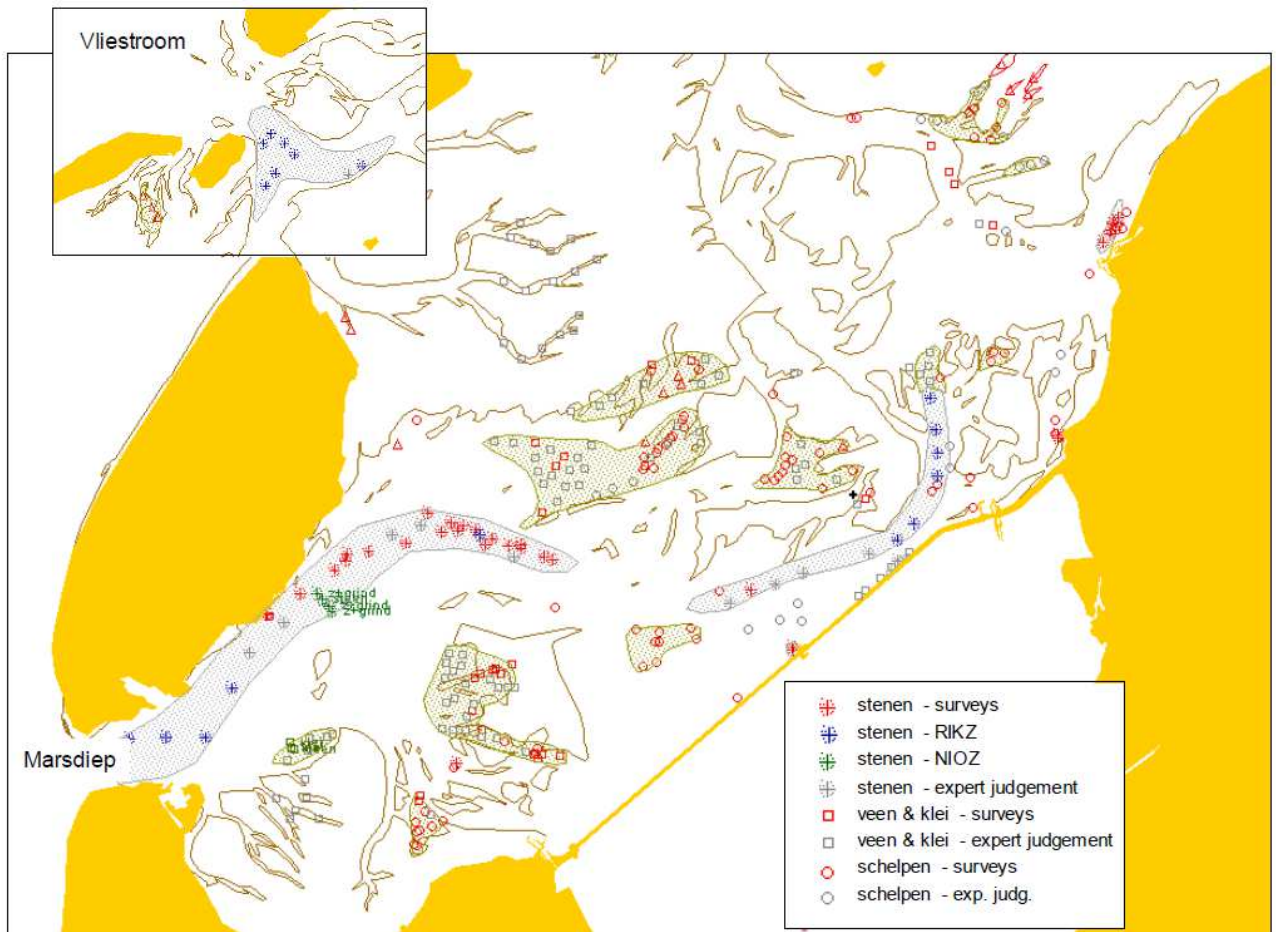
- Een overzicht wordt gegeven van de locaties in de Waddenzee waar bestortingen aanwezig zijn, met indien beschikbaar informatie over het waarom, wanneer en waarmee van de bestortingen, de frequentie van herstelwerkzaamheden en de eigenaar/beheerder.
- Een kenschets van de abiotische factoren ter plaatse van de bestortingen.
- Een kenschets van de ecologische waarden van de bestortingen, gebaseerd op studies in Zeeland en de Waddenzee.
- Mogelijkheden voor een optimalisatie van onderwater bestortingen.
- Criteria voor de afweging van de locaties van bestortingen.
- Kansrijke opties voor bestortingen in de Waddenzee.

Dit zijn de doelstellingen vanuit PRW voor dit rapport.

# 2 Bestorpingen in Waddenzee

## 2.1 Hard substraat en bestorpingen

Hard substraat is de verzamelterm voor alle substraten in de Waddenzee die geen zand of slib zijn (Bouma e.a., 2005). Hard substraat omvat door mensen aangebracht materiaal en natuurlijk hardsubstraat, dat bestaat uit veenlagen en schelpenbanken. Op sommige plekken in de Waddenzee vormen stenen, die bloot gespoeld zijn uit de keileem ook een natuurlijke hard substraat. Ens et al. (2007) geven een overzicht van deze locaties in de Westelijke Waddenzee (figuur 2.1).

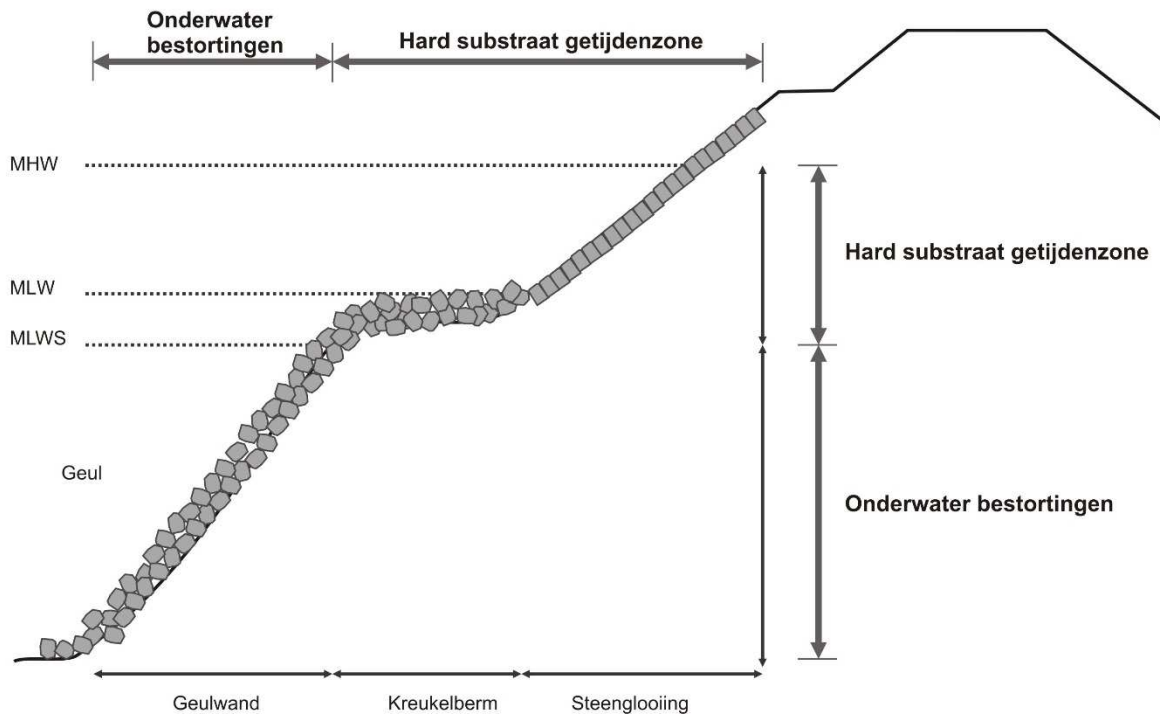


Figuur 2.1 Verschillende typen natuurlijk hard substraat in de Westelijke Waddenzee (Ens et al., 2007).

Het hardsubstraat dat door mensen is aangebracht omvat allerlei soorten natuursteen, beton en slakken, maar ook palenrijen en stalen constructies voor bijvoorbeeld havens.

In dit rapport worden deze onderwater bestorpingen beschouwd. Bestorpingen zijn door mensen aangebracht hard substraat, onder het niveau van laagwater, zoals schematisch weergegeven in figuur 2.2. In wezen is het een dubbel om te spreken van onderwater bestorpingen, omdat bestorpingen per definitie onderwater worden aangebracht. Om misverstanden te voorkomen wordt in dit rapport gesproken over onderwaterbestorpingen, om het contrast met hard substraat boven water te voorkomen. Hard substraat in de getijdzone wordt in dit rapport niet beschouwd.

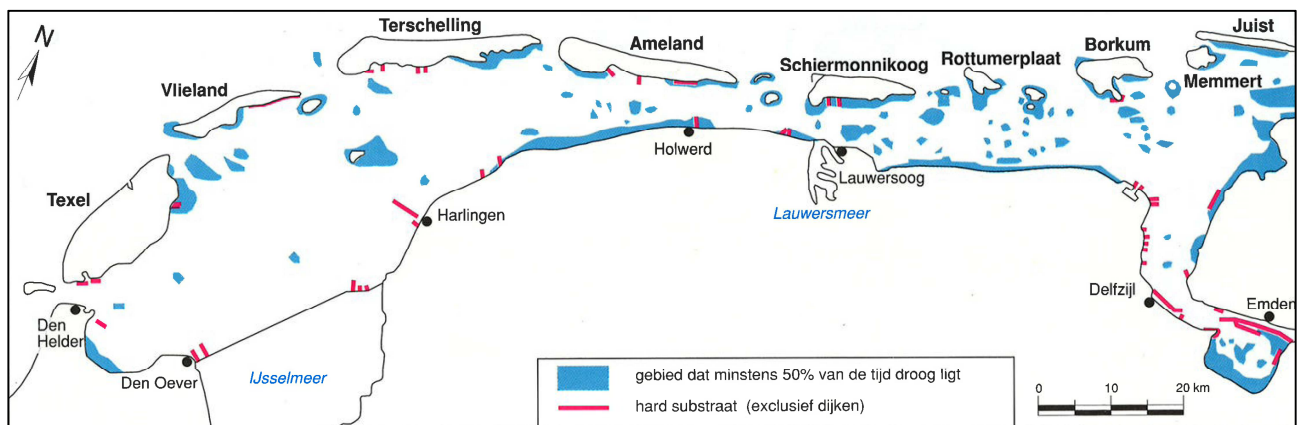
Type 1



Figuur 2.2 Schematische weergave van hard substraat in dwarsdoorsnede van dijk en geul (naar Meijer & Waardenburg 2002 in Bouma et al., 2005).

## 2.2 Locaties bestortingen in de Waddenzee per kombergingsgebied

In de Waddenzee is een verscheidenheid aan kunstmatige harde substraten aanwezig. Locaties met kunstmatig hard substraat in de Waddenzee zijn weergegeven in de Wadatlas van 1989 (zonder de dijken) (figuur 2.3). Met als basis deze kaart, en in combinatie met recente opnamen van de bodemligging, luchtfoto's en rapporten, is het overzicht uitgebreid. Hierbij zijn alleen die locaties beschouwd waar tenminste een deel van het hardsubstraat ook tijdens laagwater daadwerkelijk onder water ligt.



Figuur 2.3 Hard substraat exclusief dijken in de Waddenzee anno 1989 (V&W, 1989).



In tabel 2.1 volgt een opsomming van de locaties en toekomstige locaties met bestortingen, de periode van uitvoering, het gebruikte materiaal en de beheerders. De locaties zijn weergegeven per kombergingsgebied van west naar oost. De informatie in de kolom 'Beheerder' bevat mogelijk onvolkomenheden. Zeker in situaties met gebruikers, beheerders en eigenaren naast elkaar, zoals bij verschillende havens het geval is, is voor de situatie onderwater niet altijd duidelijk welke beheerder(s) daarbij hoort (horen).

Tabel 2.1 Locaties hard substraat in de Waddenzee per kombergingsgebied (zie ook figuur 2.4).

Locatie	Materiaal	Aanlegperiode & onderhoud	Beheerder
<b>Kombergingsgebied Marsdiep</b>			
<b>1. Omgeving Texel zuid</b>			
"Stuifdijk" ten zuidwesten Mokbaai	Stortsteen	? In ieder geval jaren '30, '40 en '50 van de 20 <sup>ste</sup> eeuw	?
Mokbaai – Dijk	Stortsteen (deels ingebed in zand)		In 2006 van RWS HHNK
Mokbaai – Marine haven	o.a. Stortsteen	Regulier onderhoud	Defensie
Havenhoofd TESO	Stortsteen		HHNK
Veerhaven Texel	Stortsteen, veel opwoelen door veerboot en onderhoudsbaggerwerkzaamheden (ploegen)	Regulier onderhoud	Rijkswaterstaat
Inlaagdijk 't Horntje, sectie 10 (HHNK, 2015a)	Stortsteen	Na 2016 HWBP <sup>1</sup> dijkversterking, aansluiting op Prins Hendrikzanddijk (nog nader in te vullen)	HHNK
NIOZ haven	Stortsteen	2014-2015 Kade verlening en renovatie steigers	Gemeente Texel / NIOZ
<b>2. Waddenzeedijk Texel zuidoost</b>			
Westdijk, sectie 8 (HHNK, 2015b)	Stortsteen	Na 2016 HWBP dijkversterking	HHNK

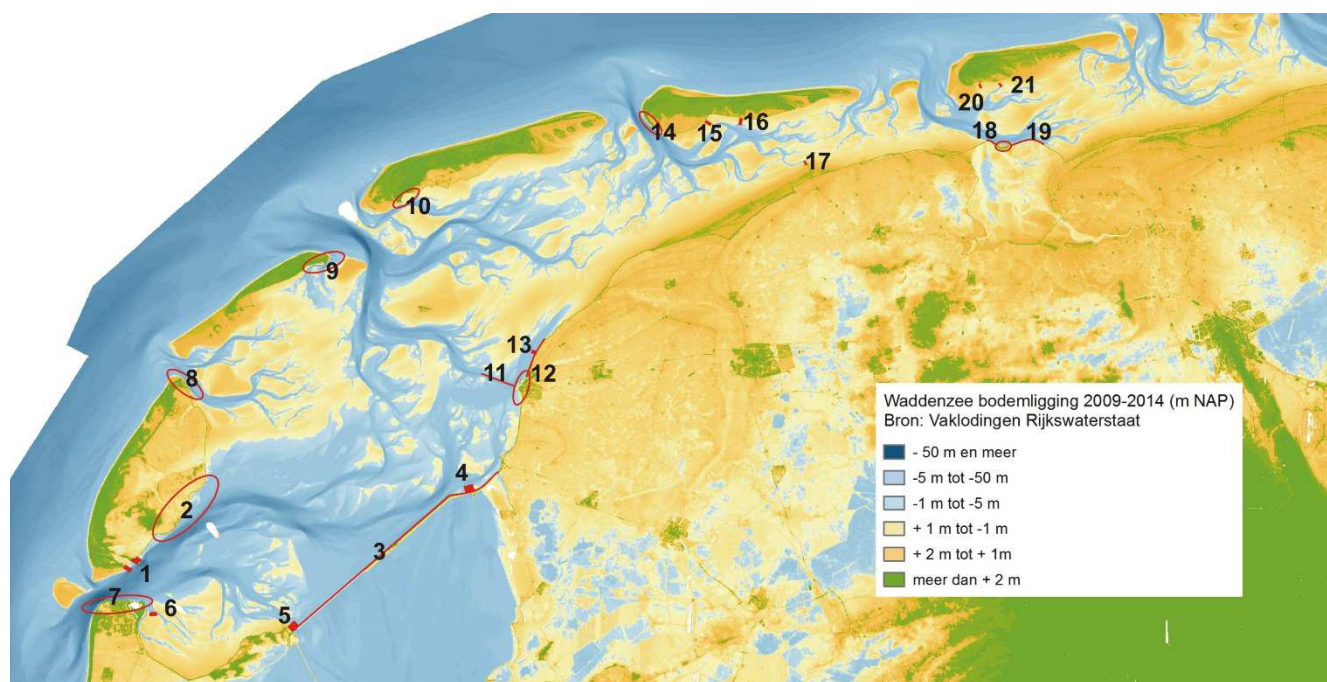
<sup>1</sup> Het HWBP is het hoogwaterbeschermingsprogramma, dit is het programma van waaruit de noodzakelijke versterkingen van de primaire waterkeringen in Nederland worden gefinancierd.

Locatie	Materiaal	Aanlegperiode & onderhoud	Beheerder
Zeedijk Oudeschild (7a,b) (HHNK, 2015a)	Stortsteen	Na 2016 HWBP dijkversterking	HHNK
Havendammen Oudeschild Waddenhaven, Sectie 7d	Stortsteen	Na 2016 Onderhoud havendammen aan binnen- en buitenzijde	HHNK
Haven Oudeschild, Zuiderhaven, Werkhaven, sectie 7d	Stortsteen	Na 2016 Onderhoud havendammen aan binnen- en buitenzijde	HHNK
Museumdijk of oude Zuiderzeedijk, buiten Waddenzeedijk	Basaltblokken, steiler dan de moderne dijken	-	HHNK
Zeedijk van het Noorden	Stortsteen	Na 2016 HWBP dijkversterking	HHNK
Zeedijk van het Oosten	Stortsteen	Na 2016 HWBP dijkversterking	HHNK
Oostdijk (4a,c,d), "Lancasterdijk"	Stortsteen	Na 2016 HWBP dijkversterking	HHNK
<b>3. Afsluitdijk</b>	Stortsteen	Sinds 1932 Versterking vanaf 2018	Rijkswaterstaat
<b>4. Sluiscomplex Kornwerderzand</b>			
Spuisluizen en scheepvaartsluizen Kornwerderzand, met geleidedammen	Stortsteen	Aanleg in de jaren '30 van 20 <sup>ste</sup> eeuw, Onderhoud dammen aan binnen- en buitenzijde	Rijkswaterstaat & Provincie Fryslân
Aanleg vismigratierivier		Vanaf 2017 aanleg vismigratie rivier	De Nieuwe Afsluitdijk
<b>5. Omgeving Den oever</b>			
Spuisluizen en scheepvaartsluizen Den oever, met geleidedammen	Stortsteen	Aanleg in de jaren '30 van 20 <sup>ste</sup> eeuw, Onderhoud dammen aan binnen- en	Rijkswaterstaat & Provincie Noord-Holland

Locatie	Materiaal	Aanlegperiode & onderhoud	Beheerder
		buitenzijde	
Haven Den Oever met havendammen	Stortsteen	In 2017-2019 versterkings werkzaamheden, niet met bestorting onderwater	HHNK
<b>6. Napoleondam Balgzand</b>	Stortsteen	Sinds 1785, kruin 0.5 m boven NAP, geen functie meer.	Geen beheerder en functie meer
<b>7. Omgeving Den helder</b>			
Noorzeedijk Den Helder	Stortsteen	Groot herstel 1980, na 2020 zwaardere steenbestorting, 1 m verhoging	HHNK
Havens Den helder	Stortsteen		Havenbedrijf Den helder & Defensie
<b>Kombergingsgebied Eijerlandse gat</b>			
<b>8. Noordzijde Texel:</b> Bestorting en strekdammen	Stortsteen		Rijkswaterstaat -> HHNK
<b>Kombergingsgebied Zeegat van het Vlie</b>			
<b>9. Oostzijde Vlieland</b>			
Oost-Vlieland (Prakken, A., van den Heuvel, 2008)	(Verlengde) strekdammen en geulwandverdediging <sup>1</sup> met staalslakken en stortsteen (breuksteen)	In 2008 herstelwerkzaamheden, 530 m, 150.000 ton staalslakken, verlengd in 1998, veel eerder aangelegd (voor WO II)	RWS
Jachthaven met havendammen	Stortsteen	Recent uitgebreid, veel eerder aangelegd (voor WO II)	Gemeente Vlieland
Strekdammen Vliesloot	Stortsteen	?, aangelegd (voor WO II)	

Locatie	Materiaal	Aanlegperiode & onderhoud	Beheerder
<b>10. West-Terschelling:</b> Havens Terschelling, met havendammen	Havendammen met stortsteen		Gemeente Terschelling
<b>11. Pollendam</b>	Staalslakken en afdeklaag van stortsteen gebuikt over 800 m	Aangelegd in 1874, versterkt in 1995, infrequent onderhoud	RWS
<b>12. Harlingen:</b> Havens en havendammen	Ongeveer 1 km aan stortsteen	2014	Gemeente Harlingen naar Wetterskip Fryslân
<b>13. Kimstergat :</b> Dijkteen Waddenzeedijk Harlingen – Roptazijl & Uitwateringsluis Roptazijl	Stortsteen	> 2 eeuwen	
<b><i>Kombergingsgebied Zeegat van Ameland</i></b>			
<b>14. Ameland Zuidwest</b>			
Ameland Zuid west	Zinkstukken met basaltblokken		RWS
Ameland Zuid west, parallel dam	Stortsteen	1990, bescherming van de kwelder aan de teen van de dijk	RWS
<b>15. Ballumerbocht</b> (RWS, 1982)	Langsdam, Koperslakblokken op mijnsteen	1982	RWS
<b>16. Veerhaven Ameland</b>	Damwanden	Verlengd in de jaren '60; 2016 vervanging damwanden.	RWS
<b>17. Veerhaven Holwerd</b>	damwanden		RWS
<b><i>Kombergingsgebied Friesche Zeegat</i></b>			
<b>18. en 19 Lauwerszeedijk</b>			
Zeedijk en Sluiscomplex	Stortsteen	1969	Wetterskip Fryslân
Havencomplex Lauwersoog, inclusief veerhaven	Stortsteen, kadewanden	1969	Havenbedrijf
Vierhuizergat	I.v.m. landwaarts gerichte	2012, 900 m	Waterschap Noorderzijlvest

Locatie	Materiaal	Aanlegperiode & onderhoud	Beheerder
	geulverplaatsing <sup>1</sup> , onderwatertalud, helling met zandkern en bekleding van staalslakken, teenbestorting met stortsteen, bodembekleding met staalslakken en afdeklaag zand. De geul is noordwaarts verbreed.		(dijk) / RWS (geul)
20. Schiermonnikoog, Jachthaven	Stortsteen, kadewanden		Gemeente Schiermonnikoog
21. Schiermonnikoog, Veerhaven	Stortsteen, kadewanden	2006	Rijkswaterstaat



Figuur 2.4 Kaart met de locaties van bestortingen in de Waddenzee, zoals opgenomen in tabel 2.1.

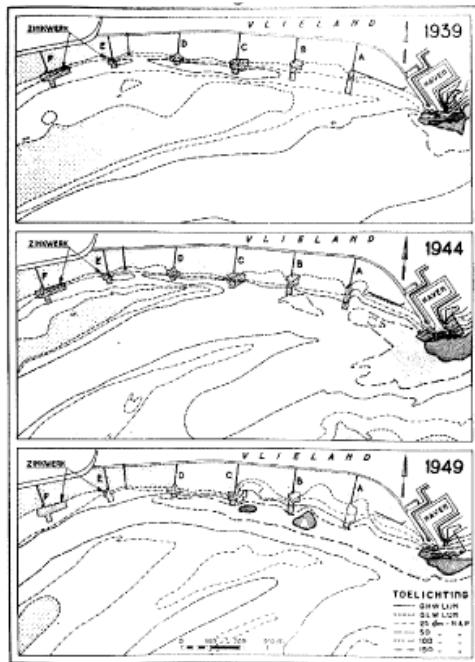
## 2.3 De doelen van bestortingen

Bestortingen zijn met verschillende doeleinden aangebracht in de Waddenzee. Hieronder zijn vijf hoofdgroepen opgenomen van doelen.

### A. Tegengaan van geulmigratie

Landwaartse verplaatsing van een getijdegeul leveren op verschillende plekken bedreigingen op voor de functies op het land, met inbegrip van de waterkering. Op dit soort plekken was en is het aanleggen van bestortingen, veelal in combinatie met de bouw van strekdammen de methode om verdere migratie tegen te gaan. Voorbeelden

hiervan zijn de bestortingen bij Den Helder, bij de noordzijde van Texel, bij Vliesloot (zie figuur 2.5) op Vlieland en aan de westzijde van Ameland.



Figuur 2.5 Verplaatsing van de Vlieslout bij Vleiland 1939-1949 (Van Bendegom, 1949).

### B. Stabilisatie van de waterkering

Stabilisatie van de waterkering heeft betrekking op de helling van de onderwateroever voor een dijk of ander waterkeringselement. Als de helling te steil is, dan bestaat de kans op instabiliteit, zodat de waterkering kan beschadigen of zelf bezwijken. Vanuit de toetsing van de waterkering zijn duidelijke criteria beschikbaar om vast te stellen of de onderwateroever te steil is en maatregelen moeten worden getroffen. Maatregelen bestaan het vastleggen (stabiliseren) van de onderwateroever door het aanbrengen van een bestorting op de gehele geulwand. Een voorbeeld hiervan zijn de bestortingen die zijn uitgevoerd bij het Vierhuizergat.

### C. Havendammen

Havendammen zijn bedoeld voor het scheepvaartverkeer naar en uit de haven en binnen de haven. De functie van de dammen verschilt per haven en is afhankelijk van de lokale golven en het getij en in sommige gevallen ook van het spuiregime vanuit het achterland. In sommige gevallen dienen dammen binnen de haven om havens met verschillende functies te scheiden. Soms is er sprake van havendammen met een bijzonder functie, zoals bij West-Terschelling, waar een deel van de dammen zo is aangelegd dat een bekken ontstond dat als spuikom diende.

### D. Stroomgeleiding

In enkele gevallen, zoals bij de Pollendam, is een dam aangelegd om de stroom te geleiden. Met de stroomgeleiding door de Pollendam werd beoogd om de vaarweg in stand te houden en voor de scheepvaart hinderlijke dwarsstroming te beperken.

### E. Afsluiting & landaanwinning

De Afsluitdijk en de Lauwerszeedijk zijn aangelegd voor het afsluiting van respectievelijk de Zuiderzee en de Lauwerszee. Na de Afsluiting zijn beide dammen gaan fungeren als waterkering. De Napoleonsdam op het Balgzand is aangelegd ter voorbereiding van verdere landaanwinning bij de Kop van Noord-Holland. Omdat deze landaanwinning nooit heeft plaatsgevonden, ligt deze dam nu onbeheerd in de Waddenzee.

In sommige gevallen heeft een verschuiving plaatsgevonden van het ene doel naar het andere doel. Dit is bijvoorbeeld gebeurd bij bestortingen die in eerste instantie bedoeld waren om de verplaatsing van een geul tegen te gaan. Na het stoppen van de geulverplaatsing door het aanbrengen van de bestorting vindt vrijwel altijd een verdieping (ontgronding) plaats aan de teen van de bestorting. Het kan daardoor nodig worden om verder te bestorten om de stabiliteit van de onderwateroever te garanderen.

De aanleg van bestortingen heeft in veel gevallen over een lange periode (tientallen jaren) plaatsgevonden. Bij de eerste aanleg werd al rekening gehouden met de erosie (ontgronding) die rondom de bestorting zou gaan plaatsvinden. Naarmate deze erosie verder voortschreed werd bijgestort, zodat gaandeweg een steeds groter gebied wordt bestort. Deze wijze van aanleg wordt wel uitgestelde aanleg genoemd. Het maakt het lastig om vast te stellen wanneer nog sprake was van aanleg en wanneer tot onderhoud werd overgegaan.

## 2.4 Beheerder en beleid in de Waddenzee

De beheerders van de bestortingen zijn:

- Rijkswaterstaat<sup>2</sup>;
- Gemeenten en havenbedrijven;
- Waterschappen (Wetterskip Fryslân, Noorderzijlvest) en Hoogheemraadschap (Hoogeheemraadschap Hollands Noorderkwartier);
- Defensie.

Het is niet altijd duidelijk welke partij de beheerder is van onderwater bestortingen. In sommige gevallen is het beheer van de ene naar de andere partij overgegaan.

Het blijkt lastig om de gegevens over bestortingen (materiaal, areaal,...) boven water te krijgen. Hiervoor is een combinatie van oorzaken aan te wijzen. Bestortingen zijn in de loop van de tijd zijn aangebracht, uitgebreid en gerepareerd. In veel gevallen heeft dit enkele tientallen jaren in beslag genomen, in het geval van Den Helder omvatten de bestortingen tenminste twee eeuwen aan beheer. Dat heeft in veel gevallen een patchwork van opgeleverd van verschillende typen bestorting. Monitoring (side-scan sonar) + duiker inspectie) is eigenlijk de enige manier om daar inzicht in te krijgen.

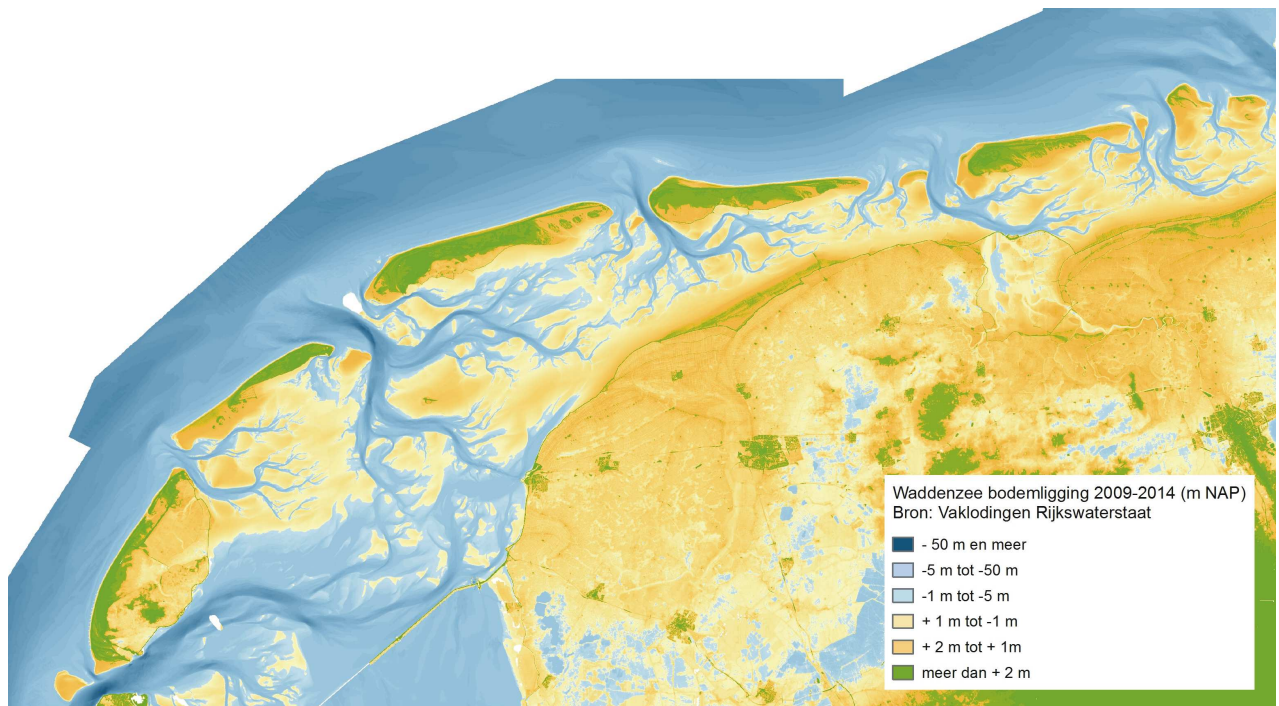
---

<sup>2</sup> Er zijn of waren tenminste drie verschillende diensten bij Rijkswaterstaat verantwoordelijk voor de bestortingen in het Waddengebied. Vanwege de verschillende regio's en beheertaken is van oudsher informatie over Texel te vinden bij Dienst West-Nedeland Noord, informatie over de Afsluitdijk bij Dienst Midden-Nederland (IJsselmeergebied) en informatie over de eilanden (Vlieland, Ameland) en de veersteigers bij Noord-Nederland (district Wadden).

# 3 Beschrijving abiotiek Waddenzee

## 3.1 Waterdiepte

Aan de noord- en westkant wordt de Waddenzee begrensd door de Waddeneilanden en zeegaten. Aan de zuidkant is de begrenzing het vasteland en de Afsluitdijk. Vanwege de Waddeneilanden is de Waddenzee een redelijk beschermd en dynamisch systeem met zand- en slibplaten en geulen. Het westelijke deel van de Waddenzee heeft in tegenstelling tot het oostelijke deel relatief weinig droogvallende wadplaten (figuur 3.1).



Figuur 3.1 Waterdiepte t.o.v. NAP (m) met verscheidene locaties met hard substraat zoals de Afsluitdijk, de Pollendam en de Napoleondam.

De waterdiepte is voor een deel bepalend wat er aan begroeiing aanwezig is op harde substraten. Hoe ondieper hoe groter de kans op het voorkomen van wieren, al is in dat geval het doorzicht van het zeewater ook van belang.

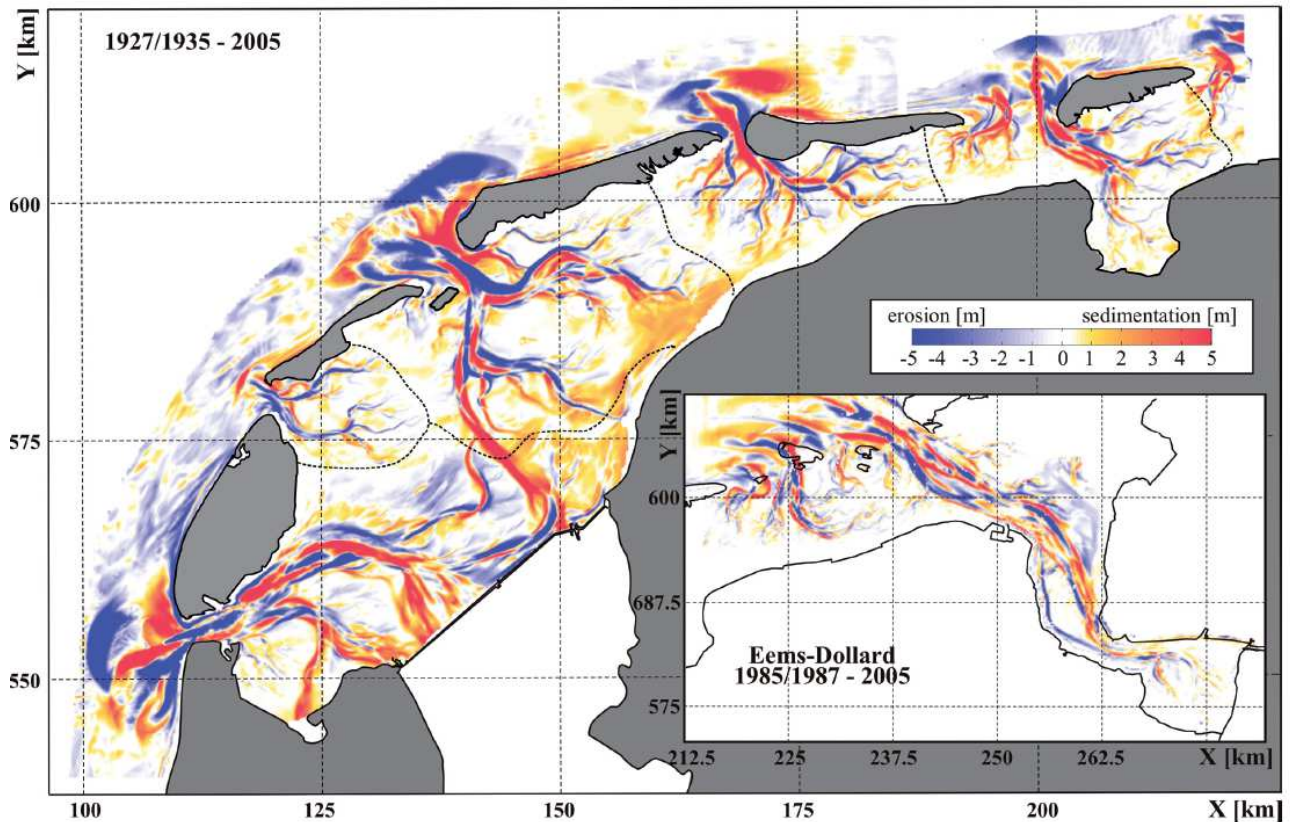
## 3.2 Sedimentatie & erosie

Naast waterdiepte zijn de sedimentatie en erosie van belang voor het ecologisch potentieel van hard substraat. In gebieden waar structurele sedimentatie optreedt zal het aanwezige harde substraat worden afgedekt met sediment. Het harde substraat als zodanig is dan vervangen door zacht substraat.

Grootschalige veranderingen in stromingspatronen en daaruit volgende veranderingen in morfologie en bathymetrie traden op na de aanleg van de Afsluitdijk (1932) en de aanleg van de Lauwersmeerdijk (1969). Aan de westkant nabij de Afsluitdijk vindt in een groot deel van het gebied sedimentatie plaats, evenals bij een groot deel van de kust van het Friese vasteland (figuur 3.2). De sedimentatie bij de kust van het Friese vasteland heeft er toe geleid dat de aanwezige strekdammen tegenwoordig niet meer tot in de getijgeul reiken, maar dat deze geheel omringd zijn door wadplaat.



Voor bestortingen kan kleinschalige erosie en sedimentatie, die optreedt bij de verplaatsing en verdieping dan wel opvulling van getijdegeulen minstens zo belangrijk zijn als de grootschalige patronen van sedimentatie en erosie. Relatief kleinschalige erosie, met een schaal van tientallen meters tot een of enkele kilometers kan de aanleiding zijn voor het uitvoeren van bestortingen. Dit was bijvoorbeeld het geval bij de Vliesloot en het Vierhuizergat. Sedimentatie met een vergelijkbare omvang kan er toe leiden bestortingen bedekt worden met sediment. Een dergelijke ontwikkeling heeft zich bijvoorbeeld voorgedaan bij de zuidwestkust van Ameland, waar de in de jaren '90 aangebrachte bestortingen in de jaren daarna zijn bedekt met zand dat afkomstig was van de aangelande zandplaat Bornrif (Cleveringa e.a., 2005).



Figuur 3.2 Sedimentatie-erosie kaart over de periode 1927-1935 tot 2005 in de Waddenzee en Eems-Dollard (1985-1987 tot 2005) (Elias et al., 2012).

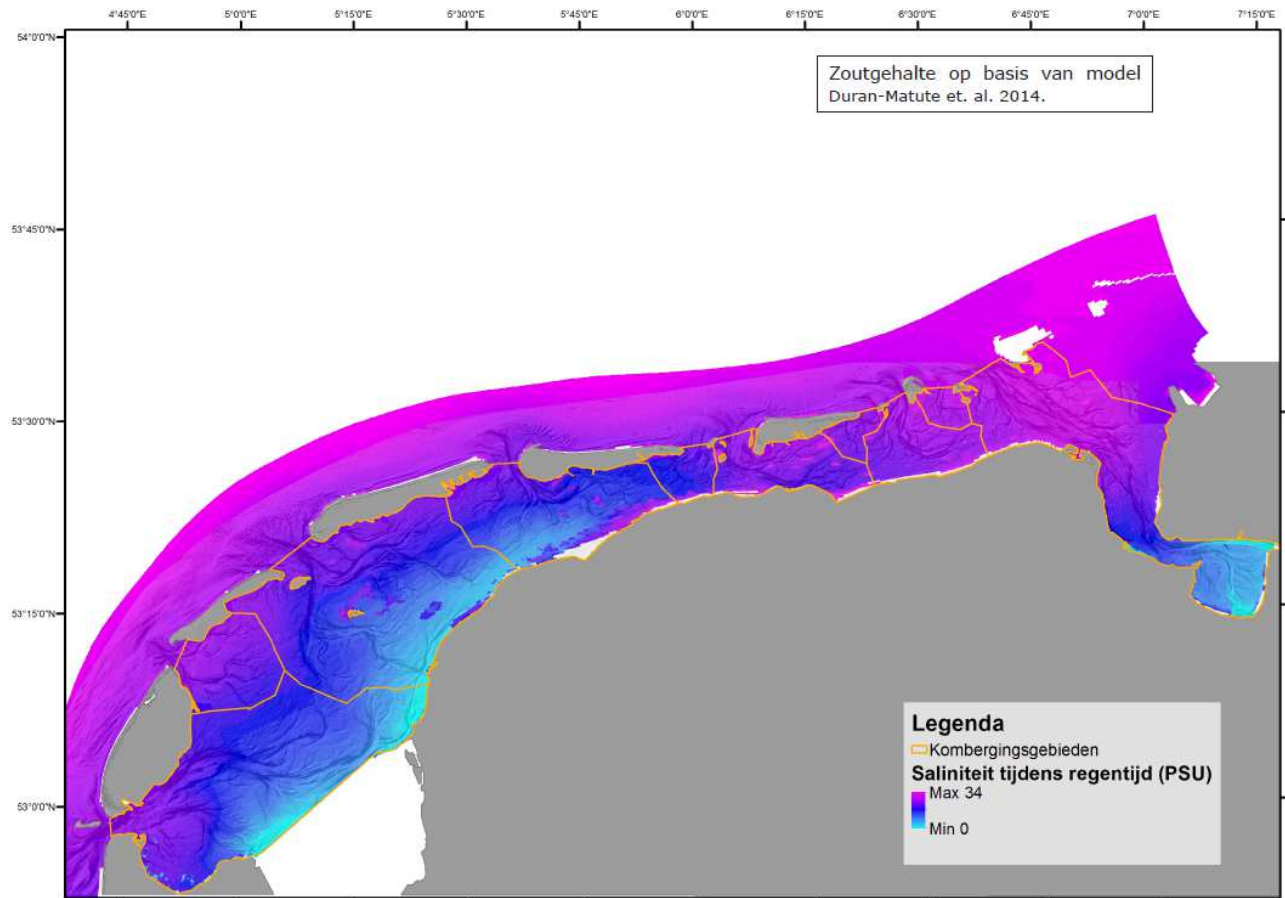
### 3.3 Saliniteit

De saliniteit vertoont in de Waddenzee een sterke gradiënt van waarden rond de 34 psu in de zeegaten, naar de lozingspunten voor zoetwater bij het vasteland waar het zoutgehalte lokaal daalt tot 10 psu (figuur 3.3). De belangrijkste lozingspunten van zoetwater zijn de beide sluiscomplexen in de Afsluitdijk (4 en 5 in figuur 2.4) en het sluiscomplex in de Lauwerszeedijk (18 in figuur 2.4). De laagste saliniteiten worden aangetroffen in het zuidwestelijke deel van de Waddenzee bij de sluiscomplexen in de Afsluitdijk.

In de tijd varieert de saliniteit in de Waddenzee sterk, onder andere omdat het volume water dat wordt gespuid sterk afhankelijk is van het waterpeil in het IJsselmeer, Lauwersmeer en de aangrenzende boezems. De saliniteit in de Waddenzee varieert ook door regen, verdamping en bevroering op het wad.

Voor de onderwater bestortingen is verder van belang dat de saliniteit niet alleen in het platte vlak varieert, maar ook met de diepte. Het gespuid zoete water is lichter dan het zoute Noordzeewater en drijft daarop. De menging van zoet- en zoutwater door de (getijde-)stroming gaat niet heel snel, zodat in de getijdegeulen sprake kan zijn van zout water in de diepe delen met een zoete bovenlaag

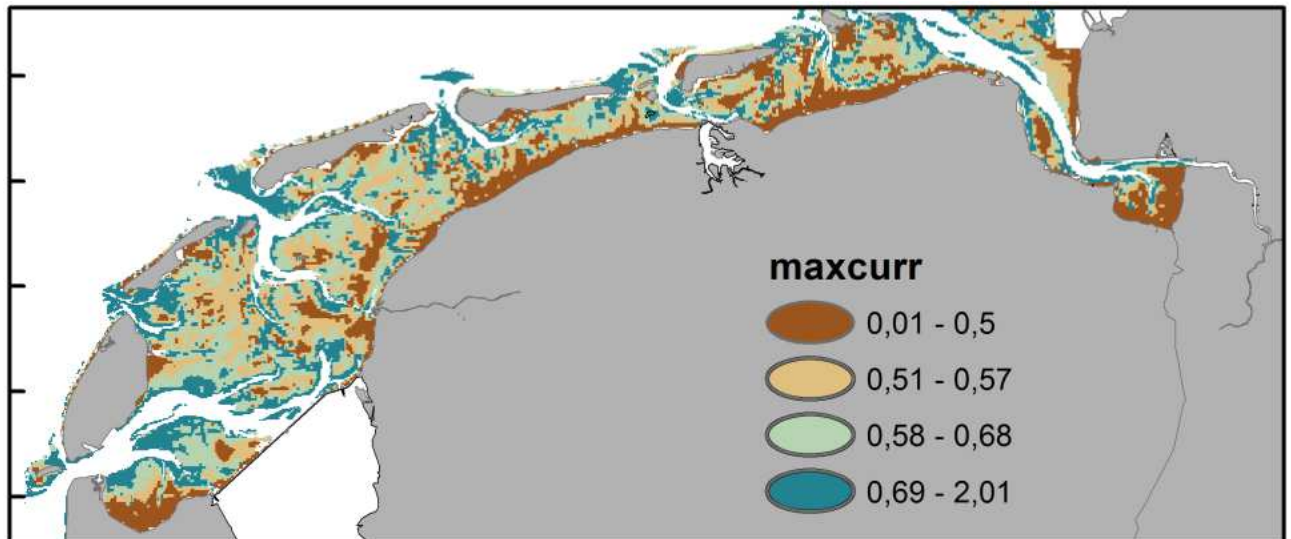
Het zoutgehalte beïnvloedt de soortenrijkdom. De relatie tussen soortenrijkdom en saliniteit kan worden beschreven met de curve van Remane (1971). De hoogste soortenrijkdom is te verwachten in zoet water en zout water en de laagste bij 5 psu.



Figuur 3.3 Zoutgehalte aan de oppervlakte tijdens regenperiode in PSU (Christianen et al., 2015; Duran-Matute et al., 2014).

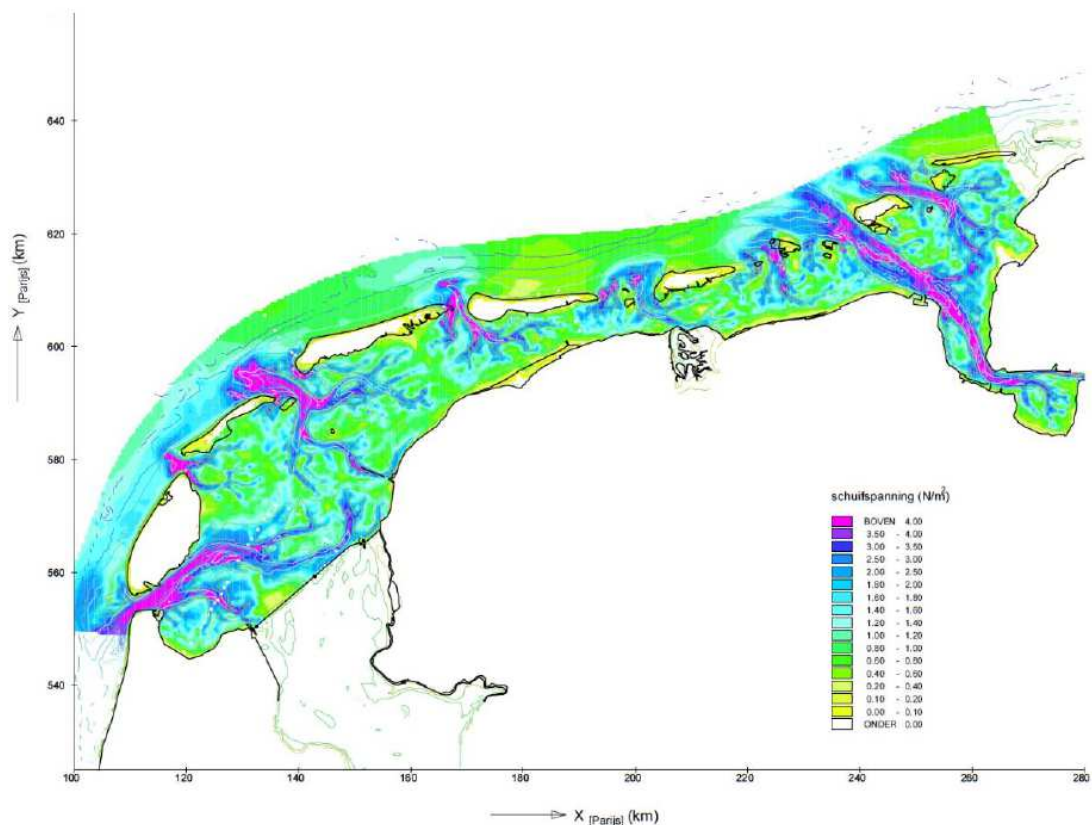
### 3.4 Maximale stroomsnelheid & bodemschuifspanning

De maximale stroomsnelheden (ongeacht of deze door de vloed- of de ebstroom worden veroorzaakt) zijn op verschillende manieren belangrijk voor de condities in en rond onderwater bestortingen. De maximale stroomsnelheden bepalen de verversing van het water langs en waarschijnlijk ook tussen de stenen. Hoge stroomsnelheden oefenen meer kracht uit op de organismen dan lage stroomsnelheden. Verder wordt het type en de hoeveelheid sediment in de waterkolom medebepaald door de stroomsnelheid. De hoogste stroomsnelheden in de Waddenzee treden op in de grote geulen in de zeegaten (zie figuur 3.4, Compton et al., 2013). In de kleinere geulen, achterin de kobergingsgebieden zijn de maximale stroomsnelheden lager. De maximale stroomsnelheden in de zeegaten Marsdiep, Vlie en het Ranselgat zijn respectievelijk 2.3, 1.9 en 1.8 m s<sup>-1</sup> (V&W, 1989).



Figuur 3.4 Maximale stroomsnelheid ( $m s^{-1}$ ) over de periode 13–15 Februari 1989 (Compton et al., 2013).

Een andere manier om de kracht van het stromende water inzichtelijk te maken is het gebruik van de bodemschuifspanning. Bodemschuifspanning is de kracht van stromend water per oppervlakte-eenheid zeebodem ( $N m^{-2}$ ) en deze is een functie van de waterdiepte, stroomsnelheid en de bodemruwheid. De bodemruwheid in zachte bodems wordt bepaald door de mediane korrelgrootte van het sediment en bodempatronen zoals zandgolven en ribbels. Rond bestortingen spelen kenmerken van het kunstmatige bodemmateriaal en de vorm en omvang van de harde structuren een rol. In figuur 3.5 is de kaart weergegeven met de bodemschuifspanning in de Waddenzee. De hoogste waarden voor bodemschuifspanning treden op in de getijgeulen met maximum waarden in de zeegaten, zoals het Marsdiep, Vlie en het Ranselgat.



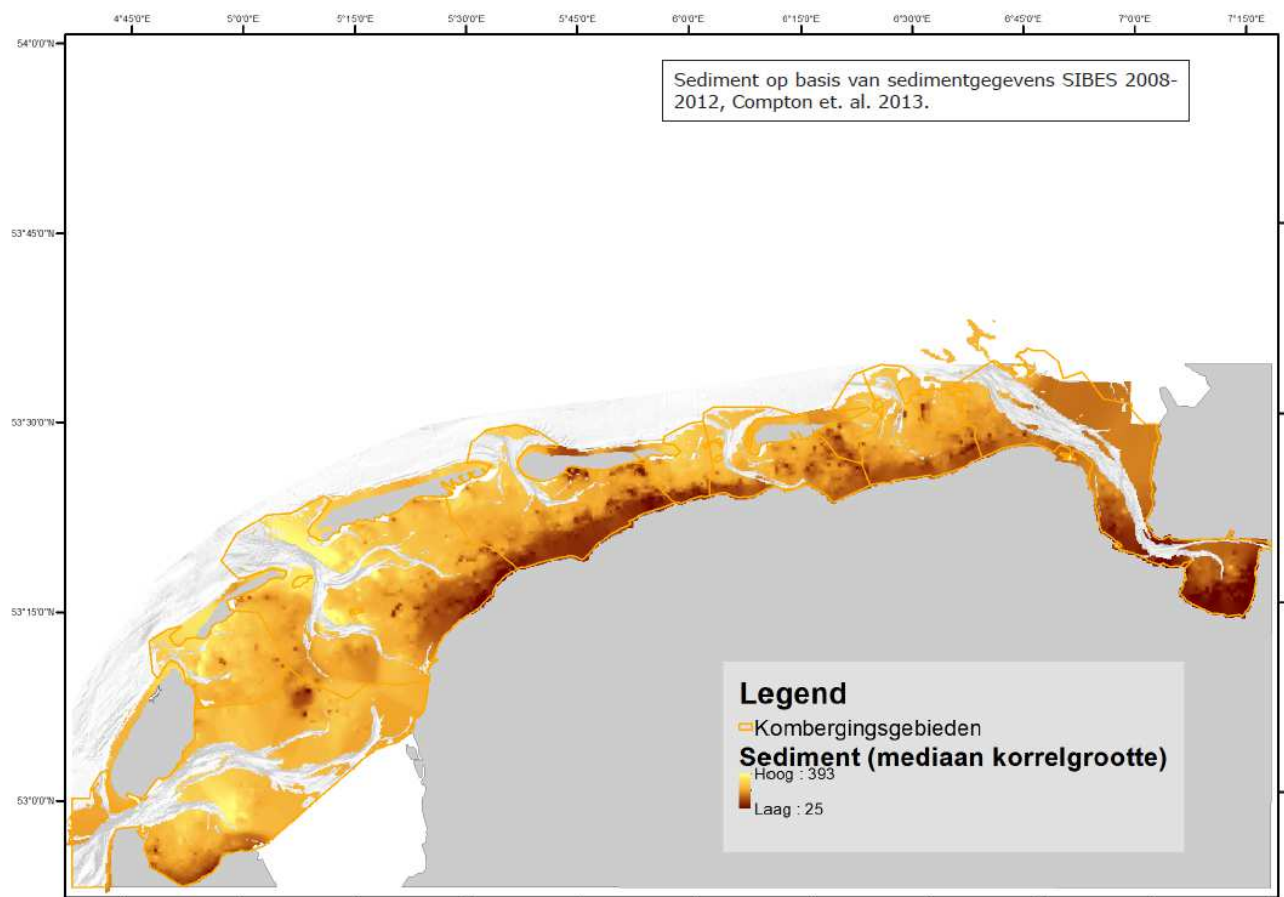
Figuur 3.5 Maximale bodemschuifspanning ( $N m^{-2}$ ) over een springtij-doottij cyclus (Kater et al., 2010).

### 3.5 Korrelgrootte & slibgehalte in de bodem

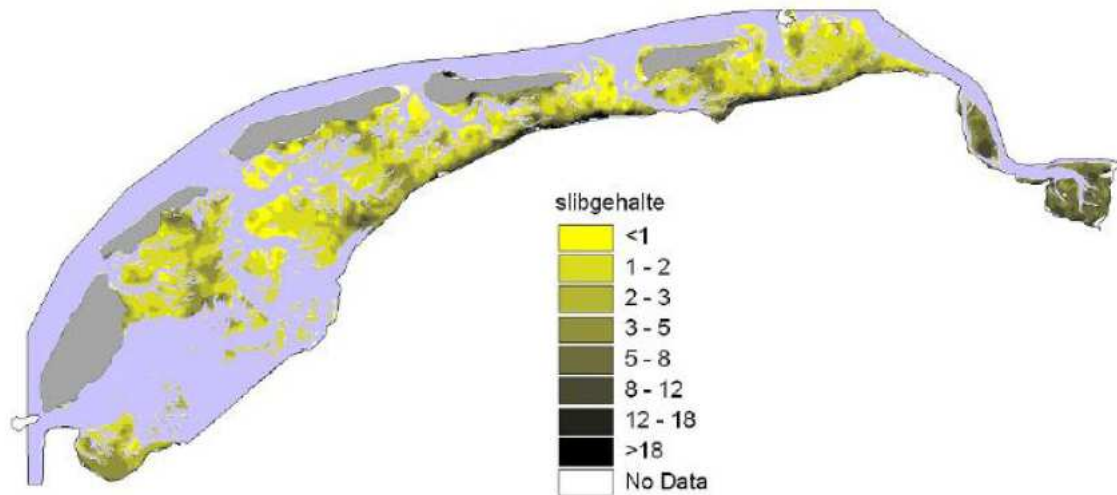
Voor de bestortingen vormt het sediment in de omgeving een belangrijke factor. In de Waddenzee wordt het grofste sediment aangetroffen daar waar de hoogste stroomsnelheden optreden, namelijk op de bodem van de zeegaten en de grote geulen. Lokaal wordt grof materiaal in de vorm van schelpenbanken (van afgestorven schelpdieren, hier worden geen mossel- en oesterbanken bedoeld) aangetroffen. In de kombergingsgebieden wordt vanaf het zeegat naar binnen toe, het sediment fijner, door een combinatie van processen (Van Ledden, 2003). De korrelgrootte is het fijnst en het slibgehalte het hoogst in de gebieden nabij de vastelandskust en nabij de wantijen (Figuur 3.6 & 3.7).

De korrelgrootte van het sediment in de omgeving bepaalt in grote mate welke soorten voorkomen op hard substraat. Als er fijn materiaal aanwezig is zal dit naar alle waarschijnlijkheid ook op het hard substraat terecht komen en bepaalde in en op het sediment levende benthos soorten aantrekken zoals wormen en schelpdieren. Verder bevat het slib vaak ook veel organisch materiaal dat dient als voedselbron.

Door de aanwezigheid van fijn sediment en slib is lokaal de sediment concentratie in het zeewater hoger en het doorzicht kleiner.



Figuur 3.6 Mediane korrelgrootte sediment (Christianen et al., 2015; Compton et al., 2013).



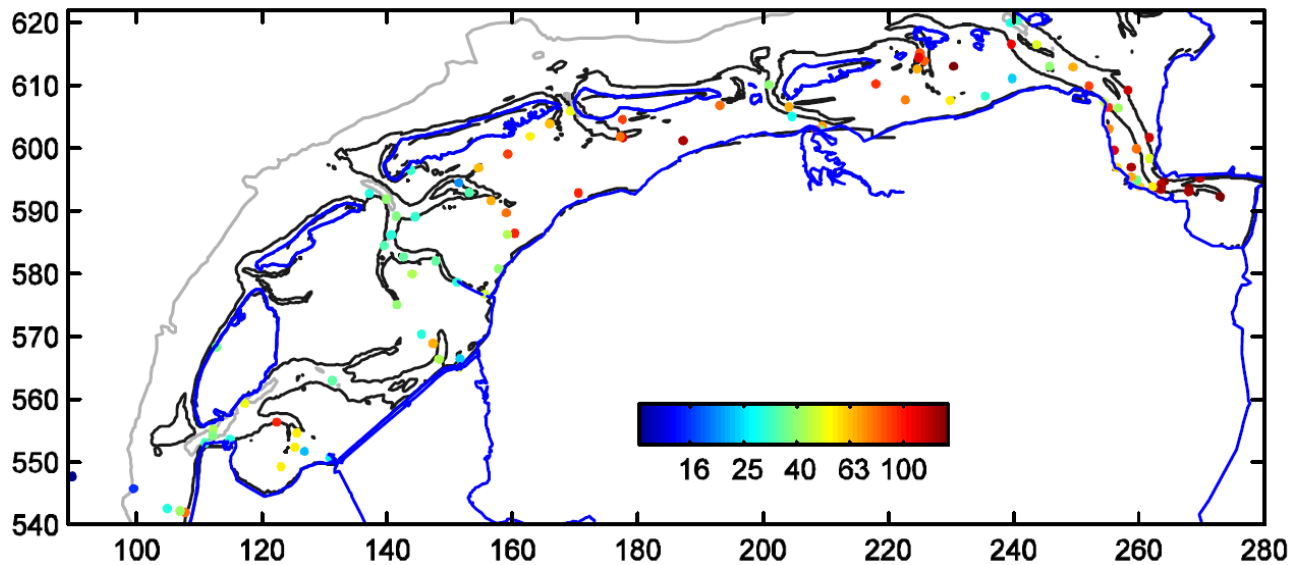
Figuur 3.7 Slibgehalte in bodem (1950-1955) (Zwarts, 2004)<sup>3</sup>.

### 3.6 Sedimentconcentratie in de waterkolom

Sediment in de waterkolom bestaat voornamelijk uit fijn sediment (slib en silt). Zandeeltjes hebben een hogere valsnelheid en blijven relatief kort in de waterkolom aanwezig. De aanwezigheid van sediment in de waterkolom leidt tot een hogere troebelheid, oftewel minder doorzicht en tot een afname van de lichtinval in het water. De ruimtelijke verspreiding van de sedimentconcentratie in de waterkolom (figuur 3.8) vertoont zowel een variatie binnen de kombergingsgebieden, als binnen de Waddenzee. Binnen de kombergingsgebieden wordt de laagste troebelheid aangetroffen in de zeegaten en de grote geulen. De hoogste troebelheden worden aangetroffen nabij de vastelandskust. In de Waddenzee is sprake van een onderscheid tussen het westelijke deel van de Waddenzee met overwegend lage concentraties (5-30 mg/l) en het oostelijke deel met overwegend hogere concentraties (20- >200 mg/l). De verdeling van de sedimentconcentraties in de waterkolom en in de bodem van de Waddenzee (voorgaande paragraaf) komen overeen.

De sedimentconcentratie in zeewater is belangrijk voor de begroeiing van hard substraat vanwege de beïnvloeding van de troebelheid van het zeewater en het doorzicht. Bruinwieren komen bijvoorbeeld tot een waterdiepte van 15 m voor op de onderwater bestortingen van de dijken van Texel vanwege het grote doorzicht aldaar.

<sup>3</sup> Het kaartje laat gegevens zien uit de jaren 50 van de vorige eeuw. Ondanks de ouderdom van deze gegevens komt het patroon overeen met meer recente gegevens (figuur 3.7). De verdeling zand-slib in de Waddenzee is behoorlijke standvastig (opmerking kennistafel).



Figuur 3.8 Jaargemiddelde gemeten sediment concentratie op MWTL locaties (mg/l) in 1998 (Van Kessel et al., 2010).

In havenbekkens, waar veel hardsubstraat in verschillende vormen aanwezig is, kan de sedimentconcentratie in de waterkolom sterk afwijken van die in de Waddenzee direct buiten de haven. Door de vorm en diepte van de havens vormen deze uitstekende bezinkbekkens voor fijn sediment en daarbij zorgen de havendammen voor afscherming van de golfwerking en is de getijstrooming beperkt. Het sediment dat naar de bodem zakt is dan niet meer in (het bovenste deel van) de waterkolom aanwezig. Dat betekent dat in de havenbekkens het water een groter doorzicht heeft dan in de aangrenzende Waddenzee. Achterin de bekkens, dat wil zeggen zo ver weg mogelijk van de haveningang, is de sedimentconcentratie in het water het laagst en voorin, bij de ingang van de Waddenzee naar de haven, is de concentratie het hoogst. Lokaal kan de situatie wel afwijken doordat scheepsactiviteit zorgt voor de opwoeling van (fijn) sediment van de bodem. Een dergelijke gradiënt van hogere naar lager concentraties sediment in de waterkolom doet zich al voor kleine havens<sup>4</sup>.

### 3.7 Generiek denkmodel abiotiek Waddenzee

Bovenstaande abiotische factoren zijn deels te vatten in een denkmodel, dat de situatie beschrijft in een kombergingsgebied van de Waddenzee, van zeegat tot de landwaartse zijde van het bekken (figuur 3.9). Het denkmodel beschrijft alleen de geulen, omdat het bestortingen onder het niveau van laagwater betreft.

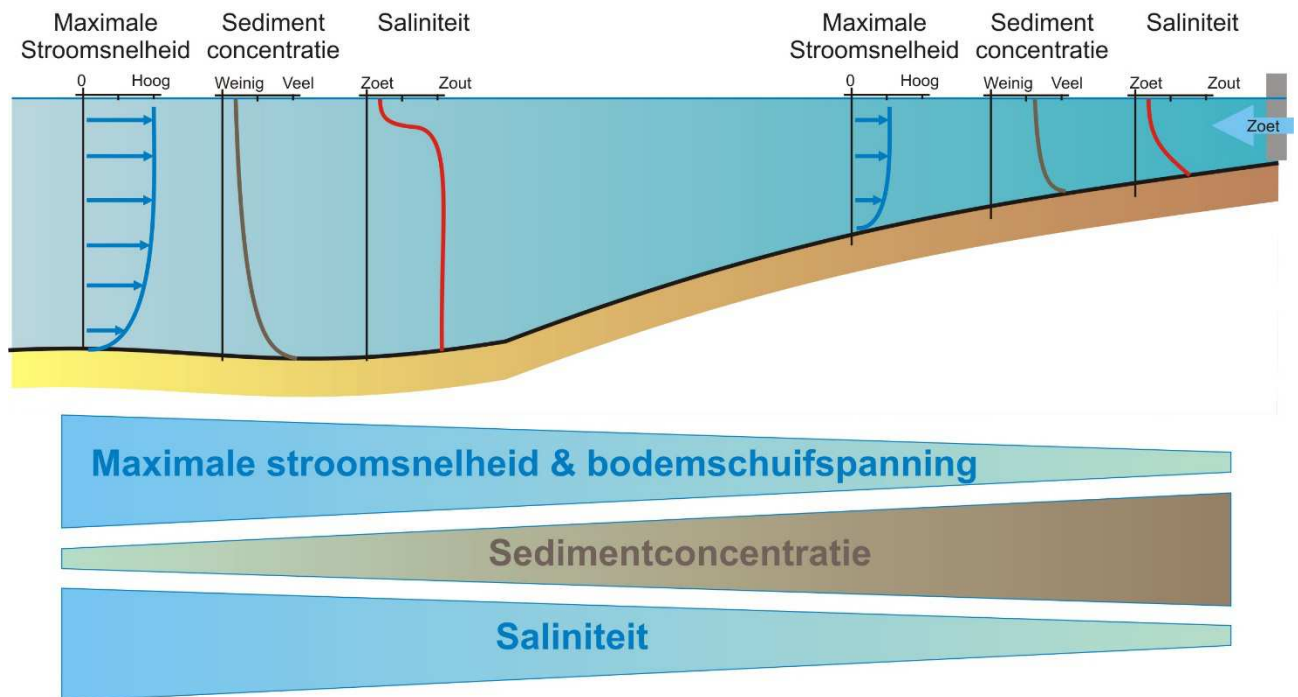
Aan de zijde van het zeegat zijn de stroomsnelheden hoog, de sedimentconcentratie in de waterkolom is laag en het sediment is relatief grofkorrelig. De saliniteit van het water komt overeen met die van de Noordzee, met uitzondering van de bovenste laag, die een lagere saliniteit kan hebben.

Aan de landzijde van het bekken zijn de stroomsnelheden laag, is de sedimentconcentratie hoog en is het sediment op de bodem fijn. Afhankelijk van de aan- dan wel afwezigheid van een spuilocatie en het daadwerkelijke spuien van zoetwater is sprake van een (veel) lagere saliniteit.

<sup>4</sup> In het Waddenmagazine van maart 2016 worden de jachthavens van de Waddenzee aangemerkt als snorkellootatie, onder andere vanwege het relatief goede doorzicht.

**Zeegat**

**Vasteland**



*Figuur 3.9 Schematische dwarsdoorsnede van een kombergingsgebied in de Waddenzee met verschillende abiotische parameters.*

Het generieke model voor verschillende abiotische parameters in figuur 3.9 is een algemene weergave van de situatie in de kombergingsgebieden in de Waddenzee. De saliniteit is afhankelijk van de aan- of afwezigheid van spuilocaties. In het kombergingsgebied van het Zeegat van Ameland ontbreken bijvoorbeeld spuilocaties vanaf het vasteland, waardoor de saliniteit in dat kombergingsgebied minder direct beïnvloedt wordt door het spuien. En zoals beschreven kunnen lokaal in havenbekkens ook afwijkende situaties optreden.

# 4 De ecologie in de Waddenzee

## 4.1 Beknopte beschrijving van het sublitoraal

De flora en fauna van de Waddenzee wordt gekenmerkt door een mix van Noordzee soorten en soorten die kenmerkend zijn voor het intergetijdengebied zoals mosselen, oesters en zeegras. Deze gemeenschappen behoren tot habitattype H1110A uit de Habitat Richtlijn (Permanent overstromde zandbanken getijdengebied). De zandige delen worden bevolkt door wormen, zoals zandzagers (*Nephtys* spp.), schelpkokerwormen (*Lanice conchilega*), borstelwormen (*Spio* spp.), en schelpdieren, zoals wulk (*Buccinum undatum*), nonnetje (*Macoma balthica*), strandgaper (*Mya arenaria*) en de mossel (*Mytilus edulis*).

De visgemeenschap in de zandige gebieden bestaat uit soorten met verschillende voedselkeuzes (benthos, plankton, garnalen/vis), die in verschillende fasen van hun leven (juвениel, volwassen) of seizoenen (trekvissen, seizoensgasten) gebruik maken van de Waddenzee. Ook komen er soorten voor die hun hele leven voorkomen in de Waddenzee (estuariën residentie soorten).

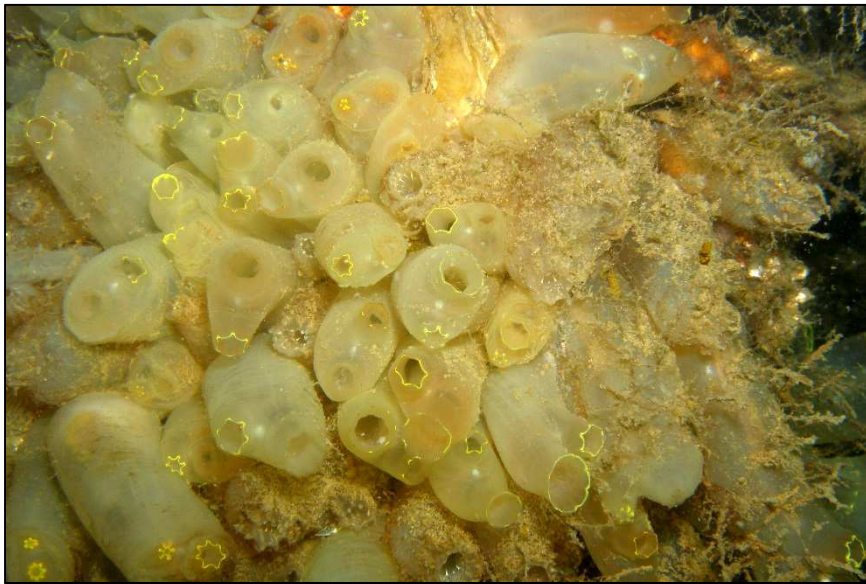
Van diverse soorten vis komen via de heersende zeestromen vislarven vanuit de Noordzee in de Waddenzee terecht. In de Waddenzee groeien die larvale stadia op, waarna ze als volwassen exemplaren naar de Noordzee terug keren. De Waddenzee heeft daarmee een belangrijke functie als opgroei gebied voor diverse in de Noordzee levende vissoorten. Het relatief ondiepe zeewater en het rijke voedselaanbod bieden ideale omstandigheden om snel te groeien. Het gaat hier om bodemvissen zoals bot (*Platichthys flesus*), schol (*Pleuronectes platessa*) en tong (*Solea solea*) en pelagische soorten zoals haring (*Clupea harengus*), spiering (*Osmerus eperlanus*), wijting (*Merlangius merlangus*), geep (*Belone belone*) en ansjovis (*Engraulis encrasicolus*). Relatief grote aantallen 0<sup>e</sup>-jaars individuen worden in het voor- of najaar aangetroffen. Na een bepaalde periode trekken de juveniele vissen naar dieper water. Het vermoeden bestaat dat de opgroeifunctie van de Waddenzee door stijgende temperaturen afneemt (Teal et al., 2012; van der Veer et al., 2015), juveniele schol in plaats van in het litoraal meer in het sublitoraal aanwezig is (Freitas, V., Witte, J., Tulpt, I., van der Veer, 2016), en er in het algemeen minder schol en tong in de Waddenzee aanwezig is (CBS, PBL, 2015; van der Veer et al., 2015).

Plaatselijk voorkomende natuurlijke harde structuren zoals stenen, grind en riffen (mossel-, oester- en schelpenbanken) zijn onderdeel van het habitattype H1110A. Harde substraten herbergen vaak een hogere en andere biodiversiteit dan het omringende zachte substraat vanwege de hogere habitatheterogeniteit die ruimte biedt voor een groter aantal soorten. Het zijn met name zeeanemonen zoals de zeeanjelier (*Metrium senile*) (zie figuur 4.3) en de wedueroos (*Sagartiogeton undatus*) (zie figuur 4.1), zakpijpen zoals de doorschijnende zakpijp (*Ciona intestinalis*) (figuur 4.2), hydropoliepen, zeesterren, mosdieren, zeenaaktslakken, zeepokken en wieren zoals blaaswier (*Fucus vesiculosus*) die afhankelijk zijn van hard substraat.





Figuur 4.1 De wedueroos (*Sagartiogeton undatus*) komt voor in de Waddenzee voornamelijk nabij Texel en Vlieland (Gittenberger et al., 2009) en lijkt de voorkeur te hebben voor locaties met weinig stroming (Maarten de Jong, foto genomen in de Grevelingen).



Figuur 4.2 De doorschijnende zakpijp (*Ciona intestinalis*) is een inheemse soort die in de Waddenzee bij Terschelling en bij de Eemshaven is aangetroffen (Gittenberger et al., 2009).

Ook bieden dergelijke structuren habitat aan wormen, kreeftachtigen en vissen zoals vijfdradige meun (*Ciliata mustela*) en de puitaal (*Zoarces viviparus*). De laatstgenoemde soort kwam voornamelijk voor aan de zuidzijde van de Waddenzee maar is vanaf 1990 minder algemeen. Verder zijn de zeedonderpad (*Myoxocephalus scorpius*) figuur 4.3, de botervis (*Pholis gunnellus*) en de gehoornde slijmvis (*Parablennius gattorugine*) algemeen zie figuur 4.4. Het dikkopje (*Pomatoschistus minutus*) komt voor op zand en slibbodems met verspreide harde substraten.



Figuur 4.3 Gewone zeedonderpad (*Myoxocephalus scorpius*) tussen zeeanjelieren (*Metridium senile*) die ook in de Waddenzee voorkomen (foto Maarten de Jong).



Figuur 4.4. Gehoornde slijmvis (*Parablennius gattorugine*) die tegenwoordig steeds vaker opduikt in de Waddenzee nabij hard substraat (Maarten de Jong, foto genomen op Corsica).

Verder zijn de volgende vissoorten te verwachten in beschutte omgevingen zoals havens met hard substraat: meun (*Ciliata mustela*), snotolf (*Cyclopterus lumpus*), grondelsoorten (o.a. *Gobius niger*), slakdolf (*Liparis liparis*), en zeenaald (*Syngnathus rostellatus*), maar ook platvissoorten en andere bodemvissen zoals tong, schar (*Limanda limanda*), bot, schol, aal (*Anguilla anguilla*) en pitvis (*Callionymus lyra*) en pelagische soorten, zoals pollak (*Pollachius pollachius*), koornaarvis, geep, haring, zeebaars, kabeljauw (*Gadus morhua*), wijting (*Merlangius merlangus*), steenbolk (*Trisopterus luscus*), dwergbolk (*Trisopterus minutus*) en driedoornige stekelbaars (*Gasterosteus aculeatus*) (Gittenberger et al., 2009).

In brakwater komt de brakwater grondel voor maar dan voornamelijk in de geulen. Een nieuwe soort voor de Waddenzee is de blonde grondel die is aangetroffen in de NIOZ haven in 2011. <http://www.waddenvereniging.nl/nieuws/5824-nieuwe-vis-in-de-waddenzee.html>. Diadrome vissoorten, soorten die zich verplaatsen tussen zoet en zout water, zoals paling, dunlipharder, bot, rivierprik, zee-prik, zeeforel, fint, spiering en de driedoornige stekelbaars worden beïnvloedt door saliniteit en reageren waarschijnlijk positief op de vismigratierivier, waarvoor momenteel voorbereiding worden getroffen.

Door het gebruik van hard substraat kunnen bepaalde soorten aangetrokken worden die normaal niet in zandige gebieden voorkomen en kan de totale biodiversiteit stijgen. Diadrome soorten (Trekvisseren) die wellicht in de toekomst meer gebruik gaan maken van de spuien in de Afsluitdijk en andere gebieden hebben waarschijnlijk ook baad bij hardsubstraat vanwege schuil- en foerageergebieden. Verder kunnen soorten als de hondshaai (*Scyliorhinus canicula*) en stekelrog (*Raja clavata*) in theorie gebruik maken van hard substraat voor de afzetting van eieren en als foerageergebied.

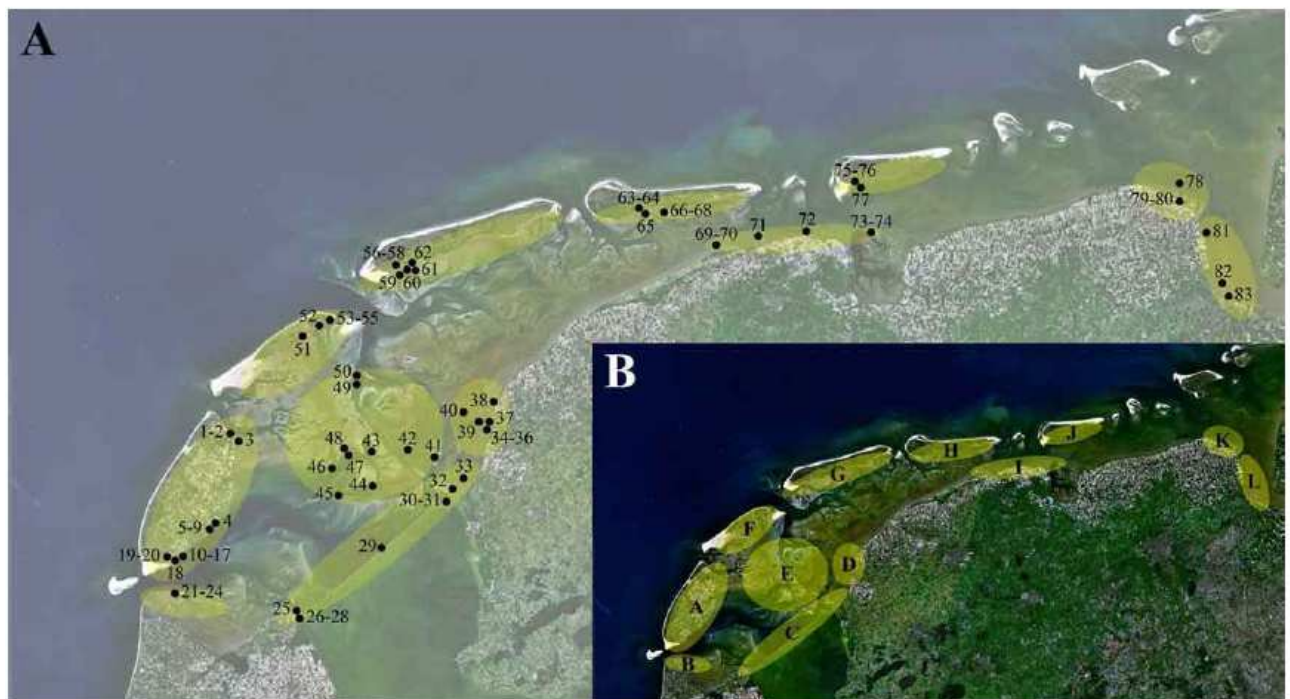
## 4.2 Onderzoek naar ecologische waarden hard substraat in de Waddenzee

Er zijn in de Waddenzee recent drie inventarisaties (Gittenberger et al., 2009; Gittenberger & Rensing, 2012; Gittenberger et al., 2015) uitgevoerd op harde substraten, dit betrof voor een deel natuurlijke harde substraten en (drijvende) steigers maar ook onderwater bestortingen. In de inventarisaties van 2009 en 2011 (Gittenberger et al., 2009; Gittenberger & Rensing, 2012) zijn de locaties in figuur 4.2 onderzocht met een scala aan onderzoeksmethoden. Veel aandacht is besteedt aan drijvend hardsubstraat in havens, omdat de inventarisatie was gericht op exotische soorten. In jachthavens worden vaak veel exoten aangetroffen en dit bleek ook voor de Waddenzee te gelden.

De soortenrijkdom in de Waddenzee is niet homogeen verdeeld, zoals blijkt uit de kaarten met de inventarisaties uit 2009 (figuur 4.3) en uit 2009 en 2011 gecombineerd (figuur 4.4). De soortenrijkdom is het hoogst nabij Texel

(133 soorten), westelijke Waddenzee (100 soorten), Vlieland (86 soorten) en Terschelling (74 soorten). In de andere gebieden is de soortenrijkdom lager. Zo komen de bruinwieren suiker- en vingerwier (*Saccharina latissima* en *Laminaria Digitata*) wel voor op de dijken van Texel, Den Helder en Terschelling maar niet in de hele Waddenzee. In de brakkere delen van de Waddenzee, bijvoorbeeld bij de Afsluitdijk, Harlingen, en de Eems, werden gemiddeld 30 soorten aangetroffen. Verder zijn er verhoudingsgewijs nabij de Afsluitdijk de minste exoten aangetroffen mogelijk vanwege de invloed van zoet water (figuur 4.3). Het aandeel exoten is hoe dan ook iets hoger in het Oostelijk deel van de Waddenzee. De publicaties van Gittenberger e.a. (2009) en Gittenberger en Rensink (2012) geven ook aan welke soorten te verwachten zijn in beschutte omgevingen (havens) met hard substraat.

In 2014 (Gittenberger et al., 2015) zijn opnieuw locaties onderzocht (zie figuur 4.5). In deze inventarisatie werden vergelijkbare resultaten gevonden als in 2009 en 2012, met dien verstande dat opnieuw nieuwe exoten werden aangetroffen.



Figuur 4.2 onderzochte hard substraat locaties (Gittenberger et al., 2009). A: individuele onderzoek locaties, B: Deelgebieden (A-L).

Het is aantrekkelijk om op basis van de door Gittenberger en Rensink (2012) waargenomen verschillen tussen de deelgebieden verbanden te leggen met abiotische omstandigheden, zoals die zijn aangegeven in het voorgaande hoofdstuk. Daarvoor missen echter gegevens over de monsterlocaties in relatie tot de abiotische condities, zoals die in het vorige hoofdstuk zijn vermeld. De beschrijving van de monsterlocaties in Gittenberger et.al. (2009) is zeer gedetailleerd en omvat de onder andere de saliniteit ter plaatse, maar dit bijvoorbeeld geeft geen inzicht in de variatie in de saliniteit.

In de Waddenzee is niet gericht gezocht naar verschillen in leven op verschillende typen bestortingen. Wel geeft figuur 4.6, die is overgenomen uit Gittenberger en Rensink, inzicht in de verschillen in het aantal soorten tussen verschillende habitats in jachthavens. Uit deze grafiek blijkt duidelijk dat de 'dijken sublitoraal', die corresponderen met bestortingen, de laagste soortenrijkdom kennen van alle jachthaven habitats.

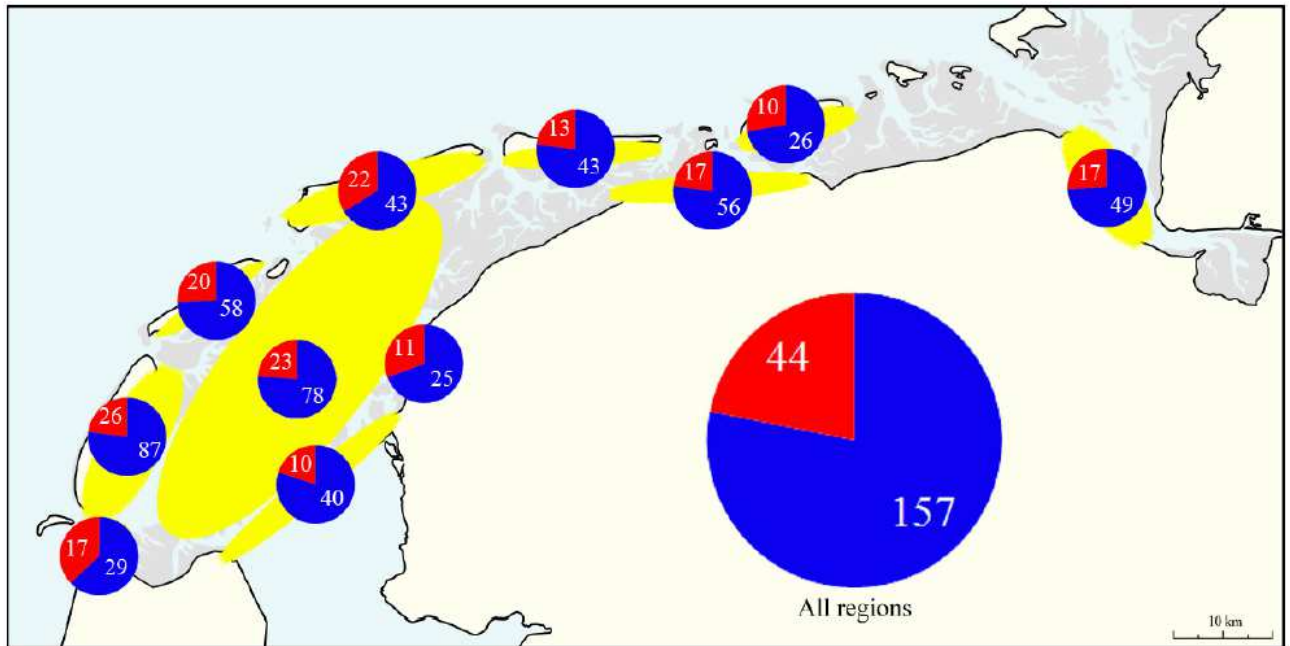
Uit de inventarisaties van Gittenbergen en Rensink (2012) en Gittenberger et al. (2015) is niet direct op te maken in hoeverre deze voldoende representatief zijn voor wat betreft de bestortingen. Uit de verandering van het aantal soorten tussen de inventarisaties (vergelijk figuur 4.3 met 4.4 en 4.5) kan worden opgemaakt dat het loont om veel te kijken. Een klein aantal monsterlocaties bij bestortingen geeft daardoor mogelijk een beperkt aantal soorten.



Figuur 4.3 Inheemse soortenrijkdom (blauw) en aantal exoten (rood) op hard substraat locaties in de Waddenzee in 2009 (Gittenberger et al., 2009).



Figuur 4.4 Inheemse soortenrijkdom (blauw) en aantal exoten (rood) op hard substraat locaties in de Waddenzee op basis van de inventarisaties in 2009 en 2011 (Gittenberger en Rensink, 2012).



Figuur 4.5 Inheemse soortenrijkdom (blauw) en aantal exoten (rood) op hard substraat locaties in de Waddenzee op basis van de inventarisaties in 2014 (Gittenberger et al., 2015).



Figuur 4.6 Het aantal in de Waddenzee gevonden soorten in verschillende jachthaven habitats tijdens de inventarisaties van 2009 en 2011 (uit Gittenbergen en Rensink, 2012).

### 4.3 Aanvullende opmerkingen over de ecologische waarden van bestortingen

Het aantal gegevensbronnen dat specifiek betrekking heeft op de ecologische waarden van bestortingen in de Waddenzee is zeer beperkt. Het is daardoor eigenlijk niet goed vast te stellen welke ecologische variatie optreedt op en rond bestortingen. Verder heeft de ecologische karakterisering tot nu toe alleen betrekking op de

aanwezigheid van soorten. Andere parameters, zoals de dichtheden en biomassa's van soorten worden in het geheel niet beschreven. Om de ecologische waarde vast te stellen ligt het voor de hand om naast de soortenrijkdom ook andere indicatoren te beschouwen.

De beschikbare gegevensbronnen voor de Waddenzee bevatten geen informatie over de eigenschappen van de bestortingen<sup>5</sup>. Wel is duidelijk dat de verschillende typen hard substraat voor meer of minder soorten zorgen (figuur 4.4). Tevens volgt uit de beschrijving van Gittenberger en Rensing (2012) dat de ouderdom van het hardsubstraat ook een factor kan zijn bij de soortenrijkdom. Recent aangebracht hardsubstraat is doorgaans rijker aan soorten dan hard substraat dat al langer aanwezig. Op basis van kennis en ervaringen uit de Oosterschelde wordt verondersteld dat ook binnen de bestortingen verschillen bestaan, die het gevolg zijn van de toepassing van verschillende soorten bestorting.

De inventarisaties waarvan de resultaten zijn getoond in Gittenberger en Rensink (2012) laten grote verschillen in de soortenrijkdom binnen de Waddenzee. Directe verbanden met de abiotische factoren zijn niet leggen, maar de resultaten geven wel aanleiding om te veronderstellen dat er relaties bestaan op mesoschaal (binnen de Waddenzee) en op microschaal (waterdiepte, hydrodynamica, bestortingsmateriaal, etc.). In het volgende hoofdstuk worden nader ingegaan op het bestortingsmateriaal.

---

<sup>5</sup> In de ruwe data van Gittenberger en Rensink is hier desondanks meer over te vinden, maar dat viel buiten de scope van deze studie (zie ook hoofdstuk 7.3)

# 5 Stortmaterialen en ecologische optimalisatie

## 5.1 Inleiding

Bestortingen kunnen worden uitgevoerd met verschillende materialen, die heel verschillende eigenschappen hebben. De mogelijkheden variëren van verschillende soorten natuursteen, via beton tot staal- en fosforlakken. Het grootste deel van de onderwater bestortingen in de Waddenzee zijn uitgevoerd met natuurlijke materialen. Lokaal wordt er echter gebruik gemaakt van staalslakken (tabel 2.1, Oost-Vlieland, Vierhuizergat en Pollendam).

Met deze verschillende materialen worden abiotische variabelen geïntroduceerd die hiervoor nog niet zijn beschouwd. Ecologisch gezien zijn de materiaalsoort, de sortering en de eventuele verkitting van belang. De aanhechtingsmogelijkheden voor organismen op de verschillende materialen worden bepaald door de textuur (ruwheid, porositeit etc. zie tabel 6.1) en de chemische samenstelling. De verschillende soorten natuursteen (basalt, graniet, kalksteen) hebben een verschillende textuur. De aan- of afwezigheid van holtes wordt bepaald door de sortering van het materiaal en de eventuele verkitting. Grover materiaal, met een brede sortering levert over het algemeen meer holtes op.

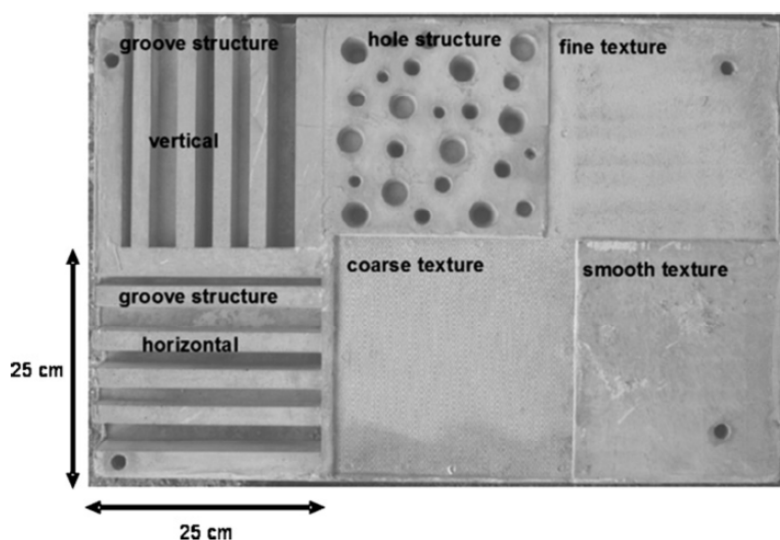
Tabel 6.1 Fysische factoren die de begroeiing van stortmaterialen onder water beïnvloeden (Leeuwis, 2014)

Fysische factor	Effecten
Ruwheid	Te glad kan aanhechting voorkomen, ruwe oppervlakten bevorderen de mogelijkheden voor wieren (Borsje et al., 2011)
Hardheid	Belangrijk voor borende en penetrerende soorten (boorspons en hoefijzerwormen), basalt kan bijvoorbeeld voor sommige soorten te hard zijn
Porositeit	Poriën zijn mede bepalend voor de ruwheid en de dichtheid van de stenen
Afmeting	Niet te klein i.v.m. rollen van substraat door stroming. Grotere stenen ook meer mogelijkheden voor leven tussen stenen (dat heeft ook te maken met de sortering).
Vorm	Holtes en gaten in stortmateriaal kunnen interessant zijn voor grondels en botervis, paling en alikruiken ( <i>Littorina littorea</i> ) etc. Groeven in het oppervlak stimuleert het voorkomen van mosselen (Borsje et al., 2011).

Voor de aanhechting aan het substraat dient de textuur van het oppervlakte voldoende ruw te zijn (Borsje et al., 2011). Bij de toepassing van betonnen elementen kan hiermee rekening worden gehouden door in de voor het storten te gebruiken gietmallen ruwe oppervlaktes te gebruiken. Deze techniek wordt bijvoorbeeld toegepast bij Eco Xbloc. Het type reliëf dat wordt toegepast lijkt van invloed te zijn op de aanhechting van verschillende soorten en de snelheid waarmee de aanhechting plaatsvindt (Borsje et al., 2011). Op basis van de bevindingen uit de studie van Borsje e.a. (2011) kan worden aanbevolen om bij toepassing van betonnen elementen een grove structuur toe te passen, bijvoorbeeld in de vorm van groeven.

Wat betreft basalt is er een vermelding over de 'museumdijk' bij Texel die lager en veel steiler is dan moderne dijken en bestaat uit basaltblokken, met een begroeiing die veel rijker zou zijn dan op moderne dijken.

<http://www.ecomare.nl/ecomare-encyclopedie/gebieden/waddengebied/nederlands-waddengebied/texel/natuur-op-texel/brakwater-reservaten/>



Figuur 6.1 Voorbeeld van een betonplaat, toegepast om de invloed van verschillende texturen op de aanhechting van dieren en wieren te onderzoeken (Borsje et al., 2011).

## 5.2 Chemische samenstelling en begroeiing

In Zeeland is een onderzoek uitgevoerd naar de sublitorale begroeiing van geulwand verdedigingen bij Bath en in het Zuidergat in de Westerschelde in 1999 (van Moorsel, 2000). Bij Bath bestond de ondergrond uit stortsteen van basalt (40-200 kg) en fosforslakken (40-200 mm). In het Zuidergat bleef het substraat op de monsterlocatie beperkt tot uitsluitend staalslakken (0-400 mm) en breuksteen (natuursteen). Wat betreft de begroeiing waren de verschillen klein (van Moorsel, 2000).

In een recent onderzoek zijn weinig verschillen in begroeiing gevonden tussen staalslakken en breuksteen. Het percentage kaal substraat was wel tweemaal hoger op staalslakken (Tangelder, M., van den Heuvel-Greve, M., de Kluijver, M., Glorius, S., Jansen, 2014). De langetermijneffecten van de verschillende stortmaterialen op de ecologie zijn nog niet bekend.

De belangrijkste verschillen in de mate van begroeiing per soort hard substraat zijn weergegeven in tabel 5.1.

Tabel 5.1 Begroeiing van stortmaterialen onder water (Leeuwis, 2014)

Rijk begroeid	Middelmatig begroeid	Slecht begroeid
Vilvoordse kalksteen	Finse steen	Asfalt (mastiek)
Beton	LD slak (staalslak) $\varnothing$ 4 – 8 cm	
Mangaanslak	Basalt	
	Forforslak	
	Mijnsteen	



Chemische verbindingen kunnen uit het stortmateriaal oplossen en ophopen in de organismen die er op groeien en vervolgens ook accumuleren in predatoren. In wieren, schelpdieren, zakpijpen en mosdieren zijn verhoogde waarden van o.a. mangaan, arseen, chroom, kobalt, molybdeen en nikkel aangetroffen in een stortvlak met staalslakken en stortsteen bij de Scheelhoek in Zeeland. IJzer, aluminium, zink en koper zijn in hoogste gehalten (20 – 3000 mg/kg drooggewicht) aangetroffen (van den Heuvel-Greve, 2009). Desondanks blijkt uit een recente studie (Foekema et. al., 2016) in de Oosterschelde gecombineerd met mesocosm dat met zekerheid kan worden gesteld dat het ecosysteem in de Oosterschelde niet negatief wordt beïnvloed door uitlogende stoffen uit de op dit moment op de stortlocaties aanwezige staalslakken en breuksteen. We gaan ervan uit dat de resultaten van deze studie overdraagbaar zijn naar de Waddenzee (zie ook hoofdstuk 7.5).

In zoet water is de uitloging van metaalionen en de pH waarde sterk verhoogd waardoor er meer schade kan ontstaan (<http://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/bodemassen-en-slakken>). Voor onderwater bestortingen in het zuidelijke deel van de Waddenzee verdient dit aspect extra aandacht, omdat daar zoet water via de spuisluizen in de Waddenzee terecht komt. Uit Foekema et. al. (2016) blijkt echter wel dat verhoging van de pH alleen optreedt in situaties met lage verversingssnelheid van het zeewater. In zoete milieus waar de uitloging is waargenomen, is de verversingssnelheid veel lager dan in de Waddenzee. De invloed van slakken op de pH in het zoete water rond spuilocaties, waar de verversingssnelheden hoog zijn treedt mogelijk niet op. De verspreiding van metaalionen in het onderwater milieu kan risico's met zich mee brengen en vereist zorgvuldigheid bij het toepassen van slakken in situaties met lage verversingssnelheid van het water. Civiel technisch is het gebruik van staalslakken wel gunstig vanwege de hoge materiaaldichtheid en lage kosten.

## 5.3 Mogelijkheden tot optimalisatie

Op basis van ervaring in met name Zeeland en discussie bijeenkomsten rond de Waddenzee zijn verschillende mogelijkheden benoemd om de ecologische functies van hard substraat te vergroten. Deze mogelijkheden zijn weergegeven in tabel 6.2. In deze tabel is ook aangegeven wat het toepassingsbereik is van de verschillende ingrepen. Enkele van deze ingrepen kunnen een bijdrage leveren aan de stabiliteit van waterkeringen, of het tegengaan van geulverplaatsing, de andere ingrepen zijn puur gericht op de ecologische kwaliteit.

Tabel 6.2 Mogelijkheden voor optimalisatie hardsubstraat.

Ingreep	Effecten	Toepassingsbereik
Ecologische toplaag over vooroever bestorting, opgebouwd uit verschillende soorten natuursteen (basaltblokken en Vilvoordse kalksteen) in de vorm van boogvormige wallen als gradiënt (Verhoog, 2009).	Door variatie neemt ook de heterogeniteit van het habitat toe en daarmee wellicht ook de biodiversiteit.	Toepassing op bestaande bestortingen, bij uitbreiding van bestortingen en bij nieuw aan te leggen bestortingen.  Kan een waterbouwkundige bijdrage leveren aan de stabiliteit van de onderwateroever en het tegengaan van geulmigratie.
Eco Xbloc	Beton oppervlak bestaande uit groeven trekt veel mosselen aan, oppervlak met gaten redelijk veel mosselen en een glad oppervlak geen mosselen (Borsje et al., 2011)	Toepassing als 'armour layer' van golfbrekers, zowel in intergetijdereik als onderwater. Niet toepasbaar voor de stabiliteit van de onderwateroever en het tegengaan van geulmigratie.
Sepia tenten	Houtvormige 'tent' constructies naar voorbeeld bij de Zeelandbrug om	Lokaal toepasbaar, geen waterbouwkundige bijdrage

allerhande soorten eierafzettingen te bevorderen.

---

Dumpen van kadavers (walvis skelet, grazer Oostvaardersplassen etc.) op speciale locaties (niet te harde maar ook niet te geringe stroming).	Naar idee van Lenze Hofstee, zal in de praktijk veel leven aantrekken zoals haaien, paling, krabben en andere aaseters waarna borende organismen op het harde substraat het overnemen.	Lokaal toepasbaar, geen waterbouwkundige bijdrage
Toepassen van bomen en andere restanten	Idem als kadavers, aanhecht plaatsten voor weer andere organismen zoals het spiraalmosdier (Bugula plumosa) en wieren.	Lokaal toepasbaar, geen waterbouwkundige bijdrage
Reef Balls	In Zeeland gebruikt om vis en kreeften aan te trekken, in trek bij duikers en eventueel ook inzetbaar in de Waddenzee.	Lokaal toepasbaar, geen waterbouwkundige bijdrage
RCE (Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed) wrakken zijn momenteel afgedekt met een laag zand ter conservering. Bijvoorbeeld Burgzand Noord (BZN) is rijk aan wrakken. Mogelijk zijn enkele locaties toch geschikt om als harde structuur te dienen. Een alternatief is bedekken met zand en daarop bestorting.	Rijke begroeiing op wrakken met anemonen, zee-anjelieren en vissoorten als Kabeljauw, steenbolk, dwergbolk etc.	Lokaal toepasbaar, geen waterbouwkundige bijdrage

---

# 6 Kansrijke opties voor bestortingen

## 6.1 Inleiding

Het aanbrengen van hard substraat wordt gezien als kansrijke mogelijkheid om de ecologische waarden van de Waddenzee te vergroten. In dit hoofdstuk wordt een eerste poging gedaan om op basis van de abiotische randvoorwaarden in de Waddenzee en de (beperkte) kennis van de ecologische waarde van bestortingen een waardering toe te kennen aan locaties die meer of minder geschikt zijn voor het aanbrengen van hard substraat onder het niveau van laagwater. In de eerste paragraaf worden de selectiecriteria benoemd, gevolgd door een beschrijving van de locaties die meer en minder kansrijk worden geacht.

## 6.2 Selectiecriteria gebieden

Op basis van het generieke denkmodel voor abiotische condities in de Waddenzee en de waarnemingen aan de soortenrijkdom op bestaande structuren is in tabel 6.1 een ruwe indeling gemaakt in vier typen gebieden in de Waddenzee met vergelijkbare condities en ecologische samenstelling.

Tabel 6.1 Matrix van gebieden, abiotiek en ecologie in de Waddenzee.

Gebied	Abiotiek	Ecologie
1. Nabij de zeegaten	Hoge maximale stroomsnelheden, lage troebelheid en oligotroof (voedselarmer)	Leefgemeenschap lijkt het meest op een rifsysteem, mosselen, oesters, anemonen, zee-anjelieren en typische bodemvissen als de botervis en de zeedonderpad.
2. In havens	Lage maximale stroomsnelheden, lage troebelheid en oligotroof (voedselarmer)	Rijkste leefgemeenschappen met brede variatie aan dieren en wieren, ook relatief de meeste exoten.
3. Achterin de getijdebekkens	Lagere maximale stroomsnelheden, hogere troebelheid en eutroof (voedselrijker)	Lijkt meer op H1110A Permanent overstromde zandbanken (getijdengebied) met een hoge biomassa zoals wormen, tong en schol.
4. Achterin getijdebekkens nabij sluiscomplexen	Lagere stroomsnelheden, hogere troebelheid en eutroof (voedselrijker), met grote variatie in saliniteit	Bepaalde brakwater tolerante soorten hebben meer kans zoals puitaal, bot, aasgarnaal en driedoornige stekelbaars.

De vier gebieden zijn vertaald naar gunstige en minder gunstige omstandigheden onderscheiden voor organismen op bestortingen:

### Gunstige abiotische omstandigheden:

- Helder water en beperkte aanvoer van fijn sediment via de waterkolom;
- Beperkte variaties in de saliniteit;
- Geen bedekking met zand of slib

### Minder gunstige abiotische omstandigheden:

- d. Troebel water en veel aanvoer van fijn sediment via de waterkolom;
- e. Grote schommelingen in het zoutgehalte
- f. Bedekking met zand of slib

**Aanvullende zijn er argumenten die betrekking hebben op de rol van het harde substraat voor de omgeving:**

- g. Nabijheid van een verbinding met zoet water (vispassage, sluis)
- h. Nabijheid van een gebied met potentie op of aanwezigheid van mossel- en oesterbanken en zeegrasvelden.

Hieronder worden de punten toegelicht:

a. & d. Helder water en een beperkte aanvoer van fijn sediment hebben positieve effecten op algen en wieren, vanwege de dieper reikende fotsche zone, op filterfeedende organismen en op dieren die gevoelig zijn voor bedekking. Deze condities doen zich voor in de omgeving van zeegaten en in de grote geulen, waar de stroomsnelheden hoog zijn. Welke rol de hoge stroomsnelheden op de organismen spelen kan niet worden vastgesteld. Ook in havens kan helder water en een beperkte aanvoer van fijn sediment in de waterkolom zich voordoen, doordat daar slib in het havenbekken bezinkt. In havenbekkens zijn de stroomsnelheden juist relatief laag. De tegenovergestelde situaties doen zich voor achter in de getijdebekkens. Dit kan overigens de verrassende situatie opleveren dat aan de Waddenzeezijde van een havendam de abiotische condities ongunstig zijn, terwijl deze aan de havenzijde gunstig zijn.

b. & e. Een stabiele saliniteit betekent dat de stress die kan optreden door de variaties in de saliniteit wordt beperkt. Dichtbij de zeegaten en dieper in de waterkolom varieert de saliniteit in de Waddenzee het minst. Een beperkt aantal organismen is ingesteld op de grote variaties in saliniteit die zich voordoen rond de uitwateringspunten van zoetwater.

c. & f. Hard substraat dat als zodanig aanwezig blijft vereist dat het niet wordt bedekt door een laag zand of slib. Als het aanwezige harde substraat langdurig beschikbaar blijft voor organismen, dan kunnen de hard substraat gemeenschappen zich goed ontwikkelen. Gebieden waar structurele erosie plaatsvindt zijn daarmee in de Waddenzee kansrijker als locaties voor rijke bestortingen dan gebieden waar sedimentatie optreedt. In de Waddenzee zijn grote gebieden waar netto sedimentatie plaats vindt en die daarmee minder gunstig zijn voor rijke bestortingen.

g. Hoewel bij punt e. de grote schommelingen in de saliniteit, zoals die optreden bij uitwateringspunten, als een ongunstige factor zijn beschreven, kan het voor het functioneren van een zoet-zout vispassage (en die vallen samen met deze uitwateringspunten) nuttig zijn om hard substraat in de omgeving te hebben. In deze omgeving kunnen bestortingen vrij letterlijk als 'stepping stones' fungeren voor diadrome vissoorten tijdens hun migratie naar of uit het zoete water.

## 6.3 Opties voor hard substraat onderwater

De vier typen gebieden in tabel 6.1 en de selectiecriteria uit de voorgaande paragraaf geeft zicht op opties voor bestortingen in de Waddenzee met gevolgen voor ecologische rijkdom. We maken daarbij onderscheid tussen hard substraat op locaties waar al bestortingen aanwezig zijn en hard substraat op plekken waar dat nog niet of in beperkte mate aanwezig is. In figuur 6.3 zijn de locaties gemarkeerd, hieronder worden de verschillende categorieën toegelicht.

### **A. Bestaande locaties met bestortingen nabij de zeegaten**

De locaties met bestortingen nabij de zeegaten worden gekenmerkt door hoge stroomsnelheden, relatief lage sedimentconcentraties in de waterkolom en beperkte variaties in de saliniteit. De kans op bedekking door sediment is afhankelijk van de lokale aanvoer van zand en de morfologische veranderingen. Juist bij zeegaten, die in de direct nabijheid liggen van de buitendelta met verplaatsende geulen en platen, kan sprake zijn van tijdelijke veranderingen in de aanvoer van zand.

In vrijwel alle gevallen zijn de bestortingen aangebracht om het verplaatsen van geulen tegen te gaan en om de helling van de onderwateroever te stabiliseren. Daar waar onderhoud of uitbreiding van bestortingen noodzakelijk is, kan worden nagedacht over een optimalisatie ten bate van de ecologische functie van de bestortingen. Dat kan bijvoorbeeld door het aanbrengen van een ecologische toplaag, eventueel in combinatie met ruimtelijke differentiatie daarin.

#### **B. Bestaande locaties met bestortingen in havens (niet in figuur 7.3)**

Locaties in havens worden gekenmerkt door relatief lage sedimentconcentraties in de waterkolom en lage stroomsnelheden. De eventuele variaties in de saliniteit zijn afhankelijk van de locatie van de haven en de aan- of afwezigheid van lokale uitwateringspunten in de haven. Opgemerkt wordt dat in vergelijking met de andere harde structuren in havens, de bestortingen het minst soortenrijk zijn (figuur 4.5). Daar waar onderhoud, aanpassingen of uitbreiding van havens worden voorzien, kan worden nagedacht over ecologische optimalisatie van de bestortingen.

#### **C. Locaties in de nabijheid van vispassages**

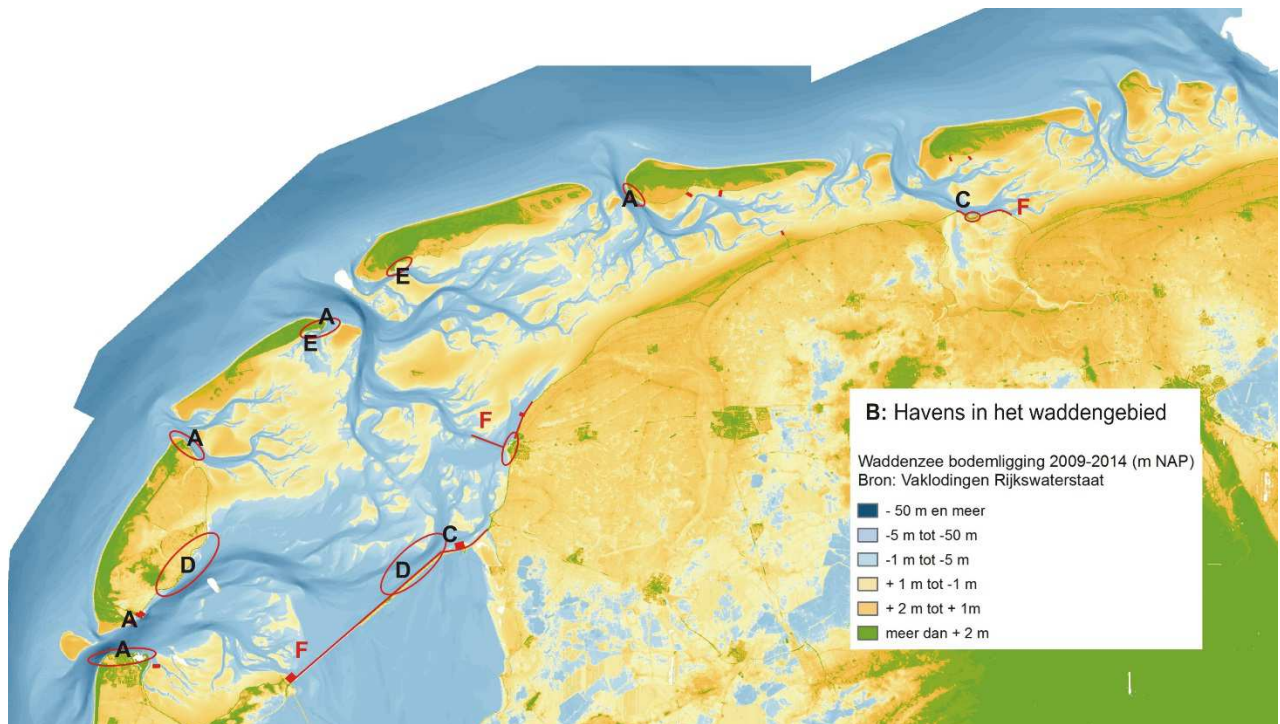
In de nabijheid van vispassages kunnen bestortingen fungeren als schuilgelegenheid voor de 'passanten'. zodat migrerende vissen zich veilig kunnen aanpassen aan het veranderende zoutgehalte. In de kaart zijn de twee gebieden aangegeven waar dit zinvol kan zijn: Nabij Kornwerderzand en nabij de Lauwersoog. Bij deze twee gebieden vindt geen structurele sedimentatie plaats, zodat de bestortingen niet onder het sediment begraven raken en hun functie kunnen behouden. Op andere plekken met een overgang van zoet naar zout water vindt wel structurele sedimentatie plaats (Den Oever, Roptazijl), of ontbreekt het onderwater habitat geheel of vrijwel geheel (bijvoorbeeld bij Noordpolderzijl).

#### **D. Projectlocaties**

Op twee locaties in het Waddengebied zijn grote werken in voorbereiding die mogelijk werkzaamheden aan bestortingen met zich mee brengen. Het gaat om de versterking van de Afsluitdijk en om de versterking van de Texelse Waddenzeedijk (met inbegrip van de zandige versterking van de Prins Hendrik zeedijk). Bij de Afsluitdijk is alleen het oostelijke deel relevant voor de beschouwing, om daar geen structurele sedimentatie plaatsvindt. Bij de Afsluitdijk zijn de abiotische condities minder gunstig, vanwege de hogere slibgehalten in de waterkolom en de grote schommelingen in de saliniteit. Bij de Waddenzeedijk in Texel zijn de abiotische condities beter, met lagere slibconcentraties in de waterkolom. Daar waar bij deze projecten onderhoud of uitbreiding van bestortingen noodzakelijk is, kan worden nagedacht over een optimalisatie ten bate van de ecologische functie van de bestortingen. Dat kan bijvoorbeeld door de keuze van het aan te brengen materiaal, het aanbrengen van een ecologische toplaag en eventueel de combinatie met ruimtelijke differentiatie in bestortingen.

#### **E. "Overige" bestaande locaties met bestortingen**

Bij de Vliesloot aan de zuidzijde van Vlieland liggen bestortingen die niet zo aangrenzend bij het Zeegat van het Vlie liggen dat deze onder categorie A kunnen worden gevat. Maar deze bestortingen liggen wel dermate dicht bij het zeegat dat de abiotische condities waarschijnlijk relatief gunstig zijn, met lage sediment concentraties in de waterkolom. Voor de buitenzijde van de havendam bij West-Terschelling geldt hetzelfde. Ook voor deze bestortingen geldt dat bij onderhoud en eventuele uitbreiding gedacht kan worden aan optimalisatie ten bate van de ecologie.



Figuur 6.3 Locatiekaart voor bestortingen, toelichting in de tekst .

#### F. Minder kansrijke bestaande locaties met bestortingen

De locaties in de omgeving van Harlingen tot en met Roptazijl, met inbegrip van de Pollendam hebben minder aantrekkelijke abiotische omstandigheden voor bestortingen. De concentratie sediment in het water is relatief hoog en er treden grote variaties op in de saliniteit. Ten oosten van Harlingen vindt in het Kimstergat structureel sedimentatie plaats, zodat de bestortingen mogelijk bedekt zullen worden door sediment. De Lauwerszeedijk bij het Vierhuizergat, ten oosten van Lauwersoog ligt dermate ver achter in het kombergingsgebied dat de concentratie sediment in het water relatief hoog is. Voor deze locaties geldt dat de toegevoegde waarde van optimalisatie van de bestortingen voor de ecologie beperkt zal zijn. De abiotische condities en niet de aard van de bestortingen leveren hier beperkingen op.

# 7 Discussie; resultaten van de kennistafel

Het rapport concentreert zich vooral op de abiotische condities en de randvoorwaarden voor het ontwikkelen van ecologische meerwaarde op onderwaterbestortingen en minder op de daadwerkelijk ecologische meerwaarde zelf, die gerealiseerd kan worden. Om hier meer inzicht in te krijgen is een kennistafel/workshop georganiseerd waarin morfologen en ecologen samen zijn gebracht.

Aanwezigen kennistafel:

- Gerard Janssen (RWS),
- Martijn de Jong & Rick Timmerman (PRW),
- Arjan Gittenberger (GiMaRIS Marine Research),
- Wouter van der Heij (Waddenvereniging),
- Martin Baptist (WUR)
- Wouter Gotje, Jelmer Cleveringa, Fred Lentink (Arcadis)

Hieronder volgen de belangrijkste resultaten van de discussie.

## 7.1 Wat zijn “Rijke onderwaterbestortingen”?

De basisvraag bij het uitvoeren van bestortingen met een ecologische (sub)doel is de vraag wat het gewenste resultaat is. Hierbij spelen een aantal zaken een rol:

### **Beleidsdoelstellingen Waddennatuur:**

Het beleid voor de Waddennatuur is gericht op een ‘ecosystem based approach’, waarin natuurlijke processen leidend zijn. Er zijn geen specifieke beleidsdoelstellingen die zijn gericht op het harde substraat in de Waddenzee. Sommige genoemde diersoorten in het aanwijzingsbesluit zijn gekoppeld aan hardsubstraat, maar daar in terechtgekomen via de schelpdierbanken (en die zijn weer een onderdeel van habitattypen van zand en slibbodems (H1110A, zie hoofdstuk 4.1).

### **Beleidsdoelstellingen Exoten:**

Hardsubstraat in de Waddenzee wordt mede bevolkt door niet-inheemse soorten (zie hoofdstuk 4.2). In de Waddenzee vormt het sublitorale hardsubstraat zelfs een hot spot voor exoten (bijvoorbeeld in tegenstelling tot de Noordzee, waar het aantal exoten op hard substraat beperkt is). Overigens zijn de locaties die rijk zijn aan exoten ook rijk aan inheemse soorten. Het beleid is gericht op het beperken van negatieve invloeden door (invasieve) exoten. Op basis hiervan zou men kunnen concluderen dat meer hardsubstraat of meer voor exoten geschikt hard substraat niet gewenst is. Mogelijk is het ook ongewenst omdat via de Nederlandse Waddenzee, de Duitse Waddenzee bereikt kan worden. In de Duitse Waddenzee worden bepaalde typen hardsubstraat wel beschermd onder de natuurbeschermingswetgeving. Snellere toestroom van exoten naar de beschermde harde substraten van de Duitse Waddenzee is ongewenst.

### **Biodiversiteit als waarde:**

Het aantal soorten wordt wel gezien als een indicator voor de ecologische rijkdom. Biodiversiteit als doel voor de bestortingen volgt echter niet uit de doelstellingen hierboven. Een belangrijke notie ten aanzien van biodiversiteit is dat het aantal soorten niet persé is gebaat bij meer van hetzelfde. Als het om het aantal verschillende soorten gaat, kunnen bepaalde niches, zoals slibrijke bestortingen en brakwater bepaalde specifieke soorten opleveren. Mozaïeken en patches van (verschillende) harde substraten in verschillende omgeving leveren een plus voor de biodiversiteit.

### **Publiek en maatschappelijke waardering:**

Vanuit de beleving van het publiek en de maatschappij kan een hard substraat dat rijk is aan onderwaterleven zeer gewenst zijn. Dit geldt zeker als er bepaalde ‘icoon’ soorten mee verbonden zijn (Noordzeekreeft, Sepia) of bepaalde functies (paaiplaatsen vis tussen stenen of wier, migratieroutes vis).

Op basis van de beleidsdoelstellingen en de waardering zijn twee typische en tegengestelde keuzes aangemerkt:

1. Bestortingen worden uitgevoerd als een menselijke activiteit waarvoor geen alternatieven beschikbaar zijn. Om de invloed van deze activiteit te mitigeren moet de invloed beperkt worden. Dat betekent zo min mogelijk bewoond hard substraat habitat, door een zo glad en hard mogelijke uitvoering van de bestorting. De rol als stepping stone voor exoten wordt hierdoor ook beperkt.

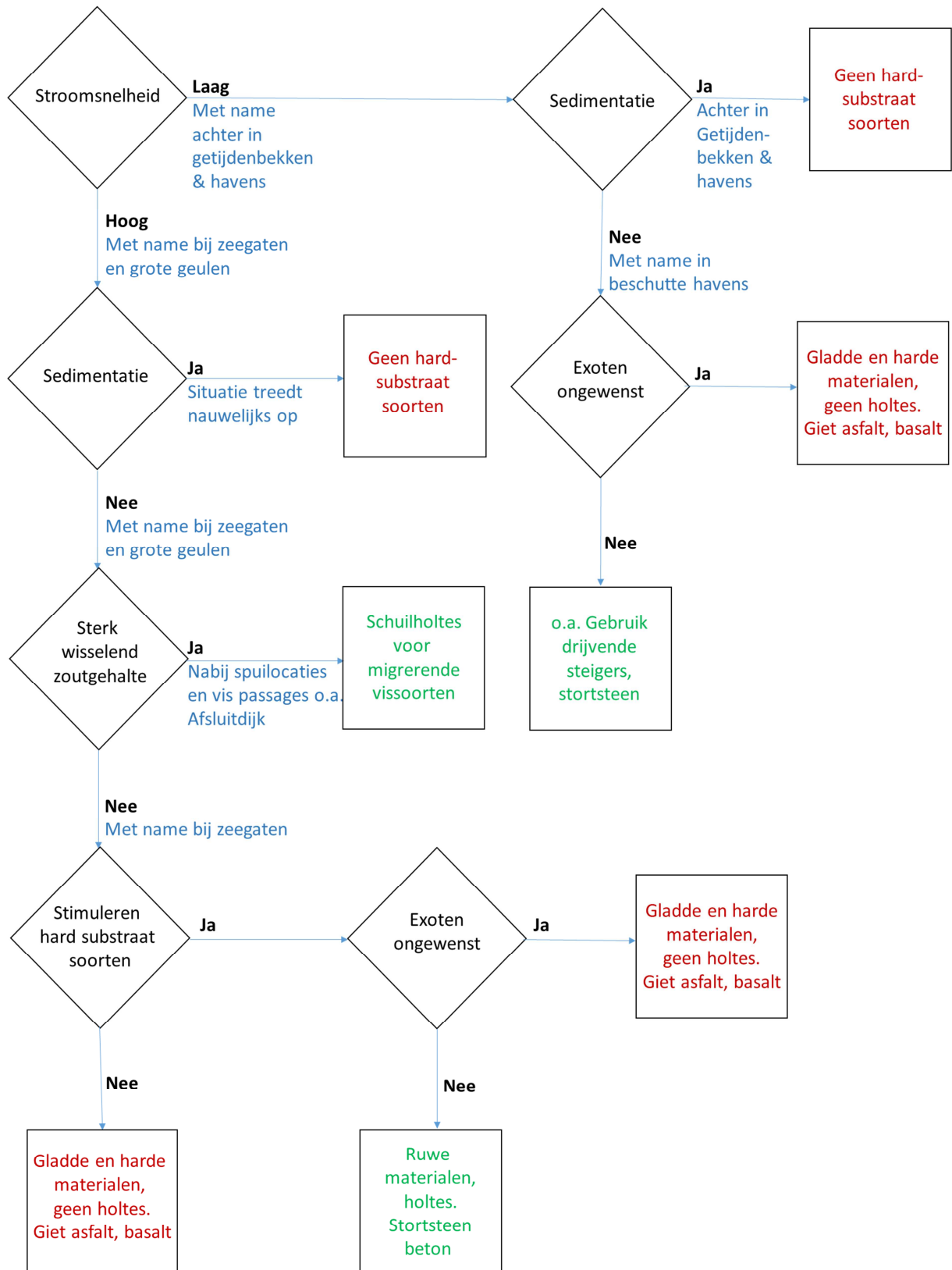
2. Bestortingen zijn toch al getuigen van menselijke ingrepen (die voor een belangrijk deel in het verleden hebben plaatsgevonden). Als die er toch al liggen kun je maar beter je best doen om ze zo interessant mogelijk te maken.

Deze keuzes blijken in de praktijk vooral gekoppeld aan de Westelijke Waddenzee, in de oostelijke Waddenzee zijn de arealen waar al is bestort en nog moeten worden bestort relatief beperkt. Daarbij zijn veel van die locaties dermate rijk aan fijn sediment in de waterkolom dat bedekking met sediment geregeld plaatsvindt.

## 7.2 Beslisboom ten behoeve van het optimaliseren van het hard substraat

Voor het maken van de hierboven genoemde keuzes is een beslisboom opgesteld (zie figuur 7.1). Deze beslisboom komt in de plaats van de kansenkaart, omdat het op grond van de punten in deze paragraaf niet mogelijk is om 'kansen' te definiëren. De beslisboom kan door beheerders worden gebruikt voor het bepalen van kansen en mogelijkheden voor het optimaliseren van hard substraat. De keuze voor het al dan niet toelaten van exoten zal voor ieder project apart moeten worden bekeken. Dit zouden beheerders in samenspraak met experts en NGO's kunnen doen.





Figuur 7.1 Beslisboom voor het bepalen van kansen en mogelijkheden voor optimalisatie van onderwater bestortingen .

## 7.3 Locaties met hardsubstraat in de Waddenzee

Naast de in tabel 2.1 genoemde locaties werden in de kennistafel nog aanvullende locaties genoemd:

- *Bloot gespoelde kabels*: Mogelijk zijn er plekken in de Waddenzee waar bloot gespoelde kabels en leidingen en hun eventuele bescherming hardsubstraat vormt. Er zijn vergevorderde plannen om een bloot gespoelde kabel of leiding naar Vlieland af te dekken met geohooks.
- *Mosselzaadinvanginstallaties*: De infrastructuur voor de Mosselzaadinvanginstallaties (MZI's) is tijdelijk, met inbegrip van de ankerpalen die tegenwoordig worden toegepast.
- *Eems-Dollard*: De Eems-Dollard is buiten het overzicht gehouden, maar dit dient aangevuld te worden in vervolgstudies
- *Zuidwalplatform*: Het Zuidwalplatform staat in een wadplaat en heeft vrijwel geen sublitoraal hardsubstraat.

## 7.4 Waarnemingen aan de biotiek

Door GiMaRIS zijn vier inventarisaties van hardsubstraat uitgevoerd aan de Nederlandse Waddenzee en twee aan de Duitse Waddenzee. Continuïteit in deze waarnemingsreeks is een aandachtspunt, omdat de monitoring die is gericht op exoten geen vaste plaats heeft in een (Rijks)programma.

Niet alle informatie die is verzameld tijdens monitoring is gebruikt in de rapportages. Een deel van deze informatie is nog in ruwe vorm beschikbaar (foto's van de locaties, die de mogelijkheid geven om meer uitspraken te doen over het substraat). Nadere analyse van deze gegevens is nog mogelijk, om meer inzicht te krijgen in de relaties tussen abiotische kenmerken van de standplaatsen en de waargenomen soorten (zie ook voetnoot in hoofdstuk 4.3).

## 7.5 Abiotische factoren

Gegevens over de temperatuur missen nog in de overzichten, maar is mogelijk een belangrijke abiotische parameter.

De saliniteit in de rapportages van GiMaRIS zijn momentopnames tijdens de bemonstering. De wens bestaat om ook de veranderingen in saliniteit en temperatuur te meten. De variaties in beiden, maar vooral de snelheid van de veranderingen zijn waarschijnlijker bepalender factoren dan de absolute waarden.

Opwarming en klimaatverandering lijken nog geen rol te spelen in de ontwikkelingen van soorten. Hoewel regelmatig wordt gemeld dat een zuidelijke soort zijn opwachting heeft gemaakt in noordelijker wateren, blijkt bij nadere analyse vaak een complexer beeld. Hierbij speelt ook een signaleringsbias: het waarnemen van een noordelijke soort wordt zelden als nieuwsfeit gemeld. De belemmerde klimaatfactor lijkt vooral de winterkou te zijn. Mogelijk zal klimaatverandering in de toekomst een grotere rol gaan spelen, via de temperatuur en de veranderingen in de zoetwaterafvoer (grotere piekafvoeren).

## 7.6 Materialen en technieken

### Staalslakken

De toepassing van staalslakken als bestortingsmateriaal (zoals in ieder geval sinds de jaren '70 plaatsvindt) is controversieel, omdat nog steeds niet duidelijk is of en welke invloed de uitloging van verschillende metalen heeft op de (aangehechte) organismen. Het is nl wel duidelijk dat de toepassing van staalslakken leidt tot een toename van metaalgehalten in deze organismen, maar het niet duidelijk of deze toename gevolgen heeft voor de organismen. Deze laatste stap in de keten is uiteindelijk van doorslaggevend belang in de beoordeling van de (ecologische) effecten. Over de invloed van staalslakken in vergelijking met ander materiaal (stortsteen, grind) is een recent WUR rapport verschenen (Foekema et al., 2016). Hieruit blijkt wel dat verschil in uitloging plaatsvindt. De condities van sponzen wordt negatief beïnvloed door de staalslakken, bij de andere organismen treden geen

verschillen op. Opgemerkt wordt dat in China substraat van staalslakken specifiek wordt gemaakt en toegepast voor de oesterteelt. De oesters groeien goed op dit substraat en concurrerende soorten doen het minder goed. De vergelijkingen in het veld van bestortingen met staalslak en stortsteen worden gehinderd doordat andere variabelen (aanwezigheid structuren in de stortsteen) ook een rol spelen in de waargenomen verschillen. Het is daarom niet mogelijk om de gevonden verschillende te herleiden tot de verschillen in het substraat.

De belangrijkste reden voor het toepassen van staalslakken is het prijsverschil met stortsteen. Staalslakken zijn een goedkoper materiaal, omdat het een restproduct betreft (van de staalindustrie).

### **Gietasfalt**

Het toepassen van gietasfalt betekent dat de mogelijkheden voor hardsubstraat organismen worden beperkt: holtes verdwijnen en het oppervlakte aan steen dat beschikbaar is voor het aanhechten neemt af. Gietasfalt wordt zelden tot nooit toegepast onder water bij grote lengtes dijk. Alleen op locaties waar er een waterbouwkundige noodzaak toe bestaat, wordt gietasfalt onder water toegepast, bijvoorbeeld bij sluisen.

### **Andere technieken**

In aanvulling op de genoemde methoden wordt gerefereerd aan Géocorail®: een proces waarbij sediment en zeewater onder een lage stroom worden gezet, waardoor het aanwezige sediment verkit.

Geohooks of Groundconsolidators (GC's) zijn in elkaar hakende constructies die de sedimentatie ter plaatse moeten bevorderen.

Kunstmatig zeegras: mogelijk gebruikt voor het afdekken van scheepswrakken.

Kooiconstructies als safe havens voor jonge vis.

## **7.7 Dijkversterking Texel en Afsluitdijk**

De komende jaren zijn grootschalige dijkherstelwerkzaamheden gepland bij Texel en de Afsluitdijk, die mogelijk kansen bieden voor een natuurvriendelijker uitvoeren zou kunnen worden uitgevoerd.

Bij de keuzes voor de dijkversterking bij Texel wordt de lokale bevolking betrokken. Deze keuzes hebben ook betrekking op de bestortingen. Hierbij geldt wel dat de uiteindelijk ook financiële aspecten worden meegenomen in de keuzes.

De dijkversterking Texel biedt een uitgelezen om een gerichte monitoring uit te voeren naar de ecologische waarden van het hardsubstraat. Op basis hiervan kan de beperkte bestaande kennis worden uitgebreid en wordt het maken van keuzes in de toekomst vereenvoudigd. Hierbij moet worden bedacht welke monitoringstrategie wenselijk is: alle ontwikkelingen van jaar op jaar meten (opmerking Gittenberger), of intensievere na een periode van enkele jaren (opmerking Janssen).

Bij de Afsluitdijk zal naar verwachting de materiaalkeuze meewegen in de gunning van de opdracht voor de uitvoering.

# 8 Conclusies en aanbevelingen

## 8.1 Conclusies

In de Waddenzee zijn op veel plekken bestortingen aanwezig, onder andere bij Den Helder, zuid en noordoost Texel, de Afsluitdijk, Harlingen, de oostzijde van Vlieland, bij de haven van Terschelling, de westzijde van Ameland en bij Lauwersoog. De reden voor het aanbrengen van bestortingen varieert, op sommige plekken is of was het doel het tegengaan van geulverplaatsing, op andere plekken het stabiliseren van de onderwateroever, bij havens de toegang en bruikbaarheid van het haven bekken en op een aantal plekken de afsluiting dan wel inpoldering van delen van kombergingsgebieden. In sommige gevallen wordt al sinds eeuwen (Den Helder) gebruik gemaakt van bestortingen voor het stabiliseren van de geul, op andere locaties is de bestorting van een meer recente datum.

De abiotische condities in de Waddenzee bij de bestortingen verschillen afhankelijk van de positie in de kombergingsgebieden. Nabij de zeegaten zijn de maximale stroomsnelheden hoger en heeft het water een groter doorzicht. Achterin de kombergingsgebieden is het water troebeler en zijn de stroomsnelheden lager. De saliniteit is mede afhankelijk van de nabijheid een uitwateringslocatie van zoetwater (spuisluis) en het volume zoetwater dat wordt gespuid. De grootste variaties in saliniteit treden op achterin de kombergingsgebieden, waar het zoete water in de Waddenzee terechtkomt. De mate van sedimentatie en daarmee de kans op bedekking van de bestorting si in sommige gebieden groot (westzijde Afsluitdijk, Friese vastelandskust) door de grootschalige ontwikkelingen in de Waddenzee. Lokaal kan ook (tijdelijk) veel sedimentatie plaatsvinden is, bijvoorbeeld bij een zeegat door de aanvoer van zand vanaf de buitendelta. Opgemerkt is dat de lokale abiotische condities in havens sterk kunnen afwijken van de omstandigheden in de nabijgelegen Waddenzee.

Waarnemingen aan de soortenrijkdom op een groot aantal locaties met verschillende typen hard substraat (Gittenberger en Rensink, 2012) laten veel variatie zien in de Waddenzee. Het hoogste aantal soorten met het laagste aandeel exoten is te vinden in het Westelijke deel van de Waddenzee. Het is niet mogelijk om een verband te leggen met de abiotische omstandigheden, of met kenmerken van de bestortingen, omdat de waarnemingen daar niet op waren gericht. Desondanks lijkt het erop dat invloed van zoet water nabij de spuilocaties in de Waddenzee de vestiging van exoten bemoeilijkt.

Op basis van waarnemingen en experimenten in andere gebieden zijn opmerkingen te plaatsen bij het type materiaal voor bestortingen. (Natuur-)steen met een redelijke ruw en poreus oppervlak heeft de voorkeur, zodat organismen goed kunnen hechten aan en boren in het gesteente. De aanwezigheid van holten in en tussen het materiaal is positief voor een verscheidenheid aan dieren zoals grondels, botervissen, paling, puitaal en kreeftachtigen. Voor het ontstaan van holtes moet voldoende grof materiaal worden toegepast. Daar waar bestortingen worden toegepast vanuit waterkeringstechnisch oogpunt worden eisen gesteld aan de stabiliteit en daarmee aan de grootte en gewicht (dichtheid), sortering en de eventuele verkitting. Negatieve invloed van het gebruik van staalslakken is tot op heden niet aangetoond.

In tabel 8.1 is een overzicht opgenomen van de opties voor bestortingen die geoptimaliseerd kunnen worden.

Tabel 8.1 Overzicht van opties voor 'rijke' bestortingen (zie figuur 6.3.)

Opties voor bestortingen	Toelichting
A. Bestaande locaties met bestortingen nabij de zeegaten	<p>De locaties met bestortingen nabij de zeegaten worden gekenmerkt door hoge stroomsnelheden, relatief lage sedimentconcentraties in de waterkolom en beperkte variaties in de saliniteit. De kans op bedekking door sediment is afhankelijk van de lokale aanvoer en morfologische veranderingen.</p> <p>Daar waar onderhoud of uitbreiding van bestortingen noodzakelijk is, kan worden nagedacht over een optimalisatie ten bate van de ecologische functie van de bestortingen, bijvoorbeeld</p>

Opties voor bestortingen	Toelichting
	door het aanbrengen van een ecologische toplaag, eventueel in combinatie met ruimtelijke differentiatie daarin.
B. Bestaande locaties met bestortingen in havens	Locaties in havens worden gekenmerkt door relatief lage sedimentconcentraties in de waterkolom en lage stroomsnelheden. Variaties in de saliniteit afhankelijk van de aan- of afwezigheid van lokale uitwateringspunten in de haven. Daar waar onderhoud, aanpassingen of uitbreiding van havens worden voorzien, kan worden nagedacht over ecologische optimalisatie van de bestortingen.
C. Locaties in de nabijheid van vispassages	In de nabijheid van vispassages kunnen bestortingen fungeren als schuilgelegenheid voor de 'passanten'. Dit kan zinvol nabij Kornwerderzand en nabij de Lauwersoog.
D. Projectlocaties	Bij de versterking van de Afsluitdijk en de versterking van de Texelse Waddenzeedijk (met inbegrip van de zandige versterking van de Prins Hendrik zeedijk) worden mogelijk werkzaamheden aan bestortingen uitgevoerd. Daarbij kan worden nagedacht over een optimalisatie ten bate van de ecologische functie van de bestortingen. Dat kan bijvoorbeeld door de keuze van het aan te brengen materiaal, het aanbrengen van een ecologische toplaag en eventueel de combinatie met ruimtelijke differentiatie in bestortingen.
E. "Overige" bestaande locaties met bestortingen	Bij de Vliesloot aan de zuidzijde van Vlieland en de buitenzijde van de havendam bij West-Terschelling liggen bestortingen dermate dicht bij het zeegat dat de abiotische condities waarschijnlijk relatief gunstig zijn, met lage sediment concentraties in de waterkolom. Ook voor deze bestortingen geldt dat bij onderhoud en eventuele uitbreiding gedacht kan worden aan optimalisatie ten bate van de ecologie.
<b>Minder kansrijke optie</b>	
F. Minder kansrijke bestaande locaties met bestortingen	Bij de locaties in de omgeving van Harlingen tot en met Roptazijl, met inbegrip van de Pollendam zijn concentraties sediment in het water is relatief hoog en er treden grote variaties op in de saliniteit. Ook bij de Lauwerszeedijk bij het Vierhuizergat, ten oosten van Lauwersoog, zijn de concentraties sediment in het water relatief hoog. Voor deze locaties geldt dat de toegevoegde waarde van optimalisatie van de bestortingen voor de ecologie beperkt zal zijn.

Aanvullend op de hierboven genoemde opties is er een beslisboom opgesteld (zie figuur 7.1) waarmee beheerders kunnen bepalen of en wat er mogelijk is op locaties waar werkzaamheden aan onderwater bestortingen plaats zullen vinden. Een belangrijk criterium daarbij is hoe er tegen de vestiging van exoten wordt aangekeken. Samen met de inheemse (wenselijke) soorten zullen ook exoten zich gaan vestigen. Voor zover de exoten geen negatieve invloed op het ecosysteem in de Waddenzee als geheel zullen hebben, kan worden overwogen om dergelijke exoten zich te laten vestigen ten faveure van de gewenste inheemse hard substraat soorten.

## 8.2 Aanbevelingen

Met name aan de kant van de ecologie van bestortingen is de basisinformatie beperkt. Voor het maken van afwegingen over bestortingen en de wens dan wel noodzaak voor het ecologisch optimaliseren is meer kennis noodzakelijk. Het betreft daarbij:

Gegevens over de soortenrijkdom en dichtheden (biomassa, aantallen) van verschillende typen bestortingen (verschillende materialen, sorteringen, e.d.) op locaties met uitlopende abiotische condities. Het betreft dus niet alleen de soortenrijkdom (hiervoor zijn aan de hand van de uitgevoerde inventarisaties (Gittenberger en Rensink, 2012) al soortenlijsten op te stellen), maar ook over de abiotische variabelen, inclusief die van het substraat zelf. Dergelijke gegevens maken de weg vrij voor bijvoorbeeld multivariate onderzoek naar de koppeling biotiek-abiotiek. De uitkomsten van dergelijk onderzoek maken het mogelijk om sturende factoren door te vertalen naar optimalisaties van de toepassing van hard substraat.

Bovenstaande vraagt gerichte monitoringscampagnes, waarbij zowel de ecologie, als abiotiek worden bestudeerd. Uitgevoerd en lopend onderzoek in Zeeland, met inbegrip van praktijkproeven, biedt aanknopingspunten. Wel zijn er discrepanties tussen de verspreiding van soorten Zeeland en de Waddenzee omdat verschillende (uitheemse) vissoorten, zakpijpen en sponzen (nog) niet voorkomen in de Waddenzee. Pilots, bijvoorbeeld met verschillende typen hard substraat en op verschillende locaties bieden ook een goede mogelijkheid om de inzichten te vergroten. De aankomende dijkversteking aan de Texelse Waddenzeedijk en de Afsluitdijk bieden kansen voor het monitoren van diverse typen hard substraat en de vestiging van soorten daarop.

In de kennistafel werd als aanbeveling voor de keuze van materialen en de vormgeving onder water aan de beheerders, initiatiefnemers en beslissers meegegeven: "maak het niet te netjes en glad".

Tevens merkten men in de kennistafel op dat in elke processtap rond aanpassingen aan hard substraat er een goede wisselwerking tussen de waterbouwers en ecologen zou moeten plaatsvinden: meer kennis over een weer kan duidelijk maken waar de eisen vanuit de waterbouw en eisen en wensen van de ecologie elkaar ontmoeten.

# 9 Literatuur

- Algemene Rekenkamer, 2013. Waddengebied: natuurbescherming, natuurbeheer en ruimtelijke inrichting.
- Borsje, B.W., van Wesenbeeck, B.K., Dekker, F., Paalvast, P., Bouma, T.J., van Katwijk, M.M., de Vries, M.B., 2011. How ecological engineering can serve in coastal protection. *Ecol. Eng.* doi:10.1016/j.ecoleng.2010.11.027
- Bouma H, Jong D.J. de, Twisk, F., Wolfstein K., 2005. Zoute wateren EcotopenStelsel (ZES.1); Voor het in kaart brengen van het potentiële voorkomen van levensgemeenschappen in zoute en brakke rijkswateren. Rijkswaterstaat Rapport RIKZ/2005.024.
- CBS, PBL, W.U., 2015. Tong en schol in Waddenzee, 1970-2013 (indicator 1238, versie 09, 10 februari 2015). [www.compendiumvoordeleefomgeving.nl](http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl). CBS, Den Haag; Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag/Bilthoven en Wageningen UR, Wageningen. [WWW Document].
- Christianen, M., Holthuijsen, S., van der Zee, E., Govers, L., van der Heide, T., Paoli, H., Olf, H., 2015. Ecotopen- kansrijkdomkaart van de Nederlandse Waddenzee.
- Cleveringa, J., C.G. Israel, en D.W. Dunsbergen, 2005, De Westkust van Ameland. Resultaten van 10 jaar morfologisch onderzoek in het kader van de Rijkswaterstaat programma's KUST2000 en KUST2005. Rapport RIKZ/2005.029. Rijkswaterstaat RIKZ (Den Haag), 74 pp.
- Compton, T.J., Holthuijsen, S., Koolhaas, A., Dekinga, A., ten Horn, J., Smith, J., Galama, Y., Brugge, M., van der Wal, D., van der Meer, J., van der Veer, H.W., Piersma, T., 2013. Distinctly variable mudscapes: Distribution gradients of intertidal macrofauna across the Dutch Wadden Sea. *J. SEA Res.* 82, 103–116. doi:10.1016/j.seares.2013.02.002
- Duran-Matute, M., Gerkema, T., De Boer, G., Nauw, J., Grawe, U., 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. *Ocean Sci.* 10, 611–632.
- Elias, E., van der Spek, A., Wang, Z., de Ronde, J., 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands J. Geosci.*
- Ens, B., Craeymeersch, J., Fey-Hofstede, F., Smaal, A., Brinkman, A., Dekker, R., van der Meer, J., van Stralen, M., 2007. Sublitorale natuurwaarden in de Waddenzee.
- Foekema, E.M., M. van den Heuvel-Greve, C. Sonneveld, G. Hoornsman & A. Blanco, 2016. Uitloging en effecten van metalen uit staalslakken beoordeeld in mesocosms; IMARES Rapport C063/16
- Folmer, E., Beusekom, J., Grawe, U., Katwijk, M., Kolbe, K., Phillipart, C., 2016. Consensus forecasting of intertidal seagrass habitat in the Wadden Sea. *J. Appl. Ecol.* 14.
- Freitas, V., Witte, J., Tulpt, I., van der Veer, H., 2016. Subtidal areas replacing intertidal flats as the main nursery habitat for plaice *Pleuronectes platessa* L. in the western Wadden Sea. *J. Sea Res.*
- Gittenberger, A., Rensing, M., Stegenga, H., Hoeksema, B., 2009. Inventarisatie van de aan hard substraat gerelateerde macroflora en macrofauna in de Nederlandse Waddenzee. GiMaRIS; Rapport GiMaRIS 2009.11, Leiden.
- Gittenberger, A. & M. Rensing, 2011. Nieuwe exoten in de Waddenzee. *De Levende natuur*, themanummer Waddenzee.jaargang 113, no. 3, p. 96-99.
- Gittenberger, A., Rensing M., Dekker, R., Niemantsverdriet, P., Schrieken, N., Stegenga, H., 2015. Native and non-native species of the Dutch Wadden Sea in 2014. GiMaRIS report 2015\_08
- HHNK, 2015a. Sectie 10: Inlaagdijk 't Horntje.

- HHNK, 2015b. sectie 8: Westdijk.
- Kater, B., Snoek, R., G., H., 2010. De relatie tussen abiotiek en macrobenthos in de Waddenzee.
- Leeuwis, R., 2014. Presentatie begroeiing stortmaterialen onder water.
- Prakken, A., van den Heuvel, C., 2008. Evaluatie aanbrengen bestorting onderwaterbeloop Waddendijk Vlieland.
- RWS, 1982. Zeedijk Balumerbocht [WWW Document]. URL [https://beeldbank.rws.nl/RuimtevoordeRivier/MediaObject/Details/DWW\\_247\\_33\\_Waddenzee\\_\\_Ameland\\_\\_zeedijk\\_tussen\\_Ballumerbocht\\_en\\_Nes\\_330530](https://beeldbank.rws.nl/RuimtevoordeRivier/MediaObject/Details/DWW_247_33_Waddenzee__Ameland__zeedijk_tussen_Ballumerbocht_en_Nes_330530)
- Tangelder, M., van den Heuvel-Greve, M., de Kluijver, M., Glorius, S., Jansen, H., 2014. Monitoring vooroeververdediging Oosterschelde en Westerschelde 141.
- Teal, L.R., van Hal, R., van Kooten, T., Ruardij, P., Rijnsdorp, A.D., 2012. Bio-energetics underpins the spatial response of North Sea plaice (*Pleuronectes platessa* L.) and sole (*Solea solea* L.) to climate change. *Glob. Chang. Biol.* 18, 3291–3305. doi:10.1111/j.1365-2486.2012.02795.x
- V&W, M., 1989. Wadatlas 81.
- Van Bendegom, L., 1949. Beschouwingen over de grondslagen van kustverdediging. Rijkswaterstaat, Hoorn.
- Van den Ende, D., E. Brummelhuis, C. van Zweeden, M. van Asch en K. Troost (2015) Mosselbanken en oesterbanken op droogvallende platen in de Nederlandse kustwateren in 2015: bestand en arealen. IMARES rapport C168/15. Van den Heuvel-Greve, M.J., 2009. T0 monitoring van gehalten aan zware metalen in biotamonsters van de Oosterschelde en Westerschelde.
- Van Ledden, M., 2003. Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins. Proefschrift TU Delft.
- Van der Molen, P., 1982. Invloed ingreep Napoleondam op het Balgzandgebied.
- Van der Veer, H.W., Dapper, R., Henderson, P.A., Jung, A.S., Philippart, C.J.M., Witte, J.I.J., Zuur, A.F., 2015. Changes over 50 years in fish fauna of a temperate coastal sea: Degradation of trophic structure and nursery function. *Estuar. Coast. SHELF Sci.* 155, 156–166. doi:10.1016/j.ecss.2014.12.041
- Van Kessel, T., Friocourt, Y., Kuijper, K., Bruens, A., Tonnon, P., van Maren, B., 2010. Slibmodellering kwaliteitsaspecten.
- Van Moorsel, G.W.N.M., 2000. De sublitorale begroeiing van de geulwand-verdediging bij Bath en in het Zuidergat in de Westerschelde in 1999. Bureau Waardenburg bv.
- Verhoog, H., 2009. Alternatief plan vooroeverversterking Zeelandbrug idee / uitgave 27 januari 2009.
- Zwarts, L., 2004. Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee.



**Arcadis Nederland B.V.**

P.O. Box 137

8000 AC Zwolle

The Netherlands

+31 (0) 88 4261 261

**[www.arcadis.com](http://www.arcadis.com)**

Our reference: 9342202



PROGRAMMA **NAAR EEN  
RIJKE WADDENZEE**

Zuidersingel 3, 8911 AV Leeuwarden

[info@rijkwaddenzee.nl](mailto:info@rijkwaddenzee.nl)  
[www.rijkwaddenzee.nl](http://www.rijkwaddenzee.nl)

 [RijkeWaddenzee](#)