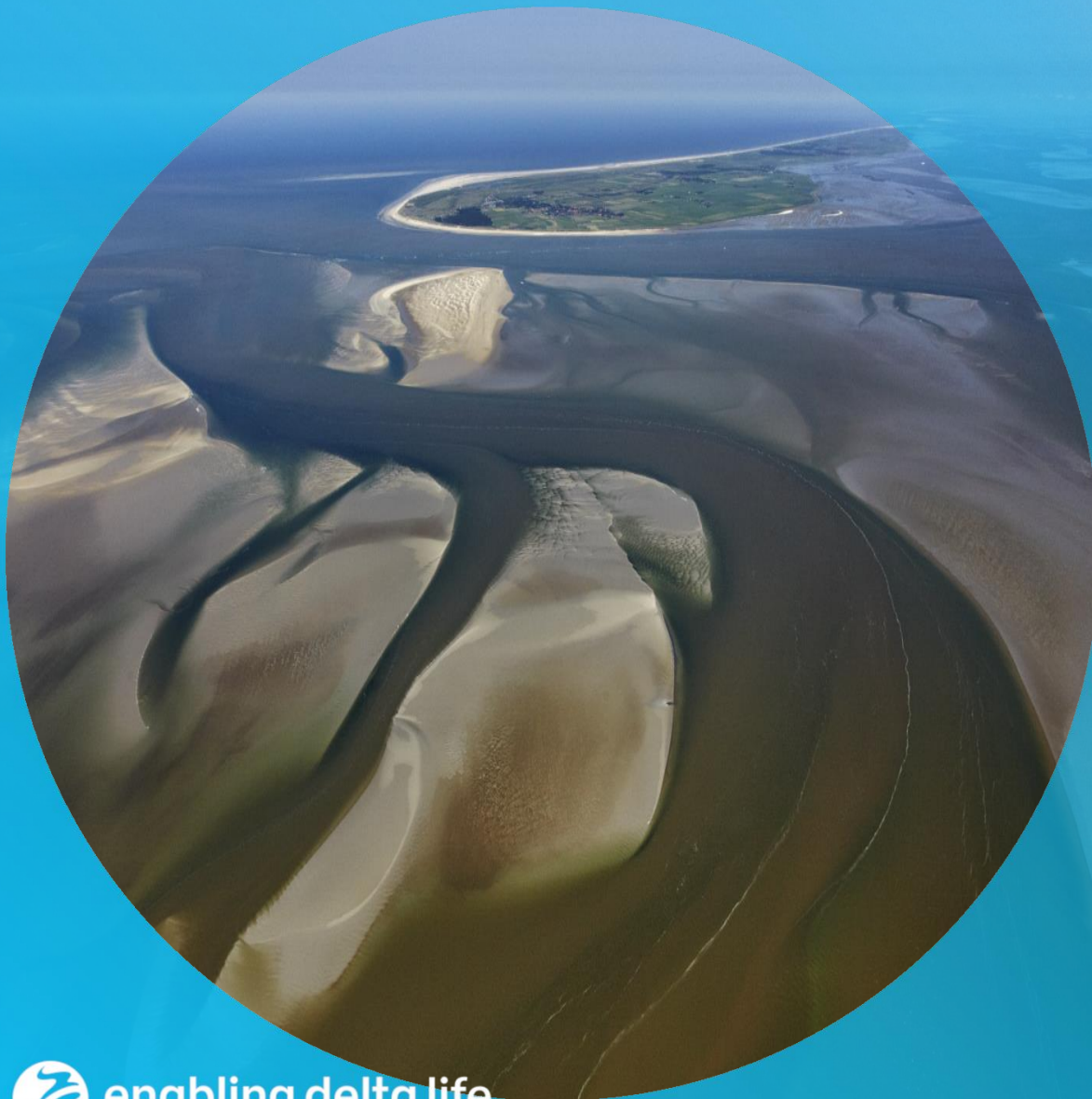


## Technisch advies Rol en Mogelijkheden Buitendelta's voor het Kustbeheer

Ten behoeve van beleidsadvies Kustgenese 2.0



**Technisch advies Rol en Mogelijkheden Buitendelta's voor het Kustbeheer**  
Ten behoeve van beleidsadvies Kustgenese 2.0

**Auteur(s)**

Edwin Elias

Ad van der Spek (A.J.F.)

Zheng Wang

Stuart Pearson

## Technisch advies Rol en Mogelijkheden Buitendelta's voor het Kustbeheer

Ten behoeve van beleidsadvies Kustgenese 2.0





<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Carola van Gelder & Harry de Looff
<b>Referenties</b>	Kustgenese 2.0 met zaaknummer 31123135
<b>Trefwoorden</b>	Kustgenese 2.0, lange termijn kustontwikkeling, zeegaten, Ameland, buitendelta, suppleties

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	18-03-2020
<b>Projectnummer</b>	1220339-009
<b>Document ID</b>	1220339-009-ZKS-0006
<b>Pagina's</b>	32
<b>Status</b>	definitief

### Auteurs

	Edwin Elias	
	Ad van der Spek	
	Zheng-Bing Wang	
	Stuart Pearson	

Doc. Versie	Auteurs	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Edwin Elias 	Marcel Taal 	Toon Segeren 	
	Ad van der Spek	Jelmer Cleveringa (Arcadis) 		
	Zheng-Bing Wang			
	Stuart Pearson			

# Samenvatting

Dit Technisch Advies behandelt de morfologische veranderingen en onderliggende processen van het Amelanders Zeegat en plaatst de inzichten in het licht van het kustbeheer in het algemeen en beheer van buitendelta's in het bijzonder. Het Amelanders Zeegat speelt een prominente rol in Kustgenese 2.0. Zo is in samenwerking met Rijkswaterstaat en het SEAWAD onderzoeksprogramma een groot monitoringsprogramma uitgevoerd en is door Rijkswaterstaat een pilot suppletie op de buitendelta geplaatst.

Dit Technisch Advies draagt bij aan het antwoord op de volgende, door Rijkswaterstaat geformuleerde beleidsvraag: "Wat zijn de mogelijkheden voor suppleties bij buitendelta's en welke meerwaarde kan dit bieden voor het kustbeheer?". Drie vragen zijn concreet beantwoord.

## *Wat is de rol van de buitendelta in het kuststelsel?*

Op de grote schaal, de schaal van de Waddenzee en kustzone, is de buitendelta een zandbuffer, waar grote hoeveelheden zand in opgeslagen zijn of van waaruit zand beschikbaar kan komen. Op de kleinere schaal van individuele zeegaten beïnvloedt de buitendelta de lokale dynamiek van de kustprocessen en vormt een doorgeefluik in de sedimentstroom langs de eilandkusten.

## *Moeten buitendelta's gehandhaafd blijven?*

De Waddenzee met zijn huidige karakteristieken kan alleen in stand gehouden worden als er een balans is tussen de vergroting van de accommodatieruimte van de Waddenzee door (relatieve) zeespiegelstijging, de sedimenttransportcapaciteit door de keel van het zeegat en het zandaanbod vanuit de kustzone. Als er niet voldoende sediment beschikbaar is op de buitendelta, zullen de aanliggende kusten het sediment moeten leveren met kusterosie tot gevolg. Het is het daarom gewenst dat de buitendelta's gehandhaafd blijven op een zodanige omvang dat ze hun functies als doorgeefluik, sedimentbuffer en kustbeschermer kunnen blijven uitoefenen. Met de huidige kennis is het nog moeilijk te zeggen welke minimale omvang hiervoor nodig is.

## *Kunnen de (morfologische processen op de) buitendelta's gebruikt worden voor kustbeheer (zandbuffer, kustlijnhandhaving, suppletie/locatie)?*

De buitendelta vormt een gebied waarop grote hoeveelheden zand kunnen worden aangebracht, bijvoorbeeld in de vorm van een buitendeltasuppletie zoals uitgevoerd bij Ameland. Op grote schaal dragen suppleties altijd bij tot instandhouding van het zandvolume van de buitendelta. Na aanbrengen verspreiden de natuurlijke processen deze sedimenten. Het feit dat het gedrag van de buitendelta gestuurd kan worden door ingrepen op de schaal van individuele banken of geulen, biedt mogelijkheden voor het kustbeheer. Dan moeten de onderliggende processen en mechanismen wel voldoende begrepen worden. Met behulp van buitendeltasuppleties kan ingespeeld worden op de dynamiek van platen en geulen in de buitendelta, zodat meer zand richting de kust beweegt, waar het kustlijnerosie mitigeert, voordat er kustlijnhandhaving nodig is via reguliere suppleties.

Om de processen van het zeegatsysteem te behouden bij zeespiegelstijging is meewerken met de natuurlijke processen de beste manier. Dat pleit voor de keuze voor toepassing van buitendeltasuppleties, die in de toekomst (bij versnelde zeespiegelstijging) mogelijk zelfs een onmisbaar onderdeel van de suppletie strategie kunnen worden.

Dit rapport dient als volgt gerefereerd te worden:

*Deltares (2020): Technisch advies rol en mogelijkheden van buitendelta's voor het kustbeheer; ten behoeve van het beleidsadvies voor Kustgenese 2.0, auteurs Edwin Elias, Ad van der Spek, Zheng Bing Wang en Stuart Pearson; Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0006, in opdracht van Rijkswaterstaat WV, maart 2020.*

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding en doelstelling</b>	<b>6</b>
1.1	Algemene achtergrond Kustgenese 2.0	6
1.2	Vraagstuk van dit Technisch Advies	6
1.3	Leeswijzer	7
<b>2</b>	<b>Achtergrond en inzicht morfologie Zeegat van Ameland</b>	<b>8</b>
2.1	Gebiedsbeschrijving en morfologische kenmerken	8
2.2	De werking van het morfologische systeem; een kwestie van schalen	10
2.3	De werking van het morfologisch systeem: Inzicht vanuit de Kustgenese 2.0 metingen en analyses	12
2.3.1	Processen	12
2.3.2	Bodemveranderingen	13
2.3.3	Een vooruitblik naar de verwachte ontwikkeling van de Boschplaat en de kust van Ameland	15
2.4	Een samenvatting van de inzichten	16
<b>3</b>	<b>Vertaling van de inzichten naar Kustbeheer</b>	<b>19</b>
3.1	Wat is de rol van de buitendelta in het kuststelsel?	19
3.1.1	De buitendelta vormt een zandbuffer.	19
3.1.2	Beïnvloeding van de lokale dynamiek van de kustprocessen	21
3.1.3	Functies van de buitendelta voor de bekkens	21
3.1.4	Doorgeefluik van de kustsedimentstroom	22
3.2	Moeten buitendelta's gehandhaafd worden?	24
3.3	Kunnen de (morfologische processen op de) buitendelta's gebruikt worden voor kustbeheer?	25
3.4	Samenvattende conclusies	26
3.5	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	27
<b>4</b>	<b>Referenties</b>	<b>29</b>

# 1 Inleiding en doelstelling

## 1.1 Algemene achtergrond Kustgenese 2.0

Het Nederlandse kustbeleid heeft als doelstelling een veilige, economisch sterke en aantrekkelijke kust (Deltaprogramma Kust, 2013). Om dit te bereiken wordt de kustlijn gehandhaafd en wordt het kustfundament op orde gehouden met zandsuppleties.

In 2020 wil het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat het huidige kustbeleid herijken, waarbij klimaatverandering meegewogen wordt. Om dit besluit te ondersteunen en te onderbouwen wordt in het programma Kustgenese 2.0 de kennis van de kust verder ontwikkeld.

## 1.2 Vraagstuk van dit Technisch Advies

Dit Technisch Advies draagt bij aan het antwoord op de volgende, door Rijkswaterstaat geformuleerde beleidsvraag:

**“Wat zijn de mogelijkheden voor suppleties bij buitendelta’s en welke meerwaarde kan dit bieden voor het kustbeheer?”**

De bijdrage van dit Technisch Advies bestaat uit het beantwoorden van de volgende vragen:

- Wat is de rol van de buitendelta in het kuststelsel?
- Moeten buitendelta’s gehandhaafd blijven?
- Kunnen de (morfologische processen op de) buitendelta’s gebruikt worden voor kustbeheer (zandbuffer, kustlijnhandhaving, suppletielocatie)?

De rekenregel uit Rijkswaterstaat (2016) is het uitgangspunt voor het bepalen van de sedimentbehoefte van het kustfundament. Een belangrijke component in de rekenregel is het sedimentverlies vanuit het kustfundament richting de Waddenzee. Recente studies laten zien dat over de periode 1935-2015 ongeveer 650-750 miljoen m<sup>3</sup> sediment de Waddenzee in is getransporteerd (Elias *et al.*, 2012; Wang *et al.* 2018; Elias, 2019). Een groot deel van dit sediment (zand) wordt geleverd door de buitendelta’s. De buitendelta’s zijn dan ook sterk in volume afgenomen en in omvang veranderd. Een zandverlies van de buitendelta’s geeft een verlies van zand uit het kustfundament, vanuit dit oogpunt zijn de buitendelta’s dus van direct belang. Een afschatting van de zandverliezen naar de Waddenzee is in het Technisch Advies Sedimentbehoefte Kustfundament (Deltares, 2020) en de onderliggende rapporten Elias (2019) en Elias en Wang (2019) gepresenteerd.

Sinds 1990 is het kustbeheer gericht op dynamisch handhaven van de kustlijn (Rijkswaterstaat, 1990; Hillen & de Haan 1993; Hillen & Roelse, 1995; de Ruig, 1998). Dit Technisch Advies richt zich specifiek op de rol van de buitendelta’s in relatie tot het kustbeheer. Naast de rol van zandbuffer voor het kuststelsel spelen buitendelta’s een actieve rol in de (lokale) dynamiek van de naastliggende eilanden en in de zandtransporten langs de kust. De buitendelta vormt het doorgeefluik voor de sedimentstroom van het bovenstroomse eiland naar het benedenstroomse eiland. Dit proces wordt ook wel *sediment-bypassing* genoemd. Sediment-bypassing gaat vaak gepaard met de vorming en migratie van banken op de buitendelta die uiteindelijk verhelen met het benedenstroomse eiland en hierdoor voor een belangrijk deel de kustlijnontwikkeling van de aanliggende eilanden bepalen. Voor een succesvol kustbeheer is het van cruciaal belang het sediment-bypassing proces goed te begrijpen.

Deze sediment-bypassing speelt zich af op tijd- en ruimteschalen die vergelijkbaar zijn aan die van grootschalige suppleties (miljoenen m<sup>3</sup> en tijdschalen van jaren tot decades). Een beter begrip van de vorming en verplaatsing van de geulen en banken tijdens de sediment-bypassing geeft inzicht in hoe grootschalige suppleties op de buitendelta kunnen werken en toegepast zouden kunnen worden.

Het Amelander Zeegat speelt een prominente rol in het Kustgenese 2.0 programma. Zo is in samenwerking met het SEAWAD onderzoeksprogramma een groot monitoringsprogramma uitgevoerd en is een pilot suppletie op de buitendelta geplaatst. In dit Technisch Advies worden de morfologische veranderingen en onderliggende processen van het Amelander Zeegat behandeld met een doorkijk naar de andere zeegaten in het Waddengebied

### 1.3 Leeswijzer

Dit Technisch Advies is een slotstuk van het onderzoek Lange Termijn Kustontwikkeling dat Deltares heeft uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat in het kader van het Kustgenese 2.0 programma. Van februari 2017 tot december 2019 zijn samenhangende deelonderzoeken uitgevoerd om de systeemkennis te vergroten door een combinatie van beschikbare data en kennis, nieuwe monitoring en nieuwe modellering. Dit Technisch Advies beperkt zich tot het beantwoorden van de vragen in paragraaf 1.2.

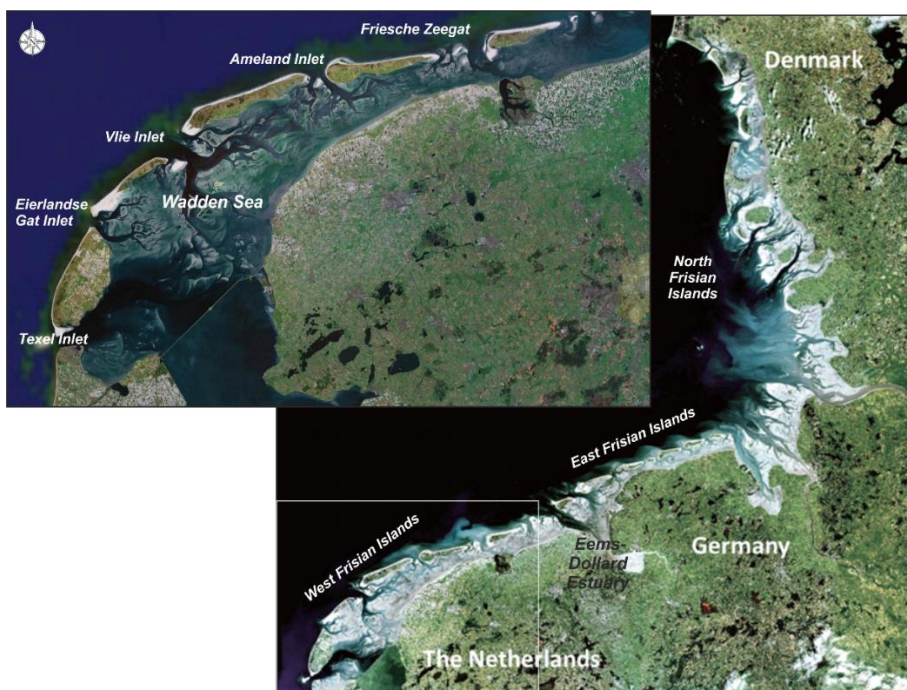
Hoofdstuk 2 geeft een korte beschrijving van de morfologie van het Amelander Zeegat en van de werking van het morfologisch systeem op basis van het Kustgenese 2.0 onderzoek en daaraan voorafgaande kennis. In hoofdstuk 3 wordt de werking van het morfologische systeem vertaald naar inzichten voor kustbeheer, zowel de rol van de buitendelta in het kustbeheer als de mogelijkheden van beheer door middel van suppleties.



## 2 Achtergrond en inzicht morfologie Zeegat van Ameland

### 2.1 Gebiedsbeschrijving en morfologische kenmerken

De Waddenzee strekt zich langs de Nederlandse, Duitse en Deense Noordzeekust uit over een afstand van bijna 500 km (Figuur 2-1). Het Nederlandse deel van de Waddenzee bestaat uit vijf grote zeegaten, van west naar oost, respectievelijk het Zeegat van Texel, het Eierlandse Gat, het Zeegat van het Vlie, het Amelander Zeegat en het Friesche Zeegat en een gebied van kleinere dynamische zeegaten ten oosten van Schiermonnikoog en het Eems-Dollard estuarium. Eigenlijk kunnen alleen de kleine zeegaten ten oosten van Schiermonnikoog nog vrij bewegen. Met uitzondering van het Friesche Zeegat is bij alle grote zeegaten één van de eilandkoppen door menselijke ingrepen vastgelegd.



Figuur 2-1: Een overzicht van de Waddenzee en de vijf grote zeegaten van het Nederlandse deel van de Waddenzee (gebaseerd op een foto van [www.waddensea-secretariat.org](http://www.waddensea-secretariat.org)).

Karakteristiek voor de Waddenzee is het complex van geulen en platen dat zich zowel in de Waddenzee als aan de voorliggende kust bevindt. Ieder getij worden grote hoeveelheden water en zand door het zeegat geperst. In het bekken vormen zich zo de voor de Waddenzee karakteristieke vertakkende geulstructuren met tussenliggende plaatoppervlakten (de *flood-tidal delta* ofwel binnendelta). De intergetijdeplaten komen vooral in het oostelijke deel van de Waddenzee voor. Het westelijke deel en met name het bekken van het Zeegat van Texel is relatief diep met weinig intergetijdenplaten. Aan de zeewaartse zijde van de zeegaten zijn grote zandvolumes aanwezig, de zogenaamde *ebb-tidal deltas* of buitendelta's. Ook deze buitendelta's worden gekenmerkt door de aanwezigheid van geulen en platen. Hier vallen de platen bij laagwater niet droog en spelen ook de golven een belangrijke rol in de ligging en de verplaatsing van de geulen en platen. De geul-plaat verplaatsingen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland zijn de focus van dit Technisch Advies. Eén van de redenen voor de keuze voor het Zeegat van Ameland is dat dit zeegat gezien wordt als een natuurlijk systeem; het huidige gedrag van het zeegat wordt niet gedomineerd door

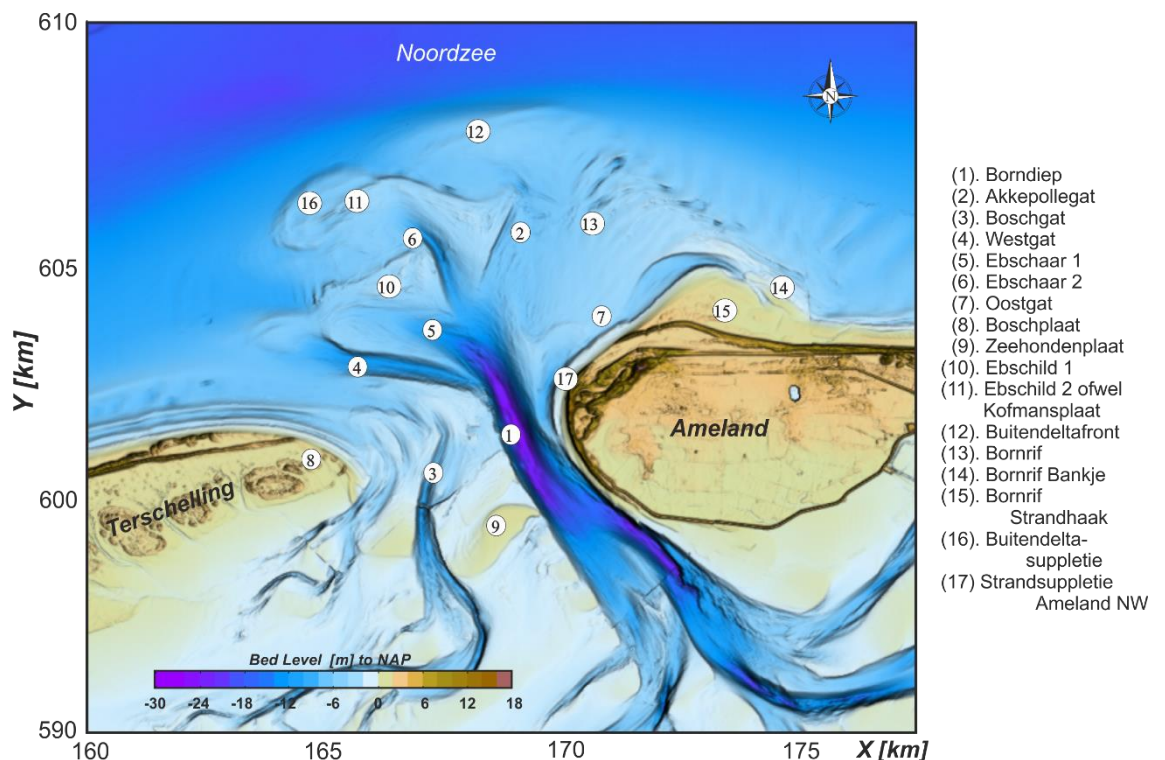


grootschalige menselijke ingrepen. Met uitzondering van de kop van Ameland welke vastgelegd is door geulwandverdedigingen, hebben de natuurlijke processen vrij spel.

De belangrijkste geulen en platen van het Amelander Zeegat worden weergegeven in Figuur 2-2 aan de hand van de bodemopname uit 2019. Deze bodem vertoont een duidelijke hoofdgeul aan de oostzijde van het zeegat, langs de westkust van Ameland (het Borndiep [1]). Het Borndiep ging op de buitendelta over in het Akkepollegat [2]. Deze geul is in de bodem van 2019 echter nog nauwelijks te onderscheiden.

Het oostelijke uiteinde van Terschelling wordt Boschplaat [8] genoemd. Aan de zeewaartse zijde hiervan bevindt zich de vloed-gedomineerde geul Westgat [4]. Tussen de Boschplaat en het Borndiep bevindt zich een ondiep gebied waarin diverse kleinere geulen zichtbaar zijn [3]. De grootte van deze geulen varieert door de tijd. Als er een duidelijke geul vormt dan ontstaat er een verbinding tussen de geulen in het bekken en het Westgat (zoals in de jaren 1975 en 1989). Deze verbinding is in het verleden vaak Boschgat [3] genoemd. In het bekken bevindt zich de wat hogere Zeehondenplaat [9]. Deze plaat vormt een scheiding tussen het oostelijke en westelijke deel van het bekken. Het oostelijke deel maakt verbinding met het Borndiep, het westelijke deel met het Boschgat.

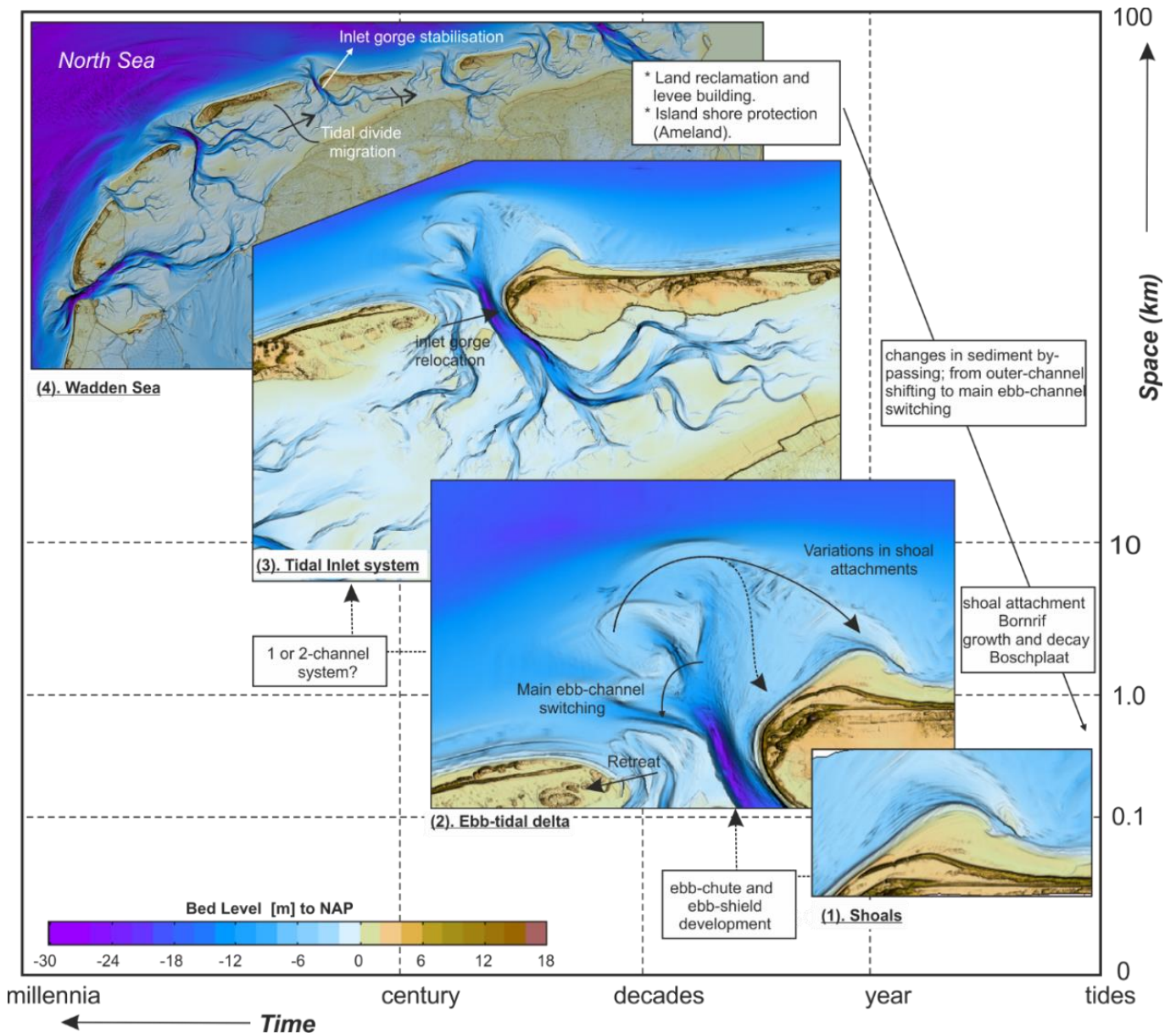
Op de buitendelta bevinden zich drie duidelijke platen [10, 11, 13]. De grootste plaat, Bornrif [13], ligt oostelijk van het Akkepollegat. Als onderdeel van de sediment-bypassing cyclus vormen er zich periodiek op het Bornrif kleinere platen zoals het Bornrif Bankje [14] dat in 2019 is verheeld met de kust van Ameland. De aanlanding van het Bornrif Bankje vond ten oosten van de Bornrif Strandhaak [15] plaats. De westzijde van de buitendelta, tussen Westgat en Akkepollegat, wordt ook wel Kofmansbult genoemd. Op de Kofmansbult hebben zich recent twee ebscharen [5 en 6] met bijbehorende ebschilden gevormd [10 en 11]. Het meest zeewaartse ebschild noemen we de Kofmansplaat [11]. Aan de westzijde hiervan is de buitendeltasuppletie aangelegd [16].



Figuur 2-2: Overzicht van de geulen en platen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland (onderliggende bodem is gebaseerd op de 2019 Vakloding).

## 2.2 De werking van het morfologische systeem; een kwestie van schalen

Een van de knelpunten in de morfologische analyse zijn de verschillen in tijd- en ruimteschalen waarop morfologische processen zich afspelen. Van de morfologische respons door bijvoorbeeld turbulentie op de schaal van seconden, tot stormen op een tijdschaal van dagen en langetermijn kustgedrag door zeespiegelstijging op een tijdschaal van eeuwen. Niet elk proces is op elke tijdschaal belangrijk. Afhankelijk van de schaal van interesse zijn processen soms dominant, slechts ruis, of een randvoorwaarde. De Vriend (1991) gebruikt een "schaalcascade" om de processen en tijd- en ruimteschalen te structureren. Ook voor Ameland is een schaalcascade opgesteld (Figuur 2-3). Deze figuur is specifiek opgesteld om de ontwikkelingen van de buitendelta van Ameland gestructureerd in kaart te brengen. Zo'n cascade is voor ieder zeegat op te stellen, maar de processen en sturende mechanismen zullen voor ieder zeegat afwijken. De grote schaal processen van het zeegat van Texel en het Friesche Zeegat zullen sterk beïnvloed worden door de afsluitingen van respectievelijk de Zuiderzee en de Lauwerszee.



Figuur 2-3: Een schaalcascade voor de dominante processen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland (uit Elias et al. 2019).

De conceptuele schaalcascade omvat vier niveaus van aggregatie: (1) individuele platen of geulen, (2) de buitendelta, (3) het zeegatsysteem, inclusief het getijbekken, en (4) de Waddenzee als geheel. De uitwisseling van hoge naar lagere schaalniveaus is in principe bekend en vormt de basis van de bestaande conceptuele modellen voor zeegaten (o.a. Dean, 1988; Stive en Wang, 2003). De eilandkusten, de buitendelta, de keel van het zeegat en het bekken vormen de elementen van een zanddelend systeem. Deze elementen proberen gezamenlijk een morfodynamisch evenwicht te vinden en te handhaven, dat correspondeert met de hydrodynamische condities. Als er een verstoring in één van de elementen optreedt zal dit ook veranderingen in de andere elementen veroorzaken. De Afsluiting van de Zuiderzee is een goed voorbeeld. Door deze afsluiting is er een grote sedimentbehoefte in de westelijke Waddenzee ontstaan. Hierdoor vinden grote veranderingen plaats op de buitendelta's van het zeegat van Texel, het zeegat van het Vlie en de aanliggende kusten die zand aanleveren om aan de sedimentbehoefte te voldoen (Elias et al. 2012).

In het bekken van Ameland is de huidige oostelijk gekromde ligging van de hoofdgeul een gevolg van het afsluiten van de middeleeuwse Middelzee en het bedijken van het achterland (Van der Spek, 1995). De veranderingen in het bekken hebben er ook toe geleid dat de hoofdgeul in de keel van het zeegat richting Ameland is verplaatst (rond 1926). Deze verplaatsing heeft vervolgens veranderingen in de geulen en platen op de buitendelta geïnitieerd. Het hele systeem reageert op de aanpassing tot er een nieuw dynamisch evenwicht is gevonden. De ligging en ontwikkeling van de geulen en platen vóór en na verplaatsing van de hoofdgeul is duidelijk anders. Dit verschil komt mede doordat het zeegatsysteem geen volledig natuurlijk gedrag kan vertonen. De geul schuift naar het oosten op, maar grootschalige erosie van de eilandkop van Ameland wordt niet toegestaan. Door kustverdedigingswerken (bestorpingen) wordt de westzijde van het eiland gestabiliseerd en het systeem moet een evenwicht vinden met deze, door de mens opgelegde, randvoorwaarde. Dit heeft er bij Ameland voor gezorgd dat de hoofdgeul (Borndiep) nu vast tegen het eiland aanligt en dat de dynamica van de buitendelta ook veranderd is (Elias et al. 2019). Een belangrijke les uit deze analyses is het besef dat niet alleen de grote ingrepen (zoals afsluiten van de Zuiderzee), maar ook de minder grote ingrepen, zoals stabilisatie van de keel van het zeegat, zorgen voor verandering van het gedrag van zeegaten.

Een belangrijke conclusie uit Elias et al. (2019) is dat de ontwikkeling van de buitendelta ook aangedreven kan worden vanuit de kleinste schaal, de individuele banken (zie ook Hoofdstuk 2.3). Dit inzicht geeft een aantal nieuwe uitdagingen. Grootschalig morfologisch gedrag is over het algemeen goed voorspelbaar; de ontwikkelingen gebeuren immers geleidelijk en langzaam. Deze ontwikkelingen kunnen dan met conceptuele modellen, zoals die van de "cyclische ontwikkeling" worden samengevat. Het gedrag op de kleinste schaal is veel minder goed voorspelbaar. Met name het ontstaan van een verstoring welke al dan niet uitgroeit tot een geul-bank systeem vertoont misschien wel bijna een chaotisch gedrag. Toch is de interactie van schalen 1 en 2, de geul-bank schaal en de schaal van de buitendelta wel van rechtstreeks belang voor het kustbeheer. De tijden ruimteschalen van ontwikkeling van geulen en banken zijn van gelijke orde als die van grootschalige suppleties zoals buitendelta- of systeemsuppleties. De tijdschaal waarop deze veranderingen optreden, bijv. onder invloed van sediment-bypassing, is er een van jaren tot decennia en wordt hier verder gedefinieerd als de mesoschaal (schalen 1 en 2 in Figuur 2-3). Het besef dat het gedrag van de buitendelta gestuurd kan worden door ingrepen op de schaal van individuele banken of geulen, biedt nieuwe kansen en mogelijkheden voor het kustbeheer. Als de onderliggende processen en mechanismen voldoende begrepen worden, dan kunnen deze middels buitendeltasuppleties beïnvloed of versterkt worden.

## 2.3 De werking van het morfologisch systeem: Inzicht vanuit de Kustgenese 2.0 metingen en analyses

De Kustgenese 2.0 metingen geven de mogelijkheid om de morfologische veranderingen en de onderliggende processen beter te begrijpen (zie Van der Werf et al. 2019; Elias et al. 2020). Tijdens de meetcampagne van augustus-oktober 2017 is een afwisseling van stormen en kalme perioden opgetreden, waardoor de metingen een goed beeld geven van de verschillende omstandigheden en responses die kunnen optreden. In paragraaf 2.3.1. worden beknopt enkele bevindingen gepresenteerd. Op dit moment zijn de universiteiten in het kader van het SEAWAD programma bezig met de fundamentele analyse van de hydrodynamische metingen en de sedimenttransportmetingen. De analyses en conclusies in deze rapportage zijn met name gebaseerd op de bodemhoogtemetingen (paragraaf 2.3.2). Deze metingen geven een uniek beeld van de morfologische veranderingen van de buitendelta op de mesoschaal.

### 2.3.1 Processen

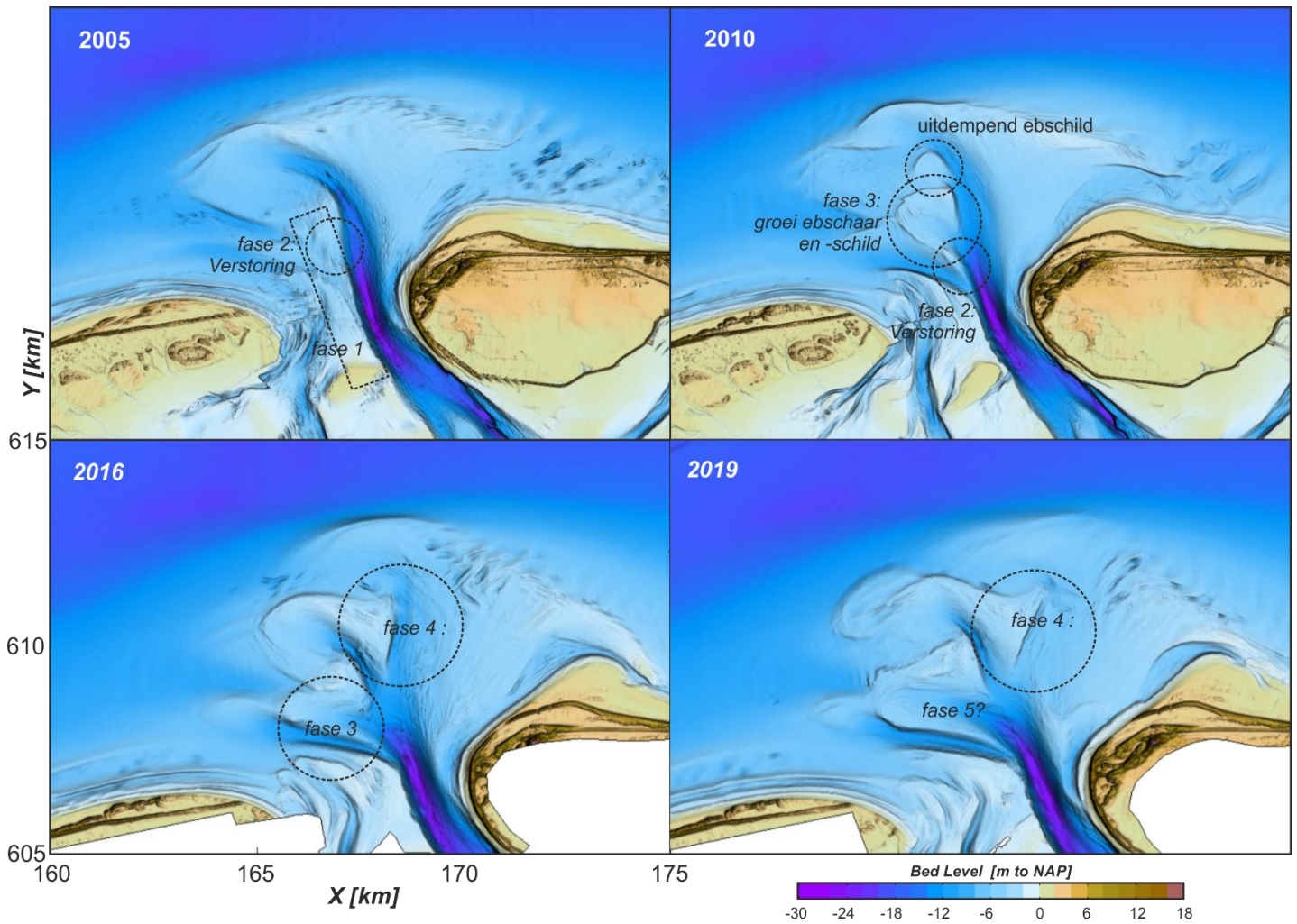
De uitgevoerde stroommetingen in de keel van het zeegat geven inzicht in met name de opgetreden getijstroomsnelheden. Tijdens springtij worden er dieptegemiddelde stroomsnelheden tot 1.35 m/s gemeten. Deze stromingen reduceren tot rond de 0.50 m/s tijdens doortij. Op basis van de drifterexperimenten kan worden geconcludeerd dat er een tweedeling in de uitwisseling van de stroming optreedt. De stroming langs de kust van Terschelling voedt via het Boschgat het westelijke deel van het bekken. De stroming die vanuit het Westgat, of over de buitendelta zeewaarts hiervan, het zeegat bereikt wisselt uit met het Borndiep en het oostelijke deel van het bekken. Tijdens eb de stroming zich via Borndiep dan zeewaarts uit over de buitendelta.

De debietmetingen geven geen duidelijk overheersend restdebiet. De restdebieten zijn klein ten opzichte van de totale eb- en vloeddebieten en afhankelijk van de meting wordt een netto instroom of uitstroom gevonden. Metingen op de wantijen van Terschelling en Ameland laten zien dat er vooral tijdens storm grote stroomsnelheden en debieten over de wantijen optreden. Beide metingen geven aan dat de (residuele) stroming en debieten door het zeegat waarschijnlijk beïnvloed worden door de uitwisseling met een groter deel van de Waddenzee dan alleen het eigen bekken, zoals tot nu toe steeds werd aangenomen (Van Weerdenburg, 2019). De aanname dat de wantijen gesloten randen vormen, lijkt niet juist te zijn.

De uitgevoerde golfmetingen op verschillende locaties op zee en op de buitendelta geven goed inzicht in de golfafschermende werking van de buitendelta. Golfafscherming treedt eigenlijk alleen op tijdens stormcondities. Alleen golven hoger dan 2 meter vertonen een duidelijke afname in hoogte. Lagere golven propageren ongestoord richting de eilandkusten. Aangezien golven over het algemeen lager zijn dan 2 meter, spelen ze dus nog steeds een belangrijke rol in de sedimenttransporten langs de achterliggende kust. Deze rol wordt vaak onderschat. De golfmetingen uitgevoerd in het Akkepollegat – Borndiep laten een duidelijke golf-stroominteractie zien. Tijdens eb neemt de hoogte van de dan tegen de getijstroom inlopende golven significant toe (tot dubbel de golfhoogte) ten opzichte van de golfhoogten tijdens de vloedstroming.

Op basis van de vlakdekkende hoge-resolutie (multibeam) bodemopnamen kunnen de sedimenttransporten vanuit de bodemvormen worden afgeleid. De bodemvormen bevestigen het beeld dat het zeewaartse deel van het Borndiep eb-gedomineerd is. In het Westgat zijn de transporten juist vloed-gedomineerd.





Figuur 2-4: Ontwikkeling van de buitendelta van het Zeegat van Ameland over de periode 1989-2017

### 2.3.2 Bodemveranderingen

Als onderdeel van het Kustgenese 2.0 programma is van een groot deel van de buitendelta de bodemligging iedere 6 maanden opgenomen in de periode 2016-2019. Daarnaast zijn er de 3-jaarlijkse Vaklodingen en aanvullende jaarlijkse bodemmetingen (2006-2010) uitgevoerd vanuit het SBW programma (Zijderveld en Peters, 2006) en zijn de bodemhoogteschattingen op basis van de X-Band radar verbeterd en geoptimaliseerd. De X-Band rader is in staat de morfodynamiek van de buitendelta te reproduceren (Gawehn, 2020). Een serie bodemopnamen van een gehele buitendelta met zo'n hoge meetfrequentie is uniek en biedt de mogelijkheid het kleinschalige gedrag van de geulen en platen in detail te analyseren (Figuur 2-4). Tussen 2005 en 2019 kan aan de hand van deze data de start van een sediment-bypassing cyclus herkend en beschreven worden. Deze analyse laat zien dat de morfodynamiek gedomineerd wordt door de vorming en verplaatsing van verschillende beschaar- en beschild-systemen. Deze initieel kleine verstoringen beïnvloeden vervolgens het gehele gedrag van de buitendelta. De gehele cyclus bestaat uit 5 ontwikkelingsfasen.

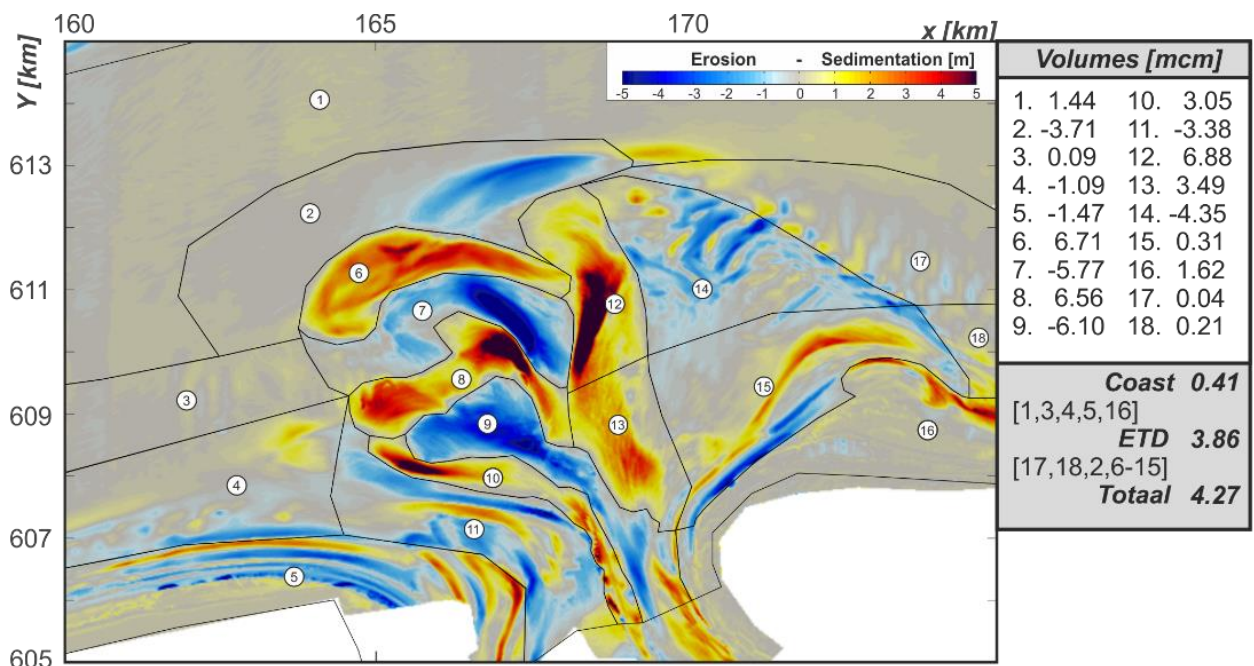
*Fase 1; Sedimentaccumulatie langs de bovenstroomse geulwand van de hoofdgeul. Sedimentaantvoer langs de kust van Terschelling en de lokale erosie van de Boschplaat resulteren in een overvloedige zandtoevoer naar het zeegat. Via het Borndiep wordt een gedeelte hiervan afgezet aan de westelijke zijde van de geul. Hier vormt zich een langgerekte ondiepte of bank (zie Figuur 2-4, 2005 bodem).*

*Fase 2; Vorming van verstoringen.* Op deze bank vormen zich kleine instabiliteiten of verstoringen. Als deze verstoringen verbinding maken met de grote ebstromingen door het Borndiep ontstaat een klein geultje of ebschaar. Het geërodeerde sediment accumuleert zeewaarts van dit geultje in de vorm van een klein ebschild.

*Fase 3; Vorming van ebscharen en ebschilden.* De initieel kleine instabiliteiten groeien daarna snel uit. Een serie ebscharen met ebschilden ontstaat. Deze zijn niet allemaal stabiel. Soms worden ze opgenomen in een ander, nieuw ontwikkelend systeem. De gevormde eb- en vloedchilden beginnen de ontwikkeling van de westelijke zijde van het buitendeltaplatform te bepalen (Figuur 2-4, 2010). De ebscharen ontwikkelen snel, en de ebschilden verplaatsen zich tot 500 m per jaar in zeewaartse richting.

*Fase 4; Geul-plaatinteracties.* Met toenemende groei en zeewaartse verplaatsing van een ebschild worden de lokale golfgedreven transporten steeds belangrijker. Door de vorming van deze grote bank ver zeewaarts op de buitendelta gaan hier steeds meer golven breken. Deze golven genereren een oostwaarts transport en verplaatsen het ebschild oostwaarts. Hierbij begint de bank de voormalige hoofd-eb geul (Akkepollegat) steeds verder naar het oosten te drukken (Figuur 2-4, 2016-2019). In de meest recente bodem van 2019 is het Akkepollegat eigenlijk nauwelijks meer als geul te onderscheiden. Het diepe deel van het Borndiep maakt al verbinding met de meest zuidelijke nieuwe ebschaar.

*Fase 5; Heroriëntatie van de hoofdgeul en benedenstroomse bankaanlanding.* Deze vijfde stap heeft nog niet plaatsgevonden, maar de volgende ontwikkeling ligt voor de hand; met een doorgaande oostelijke verplaatsing van de nieuwe banken wordt het Akkepollegat steeds minder efficiënt als ebgeul. De meest zuidelijke ebschaar heeft een sterker verhang en vormt daarmee een efficiënter alternatief. Deze ebschaar zal zich sterk ontwikkelen als het meer en meer stroming trekt. Uiteindelijk vormt zich een nieuwe hoofd-ebgeul op het westelijke deel van de buitendelta. Het debietverlies van het Akkepollegat zorgt ervoor dat de banken snel kunnen verhelten met het Bornrif en uiteindelijk zal een nieuwe aanlandingsbank gevormd worden. Met aanlanding van deze bank is de sediment-bypassing cyclus voltooid. Het is nog de vraag hoe het Westgat gaat reageren op deze verandering. Een optie is dat het Westgat direct verbinding gaat maken met het Boschgat. Dan ontstaat tijdelijk een twee-geulen systeem zoals dat ook in de periode 1985-1990 te zien was.



Figuur 2-5: Overzicht van de volumeveranderingen van de buitendelta over de periode 31-01-2016 en 18-07-2019.



Naast de ontwikkeling van de ebschaar- en ebschild-systemen geven de halfjaarlijkse Kustgenese 2.0 metingen inzicht in de (seizoens-)variabiliteit van de bodemveranderingen (Figuur 2-5). In de periode 2016-2019 is de totale volumeverandering van de buitendelta +4.27 miljoen m<sup>3</sup>. Daarvan is een deel gerelateerd aan de buitendelta suppletie (5.5 miljoen m<sup>3</sup>) en aan de recent langs de kust van Ameland noordwest uitgevoerde suppletie van 2.76 miljoen m<sup>3</sup>. De netto verandering is klein ten opzichte van de bruto veranderingen. De totale erosie en sedimentatie is met volumes van 26 miljoen m<sup>3</sup> en 30 miljoen m<sup>3</sup> aanzienlijk groter dan de netto veranderingen.

Het zeewaartse deel van de buitendelta is halfjaarlijks opgenomen. Daardoor kunnen we hier een duidelijk verschil in volumeverandering tussen de zomer- en winterperiode onderscheiden. Zo bedraagt de sedimentatie in het Akkepollegat tijdens de zomerperiode 0.2 – 0.7 miljoen m<sup>3</sup>, maar tijdens de winterperiode is dat 2.0 – 2.2 miljoen m<sup>3</sup>. Deze sterke respons op de hogere golven die optreden gedurende het winterseizoen is ook zichtbaar in de erosie van de buitendeltasuppletie (Elias, 2019; Van Rhijn, 2019). Met name onder de wintercondities treedt er hier erosie op. Ook de zeewaartse verplaatsing van de ebschaar-/ebschildsystemen is tijdens de winterperiode aanzienlijk groter dan tijdens de zomerperiode. Alhoewel metingen beperkt zijn, kan deze grotere verplaatsing gerelateerd zijn aan grootschalige verhangen van de waterstand. Tijdens stormen ontstaat er een grootschalig verhang over de Noordzee en Waddenzee. De wantijmetingen laten zien dat er dan ook grote stromingen over het wantij plaatsvinden. Deze stroming veroorzaakt een vergrote reststroming door het zeegat. De getijvolumes door het zeegat nemen dan toe. Vergrote ebstromingen dragen dan bij aan een verdere of vergrote zeewaartse verplaatsing van de ebschild- en ebschaarsystemen.

### 2.3.3

#### **Een vooruitblik naar de verwachte ontwikkeling van de Boschplaat en de kust van Ameland**

Het huidige gedrag van de buitendelta van het Amelanders Zeegat bevindt zich in de laatste fase van *main ebb-channel switching* (zie Hoofdstuk 3 voor een nadere uitleg). De vorming van een nieuwe, westelijk gerichte ebgeul kan in de toekomst de ontwikkeling van de eilandstaart van Terschelling beïnvloeden. De Boschplaat is al sinds 1975 aan het terugtrekken. Er zijn verschillende redenen voor deze terugtrekking aan te wijzen. Zo heeft in de periode 1989-1999 de vorming van een doorgaande geul Boschgat-Westgat voor een sterke terugtrekking gezorgd. Sinds 1999 heeft de terugtrekking waarschijnlijk een andere oorzaak. In principe is de eilandstaart een spit die gevoed wordt door de golfgedreven langstransporten, die netto van west naar oost langs de kust van Terschelling plaatsvinden. In de huidige situatie is de afvoer van sediment van de eilandstaart groter dan de aanvoer. Een reden hiervoor is de relatief diepe voorliggende buitendelta. Hierdoor kunnen golven ver het zeegat binnendringen, waardoor een sterk golfgedreven, netto oostelijk gericht transport optreedt richting het Borndiep. De structureel grotere afvoer dan aanvoer van sediment geeft een doorgaande erosie van de Boschplaat.

Een westelijke ligging van de hoofd-ebgeul zorgt ervoor dat sediment niet richting het centrale deel en de noordelijke rand van de buitendelta getransporteerd wordt, maar juist naar de westzijde van de buitendelta. Hier kan dan plaatgroei en bankopbouw plaatsvinden. Golfbreking op deze banken zorgt voor een verminderde golfaanval langs de Boschplaat en in de keel van het zeegat. Met voldoende golfreductie zou er dan weer een uitgroei van de spit kunnen plaatsvinden. Of plaatgroei gaat plaatsvinden is verre van zeker. Door een grotere ebdominantie net ten noorden van het Westgat, komt de vloedstroming door het Westgat in de verdrinking. Een hernieuwde verbinding met het Boschgat, zoals dat ook in het verleden wel is opgetreden, is op zich een logische ontwikkeling.

Op de eilandkop van Ameland zullen ook in de toekomst platen aanlanden. De grote zandvolumes van de ebschilden op de Kofmansbult vormen een toekomstige bron van zand voor het Bornrif. Hoe de zanduitwisseling met het Bornrif precies gaat plaatsvinden is nog niet te voorspellen. Uit de voorgaande aanlandingen van de Bornrif Strandhaak en het Bornrif Bankje kan al afgeleid worden dat plaataanlandingen duidelijk kunnen verschillen in vorm en ontwikkeling. De Bornrif Strandhaak

vormde zich op het centrale deel van de buitendelta en landde aan nabij de kop van het eiland. Deze aanlanding gaf daar instantaan een grote zeewaartse sprong van de kustlijn. Deze uitstulping verspreidde zich vervolgens langzaam oostwaarts en voedde de kust van Ameland gedurende een lange periode. Het Bornrif Bankje ontwikkelde zich anders. Dit bankje verplaatste zich niet over de buitendelta, maar langs de buitenrand van de delta. De aanlanding vond plaats oostelijk van de Strandhaak. Het aangelande zand voedt het centrale deel van het eiland, maar helpt niet tegen de erosie van Ameland Noordwest.

Op dit moment overheerst voeding van het Bornrif door oostwaartse sedimenttransporten vanaf de ebschilden. Dit zou zich voort kunnen zetten waarbij de banken dan langzaam versmelten met het Bornrif. Op het Bornrif verplaatst het zand zich landwaarts en accumuleert dan vervolgens in banken die direct voor de kust van Ameland liggen. Voordat deze banken kunnen aanlanden vormt zich vaak een geul tussen de banken en de kust. De getijstrooming perst zich tussen de bank en de kust vormt zo een geul welke het aanlandingsproces vertraagt. Deze geulen komen vaak voor, ook op de andere buitendelta's, en zijn dan een oorzaak van een langere periode van kusterosie op de kop van het aanliggende eiland. De aanlandingsbank van de Bornrif Strandhaak was al in 1970 te zien, maar het duurde tot 1986 voor dat de aanlanding plaatsvond en de kust uitbouwde.

Gezien de grootte en huidige hoogte van de ebschilden, die duidelijk boven de gemiddelde hoogte van de buitendelta uitsteken, is het ook mogelijk dat deze banken niet opgaan in het Bornrif platform. Deze banken zouden zich kunnen handhaven en als ondiepte, als autonome bank, over het Bornrif platform richting de kust van Ameland verplaatsen. De aanlanding van de bank Onrust op de westpunt van Texel is een goed voorbeeld van dit soort proces (Elias, 2006: Hoofdstuk 2, pag. 40).

## 2.4 Een samenvatting van de inzichten

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de combinatie van procesmetingen en gedetailleerde, hoogfrequente bodemopnamen, het mogelijk maakt de morfodynamiek van de buitendelta van het Zeegat van Ameland beter te beschrijven. Op basis van de verkregen inzichten is de buitendelta in te delen in verschillende zones, waarin het gedrag of de onderliggende processen verschillen (Figuur 2-6).

*Zone I – Eilandkust bovenstrooms (Terschelling);* Hier vormt het langstransport en de erosie van de staart van het eiland een bron van zand voor het zeegat. Zowel getij als golven spelen hier een rol. Golfbreking en golfgedreven transporten zijn belangrijk langs de eilandkust. Met een dominante oostelijk gerichte golfenergie zijn deze transporten ook oostelijk gericht. Richting het zeegat wordt het oostelijk transport versterkt door de vloeddominante getijstrooming. Deze transporten voeden het ondiepe platform (zone II).

*Zone II – Ondiepe platform van het Boschgat;* Tussen de staart van Terschelling, de Boschplaat, en de hoofdgeul Borndiep bevindt zich een ondiep platform, doorsneden door verschillende kleine geultjes, gescheiden door kleine banken. Deze geultjes en banken vertonen een grote variabiliteit, maar het onderliggende platform is min of meer stabiel. De eb- enloedstroming verplaatsen bruto veel zand tussen bekken en buitendelta, met een netto oostwaartse component richting het Borndiep. Deze oostelijke netto component wordt waarschijnlijk ten dele veroorzaakt door de relatief diepe, voorliggende buitendelta. Hierdoor breken veel golven op het ondiepe platform. Zodra het zand het Borndiep bereikt, wordt het naar de buitendelta of het oostelijke deel van het bekken getransporteerd, maar niet terug richting de Boschplaat. Dit betekent dat er een structureel verlies optreedt. Zolang dit verlies groter is dan de aanvoer vanaf de kustzone, zal Boschplaat eroderen.

*Zone III – Ebscharen en ebschilden;* De westelijke zijde van de buitendelta is een accumulatiezone van sediment. De hoofdgeul in de zeegaten van de Waddenzee heeft in essentie dominante, westelijk gerichte uitstroming (Sha, 1989). De ebstroming zorgt voor een toevoer van sediment en er worden (mesoschaal) banken gevormd. Deze banken kunnen verschillende vormen hebben.

Vanaf 2005 zijn deze banken zichtbaar in de vorm van twee ebscharen met bijbehorende ebschilden. Deze systemen domineren sindsdien een belangrijk deel van de buitendelta-morfodynamiek. De groei en zeewaartse uitbouw van deze twee systemen heeft uiteindelijk de hoofdgeul (Akkepollegat) verdrongen en op deze locatie zal zich waarschijnlijk in de nabije toekomst een nieuwe, meer westelijk gerichte ebgeul ontwikkelen. Met deze nieuwe hoofdgeul zal de dynamiek van de buitendelta op mesoschaal waarschijnlijk verschillen van de ontwikkelingen die in de periode 2005-2019 zijn opgetreden.

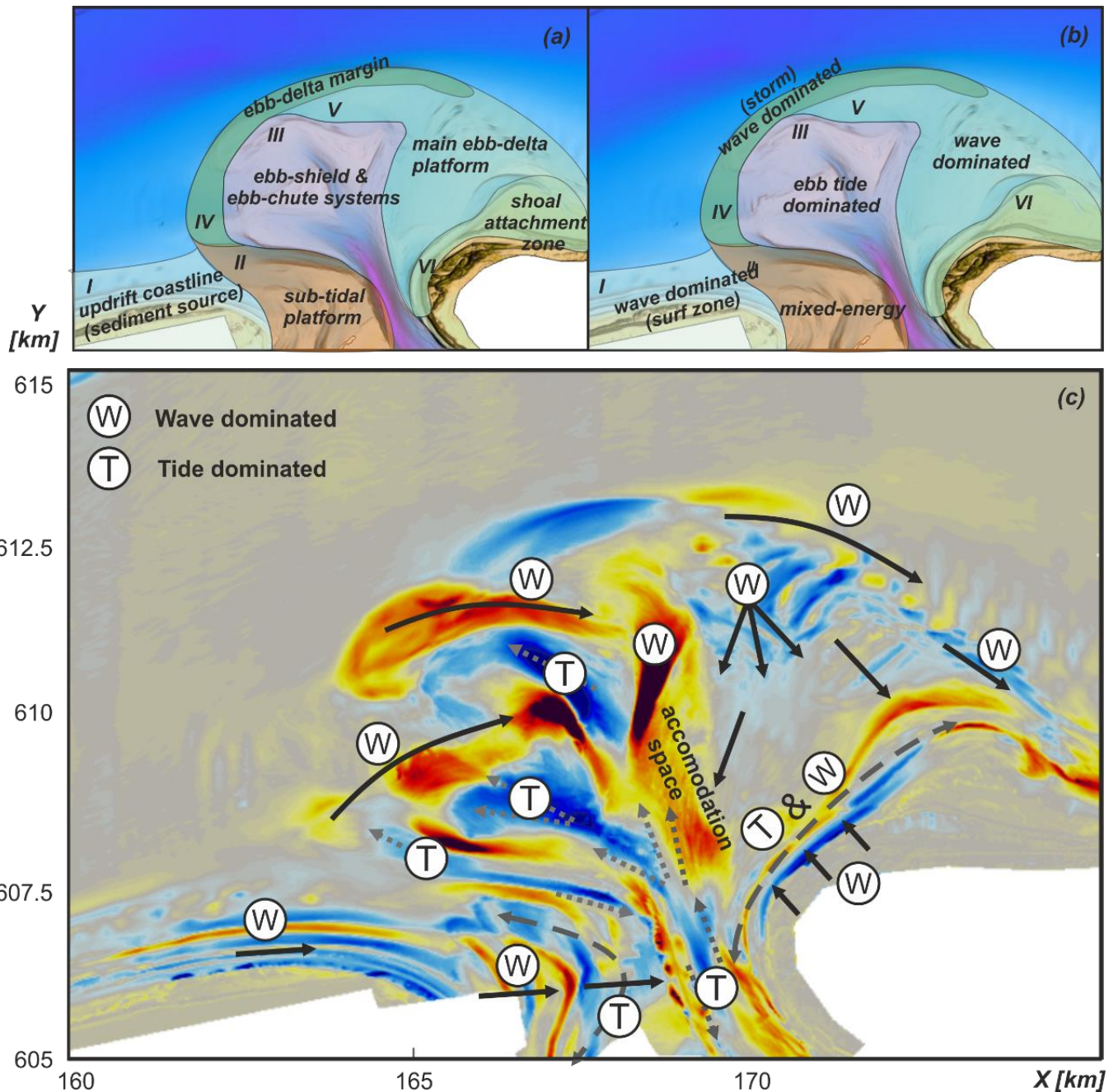
*Zone IV – Rand van de buitendelta;* De rand van de buitendelta is op zich geen apart morfologisch onderdeel, maar de processen zijn hier wel anders. Veranderingen aan de buitenkant doen zich vooral voor tijdens stormcondities. Het merendeel van de tijd kan door de ebstroom aangevoerd sediment bezinken op de zeewaartse zijde van de ebschilden, als gevolg van de relatief lage golven. Tijdens (winter)stormen breken de golven op deze relatief ondiepe banken. De banken worden geërodeerd en het vrijkomende zand verplaatst zich als een zandpuls naar het oosten, richting het Bornrif platform. Na een storm is de buitendeltarand dan inactief omdat hij te diep ligt voor normale condities. Het dominante transport is dan waarschijnlijk gerelateerd aan de open zee getijstroming die langs de rand van de buitendelta versnelt. Door de vorming van de ebschilden vindt er wel veel plaatopbouw plaats in de ebschilden maar de aanvoer naar de buitendeltarand is beperkt. NB. Zone IV is de zone waarin de pilotsuppletie Amelander Zeegat is aangelegd.

*Zone V – Buitendeltaplatform (Bornrif);* Het dominante zandvolume bevindt zich stroomafwaarts van de hoofdebgeul. Met een zeewaarts gericht Akkepollegat wordt er sediment aan de noordkant van de buitendelta afgezet en wordt dit platform rechtstreeks gevoed door de hoofdebgeul. Sediment dat aan de zeezijde wordt afgezet, wordt door de golfgedreven transporten het Bornrif op getransporteerd. Op het Bornrif verplaatst dit sediment zich landwaarts tot het bij de kust banken gaat vormen. Zodra deze banken groot genoeg zijn, een proces dat vele jaren kan duren, kunnen ze op verhelen met de kust (bijv. de aanlanding van de Bornrif Strandhaak). Deze ontwikkeling is sinds 2005 slechts beperkt waar te nemen. In de periode 2005-2019 verliest het Akkepollegat in toenemende mate zijn stroomvoerende en sediment transporterende functie waardoor de voeding van het Bornrif platform afneemt. Sediment accumuleert nu vooral in de ebschilden aan de westzijde van de buitendelta. Vanaf deze ebschilden vindt er een golfgedreven transport plaats richting het Bornrif. Het is echter waarschijnlijk dat de toekomstige ontwikkeling van het Bornrif door de verplaatsing van de ebschilden zal worden gedomineerd. Zodra Akkepollegat zich verlegt naar het westen, worden de ebschilden onderdeel van het benedenstroomse platform en dus onderdeel van het Bornrif. Gezien de grootte van de ebschilden is het mogelijk dat deze niet volledig dissiperen en opgaan in het Bornrifplatform, maar zich als autonome bank over het platform richting kust gaan verplaatsen. Dit kan uiteindelijk leiden in vorming van een nieuwe aanlandingsbank.

*Zone VI – Aanlandingsgebied van banken;* De noordwestzijde van Ameland is het aanlandingsgebied van de buitendeltabanken. Dit gebied groeit stapsgewijs aan. Door aanlanding van een bank (bijv. Bornrif Strandhaak) bouwt de kust instantaan zeewaarts uit. Daarna begint er een periode van langdurige (jaren tot decennia) erosie. De erosie is vaak maximaal vlak voor aanlanding van de bank omdat er dan een geul tussen de bank en de kust vormt. Deze geul zorgt tijdelijk voor extra kusterosie.

Alhoewel de eilandkop door aanlandende banken in zijn geheel in volume toeneemt zijn er wel gebieden te onderscheiden die structureel eroderen of aanzanden. Nabij de eilandkop versnelt de stroming om de kop van het eiland. Het voorliggende Bornrif is hier vrij diep waardoor golven nog steeds een belangrijke rol spelen in de sedimenttransportprocessen. Tussen het Borndiep en de Bornrif strandhaak bevindt zich een zone met structurele erosie. Deze erosie wordt veroorzaakt door een divergentiepunt in de transporten en grote transporten langs de kust richting het Borndiep. Door het Borndiep wordt dit sediment dan effectief weggevoerd naar de randen van de buitendelta vindt er structurele erosie van de eilandkop plaats. Alleen een aanlanding direct op de eilandkop kan deze structurele terugtrekking een halte toe roepen.

Ten oosten van de eilandkop hebben recentelijk de aanlandingen van de Bornrif Strandhaak en Bornrif Bankje plaatsgevonden. De kust is hier dan ook sterk uitgebouwd, maar vertoont wel een maximale erosie door contractie van de getijstrooming rond de kop van de strandhaak. Deze contractie zorgt voor grote stroomsnelheden en transporten, maar zorgt er ook voor dat het Bornrif Bankje oostwaarts geduwd wordt. De aanlanding van het Bankje vindt dan ook aan de oostzijde van de Bornrif strandhaak plaats. De kustlijn van Ameland, ten oosten van de buitendelta, wordt gevoed door het geërodeerde sediment. Dit geeft lokaal een uitbouw van de kust. Uit de grote zandsuppleties op het centrale deel van Ameland blijkt dat deze aanvoer van sediment niet voldoende is om de kustlijn te handhaven.



Figuur 2-6: Conceptuele beschrijving van de dominante processen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland: (a). Overzicht van de deelgebieden, (b). Maatgevende processen per deelgebied en (c) Sedimentatie-erosiepatronen (2016-2019) met in detail de onderliggende, maatgevende processen.



## 3 Vertaling van de inzichten naar Kustbeheer

In dit hoofdstuk worden de inzichten in de morfodynamiek van de buitendelta van het Amelander Zeegat vertaald naar mogelijkheden voor het kustbeheer. De drie (onderzoeks)vragen geïntroduceerd in paragraaf 1.2, worden beantwoord; voor de leesbaarheid worden ze hier herhaald:

- (1). Wat is de rol van de buitendelta in het kuststelsel?
- (2). Moeten buitendelta's gehandhaafd blijven?
- (3). Kunnen de (morfologische processen op de) buitendelta's gebruikt worden om op efficiënte wijze zand het kuststelsel in te brengen, waardoor nu en in de toekomst de kustlijn gehandhaafd kan worden, en er voldoende sediment beschikbaar blijft voor transport naar de Waddenzee?

Vraag 1 en 2 worden generiek beantwoord. De 3<sup>e</sup> vraag kan op dit moment alleen voor het zeegat van Ameland worden beantwoord.

### 3.1 Wat is de rol van de buitendelta in het kuststelsel?

De beantwoording van deze vraag wordt voor een belangrijk deel bepaald door de tijd- en ruimteschaal. Getij en golven zijn in staat grote volumes water en daarmee zand te verplaatsen. Dit proces is zichtbaar in de vorm van bodemvormen, banken en geulen. Op deze kleine schalen kunnen zich grote veranderingen voordoen, maar als al deze veranderingen over lange termijn opgeteld worden (en er geen verstoring door menselijke ingrepen is opgetreden) is de netto verandering meestal klein. De buitendelta's zijn op de kleinere ruimteschalen en kortere tijdschalen heel dynamisch, maar over langere tijd (tientallen jaren tot een eeuw) zijn ze min of meer in evenwicht, waarbij het zandvolume een functie is van het getijprisma. Op de grote schaal, de schaal van de Waddenzee, kan de buitendelta dan ook gezien worden als een zandbuffer, waar grote hoeveelheden zand in opgeslagen kunnen worden of van waaruit zand beschikbaar kan komen.

Op de kleinere schaal van de individuele zeegaten beïnvloedt de buitendelta de lokale dynamiek van de kustprocessen en speelt een belangrijke rol als doorgeefluik van de kustlangse sedimentstroom. Zowel de korte als lange tijdschalen zijn van belang. Voor het lange-termijn kustbeheer is het essentieel dat de functie zandbuffer gehandhaafd blijft. Echter de kustlijnhandhaving bevindt zich op de tijd- en ruimteschaal van de mesoschaal processen. In onderstaande paragrafen worden de verschillende functies van de buitendelta verder uitgewerkt. De buitendelta:

- vormt een zandbuffer,
- beïnvloedt de lokale dynamiek van de kustprocessen,
- beïnvloedt het bekken en
- is een doorgeefluik van de kustsedimentstroom.

#### 3.1.1 De buitendelta vormt een zandbuffer.

Op grote schaal is het gedrag van buitendelta's bekend. De buitendelta vormt een groot zandlichaam, waarvan het volume volgens bestaande conceptuele modellen en empirische relaties samenhangt met het getijprisma door de keel van het zeegat (O'Brien, 1931, 1969; Jarrett, 1976). Het getijprisma, het totale watervolume dat het achterliggende bekken vult, is een functie van de getijslag en de geometrie van dat bekken (Davis en Hayes, 1984). De getijstrooming versnelt zich in het zeegat, waardoor er tijdens eb sediment zeewaarts wordt getransporteerd. Dit sediment bezinkt zodra de snelheden afnemen tot onder de kritische bezinksnelheid. Hierdoor ontstaat de ondiepte die buitendelta wordt genoemd (Dean en Walton, 1975; Walton en Adams, 1976). Door

veranderingen in de forcering (zoals getij- of golfklimaat) kan er zand vrijkomen of extra zand opgeslagen worden. De buitendelta vormt zo een zandbuffer. De buitendelta maakt deel uit van een zanddelend systeem, als er ergens in dit systeem een sedimentvraag ontstaat, kan de buitendelta sediment leveren en bij aanbod kan de buitendelta dit opslaan. Dit simpele conceptuele model werkt goed voor (kleinschalige) natuurlijke systemen. Na doorbraak van een barrière-eiland, bijvoorbeeld tijdens een storm, zijn deze modellen in staat de volumeontwikkeling van de verschillende elementen zoals de buitendelta, binnendelta en keel van het zeegat te beschrijven. Dit concept is echter te simpel om complexe systemen zoals de huidige Waddenzee in voldoende detail te beschrijven.

De huidige Waddenzee is over een periode van meer dan 7000 jaar gevormd. Onder invloed van zeespiegelstijging en in toenemende mate antropogene effecten is er een variëteit aan eilanden, geulen, zand-, slibplaten en kwelders gevormd. Sinds de Middeleeuwen zijn menselijke ingrepen steeds belangrijker geworden en is de landwaartse begrenzing van de Waddenzee vastgelegd door zeeweringen, dijken, afsluitdammen en kwelderwerken (Oost, 1995; Van der Spek, 1995; Elias, 2006). Met de afsluitingen van de Zuiderzee en Lauwerszee is de Waddenzee gevormd zoals we die nu kennen. Ook aan de zeewaartse zijde is het natuurlijk gedrag van de eilanden steeds meer ingeperkt. Eerst zijn door de aanleg van harde constructies zoals zeeweringen, strekdammen en bolwerken een groot deel van de eilandenkoppen en -staarten gestabiliseerd. Deze constructies in combinatie met kustlijnhandhaving zorgen er eigenlijk voor dat de eilanden sinds 1990 vast in positie liggen. Eigenlijk kunnen alleen de eilandstaarten van Ameland, Terschelling en Schiermonnikoog en de eilandkoppen van Vlieland, Terschelling en Schiermonnikoog nog een vrije dynamiek vertonen.

Het stabiliseren van de bekkendimensies en het vastleggen van de eilanden heeft een effect op de huidige sedimenttransporten, maar heeft ook een effect op de zandimporten onder invloed van zeespiegelstijging. Voor het behoud van de intergetijdengebieden binnen de Waddenzee is het van belang dat de netto sedimentatie de zeespiegelstijgingsnelheid bijhoudt. Hiervoor moet voldoende zand beschikbaar zijn. In een natuurlijke systeem zorgt een terugtrekkende Noordzeekust voor sedimentaanbod. Dit proces van landwaartse verplaatsing van het gehele systeem van bekken tot eiland wordt ook wel het roll-over mechanisme genoemd (Van Straaten, 1975; Louters & Gerritsen, 1990; Flemming & Davis, 1994; Van der Spek, 1994). Dit mechanisme kan nu niet meer of slechts in zeer beperkte mate plaatsvinden. De Waddenzee kan alleen in stand gehouden worden als er een balans is tussen de vergroting van de accommodatieruimte (in het bekken) door zeespiegelstijging, de sedimenttransportcapaciteit door de keel van het zeegat en het zandaanbod vanuit de kustzone. Vanuit dit oogpunt is handhaving van de bufferwerking van de buitendelta essentieel.

Het is echter niet geheel duidelijk wat het benodigde zandvolume van de buitendelta moet zijn om deze bufferwerking te garanderen. De volumeontwikkeling van de Waddenzee over de laatste eeuw (Elias et al. 2012; Wang et al. 2018, Elias, 2019) laat echter zien dat de sedimentimport ruim voldoende was om te compenseren voor de opgetreden (relatieve) zeespiegelstijging. Met name voor de oostelijke Waddenzee kan hieruit indirect geconcludeerd worden dat zowel het sedimentaanbod als de transportcapaciteit voldoende was. Het in stand houden van een gelijkwaardig systeem, door het op peil houden van de zandvolumes van de buitendelta's, zorgt er zeker voor dat het zand benodigd is voor het meegroeien van de Waddenzee met zeespiegelstijging, beschikbaar is. Als er niet voldoende sediment beschikbaar is op de buitendelta dan zullen de aanliggende kusten het sediment moeten leveren met aanzienlijke kusterosie tot gevolg.

In de Westelijke Waddenzee speelt in principe een vergelijkbaar proces. Ook hier vergroot zeespiegelstijging de accommodatieruimte in het bekken. Alleen is hier ook nog veel sediment nodig voor het hervinden van evenwicht na de afsluiting van de Zuiderzee. Uit de respons in het verleden is bekend dat de buitendelta's een groot deel van dit sediment geleverd hebben. Het is echter de



vraag of de buitendelta's van de Westelijke Waddenzee voldoende sediment kunnen leveren om het evenwicht te herstellen. De grote zandvraag van het bekken zou er voor kunnen zorgen dat de buitendeltavolumes nog verder verkleinen waardoor niet alleen het zandaanbod maar ook de rol van de buitendelta's voor de dynamiek van de aanliggende eilanden en de rol binnen de kustlangse sedimentstroom beïnvloed kunnen worden (zie de volgende paragrafen).

### **3.1.2 Beïnvloeding van de lokale dynamiek van de kustprocessen**

Op de grote ruimteschaal en lange tijdschaal is de rol van zandbuffer duidelijk, maar ook op de kleinere schalen speelt de buitendelta een directe rol. Ondanks dat over de laatste eeuw een trend van overwegend eroderende buitendelta's te zien is, is het onwaarschijnlijk dat de buitendelta's volledig gaan verdwijnen. Er zal altijd een minimum hoeveelheid zand aanwezig zijn. Deze zandvolumes zullen dan veel kleiner zijn dan wat er nu aanwezig is. Zo heeft de buitendelta van Texel sinds 1985 bijna 80 miljoen m<sup>3</sup> zand verloren (Elias en van der Spek, 2017). De omvang van de buitendelta heeft ook invloed op de dynamiek van de geulen en platen op deze buitendelta; grote geulen en platen strekken zich ver zeewaarts uit en zijn over het algemeen stabiel en beter voorspelbaar dan systemen met kleinere geulen en platen. Door verplaatsingen van geulen en platen kan er aanzienlijke erosie of aanzanding optreden. Dit is op zich makkelijk te begrijpen. De geulen zorgen voor een complex stromingspatroon met hoge stroomsnelheden en transporten. Bij een ongunstige ligging van de geulen kunnen deze insnijden in de aanliggende eilandkusten en zo structureel grote erosie veroorzaken. In het verleden zijn dan ook veel van de eilandkoppen en staarten versterkt om deze geulmigraties in te perken. Met uitzondering van het Friesche Zeegat is er bij elk zeegat wel een versterking of de eilandkop of -staart aangebracht. Zo is de kop van Noord-Holland geheel beschermd door de Helderse zeewering. Het eiland Texel is bij Eierland met bolwerken versterkt en er is zeewaarts een dam aangelegd. Ook bij het Zeegat van het Vlie en in het Zeegat van Ameland zijn bestortingen of strekdammen aanwezig. Een deel van deze constructies is al onderhevig aan uitschuring en ondermijning door de stromingen, maar een significante verandering van geulligging kan ervoor zorgen dat deze dreiging versterkt wordt.

De dynamiek en ligging van de geulen en platen worden enerzijds bepaald door grootschalige processen, zoals de aansturing vanuit het bekken, maar ook de voorliggende buitendelta zelf speelt bijvoorbeeld door het sediment-bypassing proces een rol. Grote veranderingen in volume, omvang of grootte van de buitendelta kunnen structurele veranderingen in geul en plaatligging veroorzaken waardoor de huidige kustverdedigingswerken minder functioneren of onder (grotere) druk komen te staan. Het Kustgenese 2.0 onderzoek laat zien dat mesoschaal verandering van het systeem geïnitieerd kan worden door relatief kleinschalige verstoringen. De geassocieerde volume veranderingen zijn relatief klein en de ontwikkelingen kunnen waarschijnlijk door strategisch aangebrachte systeemsuppleties (~1 – 5 miljoen m<sup>3</sup>) worden beïnvloed. Alhoewel dit nog nader onderzocht en uitgewerkt dient te worden, biedt deze kennis kansen voor een geoptimaliseerd beheer van de eilandkop en -staart verdedigingen.

### **3.1.3 Functies van de buitendelta voor de bekken**

Voor het bekken heeft de buitendelta drie belangrijke functies. Ten eerste is de buitendelta een bron van zand, die voldoende zandaanbod voor het bekken waarborgt. Ten tweede beschermt de buitendelta het achterliggende bekken tegen golfaanval. De buitendelta zorgt ervoor dat Noordzeegolven vrijwel niet doordringen tot in de Waddenzee. De hogere golven breken op de voorliggende buitendelta, waardoor ze het merendeel van de golfenergie verliezen. Hierbij dragen ze direct bij aan het genereren van sedimenttransporten door opwoeling en golf-gedreven stromingen die de sedimentstroom richting het bekken voedt. Als de buitendelta verdwijnt of dieper komt te liggen, kunnen grotere golven de Waddenzee indringen, waardoor grootschalige bodemveranderingen zullen optreden. Daarnaast kan doordringing van de golven door de grote geulen een directe bedreiging vormen voor de veiligheid van de achterliggende dijken en de zeeweringen in het Zeegat. Met instandhouding van de huidige buitendeltavolumes kan deze beschermende functie van de buitendelta gehandhaafd worden. Ten derde is de buitendelta een

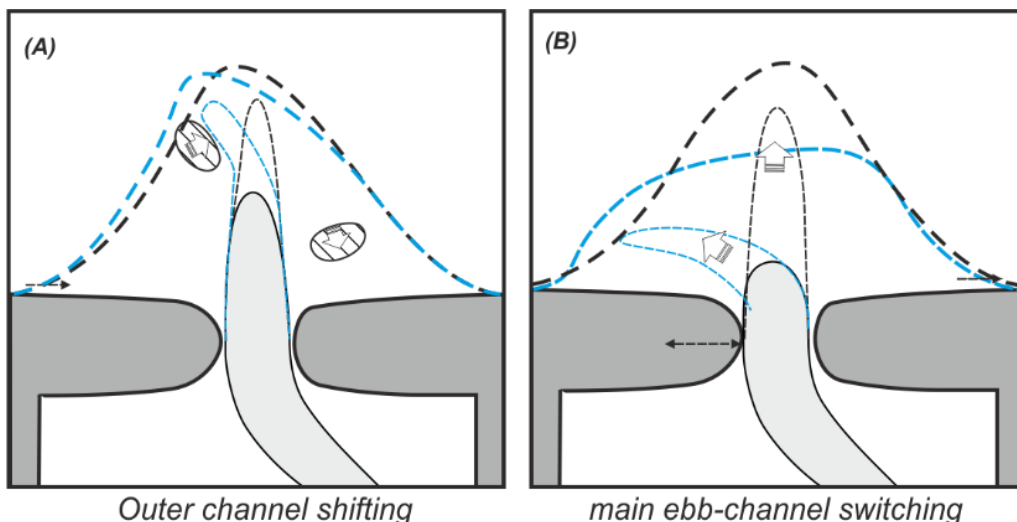
schakel in de Noordzeekustzone die in zijn geheel het zand voor de Waddenzee levert. Buitendelta's spelen daarmee een rol in de verdeling van zand langs deze kustzone en het nivelleren van grote verschillen tussen de zandbalansen van de individuele zeegatsystemen (dus inclusief bekkens). Hiermee wordt voorkomen dat een getijbekken sneller opvult dan zijn burens.

#### 3.1.4 Doorgeefluik van de kustsedimentstroom

De buitendelta vormt ook het doorgeefluik van de sedimentstroom van het bovenstroomse eiland naar het benedenstroomse eiland (het sediment-bypassing proces). Bij het zeegat van Ameland beweegt deze sedimentstroom zich door het overheersende golfklimaat van west naar oost. Sediment dat langs de kust van het eiland van Terschelling aangevoerd wordt moet dus via het zeegat en de buitendelta naar Ameland oversteken. Er kan onderscheid gemaakt worden in twee verschillende vormen van sediment-bypassing. Sediment kan rechtstreeks via de geulen getransporteerd worden en zo direct het zeegat passeren, of het sediment vormt banken op de buitendelta. Deze banken migreren van west naar oost en uiteindelijk verhelen ze met het benedenstroomse eiland. De bankverhelingsen bepalen voor een belangrijk deel de kustlijnontwikkeling van benedenstrooms gelegen eilanden op langere termijn.

Het belang van sediment-bypassing werd voor het eerst beschreven door Bruun en Gerritsen (1959) en sindsdien hebben vele onderzoekers conceptuele modellen opgesteld (FitzGerald, 1982; FitzGerald et al., 1978, 2000; FitzGerald, 1988). Deze conceptuele modellen beschrijven vaak het sediment-bypassing proces en de bijbehorende bankaanlandingen als een cyclisch of periodiek proces (Oertel, 1977; FitzGerald et al., 1984; Israel en Dunsbergen, 1999; Cheung et al. 2007; Robin et al., 2009, Hein et al., 2016). Cyclische processen impliceren een voorspelbaarheid en zijn, indien geldig, voor het kustbeheer van belang. Voor het Zeegat van Ameland concluderen Israël (1989) en Israël en Dunsbergen (1999) een plaat-geulevolutie met een cyclus van 50-60 jaar. Toch zijn deze cyclische modellen niet geheel zonder discussie. Vaak zijn de cyclische modellen opgesteld met beperkte meetdata, en onderzoekers zoals Son et al. (2011) twijfelen dan ook terecht aan de algehele geldigheid van deze concepten. Ook voor Ameland laten Elias et al. (2019) zien dat voorspelbaarheid gebaseerd op een cyclus niet optreedt. De configuratie van de geulen en platen op de buitendelta lijkt het resultaat te zijn van ontwikkelingen die gedreven kunnen worden vanaf de grootste schaal (vanuit de veranderingen in het bekken), maar ook door interacties op de kleinste schaal (instabiliteiten op de buitendelta). De verstoringen die deze instabiliteiten veroorzaken zijn lastig te voorspellen waardoor voorspelbaarheid, en modellen ten aanzien van de timing van cyclisch gedrag, eigenlijk niet geldig zijn. Bij Ameland is het misschien niet mogelijk om exact te voorspellen wanneer en hoe een sediment-bypassing cyclus geïnitieerd wordt, maar zodra de cyclus in gang gezet wordt, is het gedrag over langere tijdschalen (orde 5-20 jaar) wel te voorspellen (zie Hoofdstuk 2.3).

Het sediment-bypassing proces van het Zeegat van Ameland is in Figuur 3-1 conceptueel samengevat. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen twee processen: (a) "*Outer channel shifting*" en (b) "*Main ebb-channel switching*". In het verleden trad outer channel shifting op, het huidige gedrag vertoont juist de kenmerken van main ebb-channel switching (zie Elias et al. 2019 voor een nadere uitleg).



Figuur 3-1: Conceptuele beschrijving van 2 sediment-bypassing modellen voor Ameland (a) "outer channel shifting" en (b) "main ebb channel switching".

**Outer channel shifting;** Deze vorm van sediment-bypassing wordt gekenmerkt door beperkte aanpassingen van de buitendelta. Door de aanvoer van sediment vanaf de kustlijn van Terschelling vindt er plaatgroei plaats op de westelijke zijde van de buitendelta. Deze banken migreren oostwaarts en drukken daarbij het meest zeewaartse deel van de ebgeul naar het oosten. Met oostwaartse verplaatsing wordt deze geul steeds minder efficiënt en op een gegeven moment vormt er een nieuwe uitstroming aan de westelijke (bovenstroomse) zijde van de bank, waarna het proces herstart. Met iedere cyclus wordt er een volumesediment aan het Bornrif toegevoegd. Sediment accumuleert op het Bornrif en wordt door golven landwaarts verplaatst.

**Main ebb-channel switching:** Deze tweede variant beschrijft het huidige gedrag. Eigenlijk zijn de processen gelijk aan voorgaande variant, alleen treedt er nu grootschalige verplaatsing van de gehele ebgeul op. De bijbehorende tijdschaal is daarmee ook veel langer (decennia) dan de tijdschaal van outer channel shifting (jaren tot decennium). Doordat de gehele eb-geul verplaatst, verandert ook het gehele platform van vorm. Hierdoor kunnen ook de eilandstaart en -kop van gedrag veranderen. Zo is de erosie van de Boschplaat waarschijnlijk mede een gevolg van het verdiepen van het westelijke deel van de buitendelta. In Figuur 2-4 is de cyclus van main ebb-channel switching te volgen. Deze cyclus wordt geïnitieerd door de vorming van ebschaar en ebschild systemen. De ebschaar zorgt voor een grote aanvoer van sediment waardoor de banken snel kunnen groeien. Zodra deze banken ver zeewaarts zijn verplaatst nemen de golfgedreven processen het over, waardoor de hoofdgeul dichtgedrukt wordt.

Het proces van sediment-bypassing speelt in principe rond alle buitendelta's, maar de exacte uitwerking (op de mesoschaal) is voor ieder zeegat verschillend. Voor de inpassing van de buitendeltasuppleties in een sediment-bypassing cyclus is een gedetailleerde kennis en voorspelling van de platen en geulen nodig. Dit vereist per zeegat een gedetailleerde uitwerking van het sediment-bypassing mechanisme. Een generieke uitwerking die geldig is voor alle zeegaten is dan ook nog niet mogelijk. Wel kan geconcludeerd worden dat de zeegaten Ameland en Friesche Zeegat de grootste overeenkomstige kenmerken vertonen. Beide zeegaten worden gekenmerkt door een tweedeling in het bekken met een kleiner westelijk en groter oostelijk gericht geulenstelsel. Het westelijke stelsel maakt via een ondiep platform en kleinere geultjes verbinding met de buitendelta. Het oostelijke deel van het bekken takt rechtstreeks aan op de hoofdgeul. Op de buitendelta roteert de hoofdgeul met de klok mee onder de invloed van banken die van west naar oost migreren.

## 3.2 Moeten buitendelta's gehandhaafd worden?

Uit de eerdere studies van Louters en Gerritsen (1990) en Elias et al. (2012) volgen twee belangrijke inzichten. Ten eerste worden de sedimenttransporten in de Waddenzee gedreven door natuurlijke processen: getij, wind en golven drijven de stromingen, transporten en morfologische veranderingen, maar wel binnen een vaste begrenzing. Door de bedijkingen, inpolderingen en het kustlijnbeheer van de eilanden ligt de kustlijn en het bekken van de Waddenzee vast. Ten tweede zijn deze systemen vanuit een morfologisch oogpunt heel robuust. Ondanks de grote ingrepen in de Waddenzee zijn de natuurlijke processen in staat om de karakteristieke, unieke kenmerken van het gebied te handhaven. Zelfs bij herhaaldelijk, strategisch, uitgevoerde buitendelta suppleties lijkt het onwaarschijnlijk dat deze ingrepen het grootschalige gedrag zullen beïnvloeden.

De natuurlijke processen proberen binnen de opgelegde begrenzing een nieuw morfologisch evenwicht te vinden. Dit speelt op de schaal van de Waddenzee maar ook op de schaal van de individuele zeegaten en de buitendelta's (Elias et al. 2019). De buitendelta's worden op natuurlijke wijze gevormd als een balans tussen de getijgedreven en golfgedreven transporten. Indirect treedt beïnvloeding op door menselijke ingrepen. De veranderingen in het bekken en het vastleggen van de eilandkop hebben ertoe bijgedragen dat de getijgeul in de keel van het zeegat is vastgelegd. Dit beïnvloedt de uitstroming naar de buitendelta en daarmee dus ook de ontwikkeling van deze buitendelta. Daarnaast beperkt de keuze van kustlijnhandhaving van de eilanden de natuurlijke dynamiek: in principe kunnen zowel sedimentatie als erosie onbeperkt plaatsvinden, alleen wordt de door erosie veroorzaakte kustlijnertugtrekking gecompenseerd bij overschrijding van de basiskustlijn. De leidt tot de conclusie dat buitendelta's zich op natuurlijke wijze kunnen ontwikkelen, maar wel binnen randvoorwaarden die opgelegd worden. Met behulp van buitendeltasuppleties kan beter worden ingespeeld op de natuurlijke processen om de negatieve gevolgen van dynamiek te mitigeren, voordat het een probleem voor kustlijnhandhaving vormt.

De buitendelta's vormen ook het doorgeefluik voor de sedimentuitwisseling tussen de Waddenzee en de Noordzeekust. De ontwikkelingen in het verleden hebben laten zien dat vergroting van sedimentimport naar een Waddenzeebekken, bijvoorbeeld door de afsluitingen van de Zuiderzee en Lauwerszee, in eerste instantie door de buitendelta's van de betreffende zeegaten geleverd wordt. Deze nemen hierdoor in omvang af (Elias et al., 2012). Veranderingen van sedimentuitwisseling tussen de Waddenzee en de Noordzeekust in de toekomst, ten gevolge van onder andere versnelling van zeespiegelstijging, zullen ook tot veranderingen in de buitendelta's leiden. Als doorgeefluik bevindt een buitendelta zich dus op de kruising tussen de kustlangse en kustdwarse (door zeegaten) sedimentstromen. Daarmee speelt het een centrale rol in het sedimentdelende systeem rondom een zeegat. Verder biedt het (bepaalde) bescherming voor de eilandkusten tegen golfaanval. Daarom is het gewenst dat de buitendelta's gehandhaafd worden op een zodanige omvang dat ze hun functies als doorgeefluik, sedimentbuffer en kustbeschermer kunnen blijven uitoefenen. Echter, met de huidige kennis is het moeilijk te zeggen welk minimale omvang hiervoor nodig is per zeegat. De buitendelta's maken onderdeel uit van het kustfundament. Vanuit dat oogpunt past het toevoegen van zand aan een buitendelta binnen het huidige beleid.

### 3.3 Kunnen de (morfologische processen op de) buitendelta's gebruikt worden voor kustbeheer?

Vraag in lange vorm: *Kunnen buitendelta's gebruikt worden om efficiënt extra zand het kuststelsel in te brengen, waardoor nu en in de toekomst de kustlijn gehandhaafd kan worden, en er voldoende sediment beschikbaar blijft voor transport naar de Waddenzee?*

Buitendeltasuppleties kunnen een instrument worden binnen kustlijnbeheer om het beheer van de kust verder te optimaliseren. Om de processen van het zeegeestelsel te behouden bij zeespiegelstijging is meewerken met de natuurlijke processen de beste manier. Dat pleit voor de keuze voor buitendeltasuppleties, die in de toekomst (bij versnelde zeespiegelstijging) mogelijk zelfs een onmisbaar onderdeel van de suppletiestrategie kunnen worden. Door klassieke strand- of vooroeversuppleties worden negatieve effecten (kustachteruitgang) van de natuurlijke processen gemitigeerd. Buitendeltasuppleties zijn niet primair gericht op het tegengaan van kustachteruitgang maar gebruiken natuurlijke processen om het kuststelsel van sediment te voorzien en de processen in een zeegeest positief te beïnvloeden.

Op grote schaal dragen buitendeltasuppleties altijd bij tot het vergroten van het zandvolume van de buitendelta. Daarmee wordt ook indirect gezorgd voor instandhouding van de zanduitwisseling met de bekkens en het draagt bij aan de zandvolumes binnen de sediment-bypassing cyclus. Op lange termijn is het geheel een zanddelend systeem. Door de buitendeltasuppleties af te stemmen op de sediment-bypassing cyclus kan er ook gericht bijgedragen worden aan directe kustlijnbeheer. Het is dan wel van belang dat de sediment-bypassing cyclus goed begrepen wordt. Alleen met dit begrip is het toekomstige gedrag te voorspellen en dit gedrag te beïnvloeden. De sediment-bypassing cyclus zal voor ieder zeegeest unieke kenmerken vertonen. Hierdoor is altijd een goed inzicht in en dus onderzoek van de processen benodigd.

De sediment-bypassing cyclus van het Zeegeest van Ameland kenmerkt zich door perioden van aangroei en erosie van de aanliggende eilanden. Erosie of sedimentatie van de bovenstroomse eilandstaart (Terschelling) wordt bepaald door de balans tussen de aanvoer en afvoer van sediment. Met een diepe voorliggende buitendelta (huidige situatie) vindt er structurele erosie plaats. In deze fase van de sediment-bypassing cyclus zouden grootschalige suppleties op de eilandstaart van Terschelling juist een geschikte optie zijn om extra zand het systeem in te brengen. Deze suppleties zorgen voor een overvloed aan sediment, waardoor de erosie van de eilandstaart kan worden gemitigeerd en spitgroei kan worden bevorderd. Deze vorm van systeemsuppleties heeft daarnaast als voordeel dat sediment in het begin van de sediment-bypassing cyclus wordt aangevuld. Hierdoor blijven de volumes lang(er) in het buitendeltasysteem aanwezig.

Een nadeel van bovengenoemde suppleties is dat ze niet direct een effect hebben op de kustlijn van het benedenstroomse eiland (Ameland). De kustlijn van Ameland wordt gevoed door de aanlandingsbanken en een suppletie bij Terschelling moet de gehele sediment-bypassing cyclus doorlopen voordat die bijdraagt aan de volumes van de aanlandingsbanken. Systeemsuppleties kunnen hier op twee manieren worden ingezet om het bankaanlandingsproces te versnellen of de aanlandingsvolumes te vergroten.

Een eerste optie is het versnellen van het aanlandingsproces. Vóór aanlanding vormen er zich banken net zeewaarts van de kustlijn. Door systeemsuppleties is het zandvolume van deze banken te vergroten, waardoor er na aanlanding een groter zandvolume beschikbaar is. Het aanlandingsproces neemt vaak een lange tijd in beslag. Tussen de aanlandingsbank en de kustlijn vormt een ondiepe geul die er voor zorgt dat landwaartse beweging van de aanlandingsbank vertraagt. Deze geul veroorzaakt ook (significante) kustlijnerosie, omdat die door de landwaartse verplaatsing van de bank de kust ingedrukt wordt. Een strategisch geplaatste suppletie zou hier het aanlandingsproces kunnen versnellen. Naast de directe vergroting van de zandvolumes neemt deze suppletie dan ook direct de kustlijnerosie weg.

Een tweede optie is het stimuleren van nieuwe bankgroei. Na aanlanding van de sediment-bypassing bank duurt het een lange tijd voordat er voldoende volume op het Bornrif aanwezig is om een nieuwe aanlandingsbank te vormen. In deze fase van de cyclus zouden buitendeltasuppleties, direct geplaatst op het Bornrif platform, er voor kunnen zorgen dat er extra bypassing banken gecreëerd worden. Met deze strategie kan de totale zandtoevoer naar het eiland sterk worden vergroot.

Naast het direct beïnvloeden of versnellen van het aanlandingsproces en het creëren van aanlandingsbanken, kan een buitendeltasuppletie ook indirect bijdragen aan het sediment-bypassing proces. Dit is feitelijk het geval met de huidige buitendeltasuppletie die aangelegd is in het meer centraal gelegen deel van de buitendelta (zie Elias en Pearson, 2020). In dit deel van de buitendelta vormen zich onder invloed van de ebstroming banken, die groeien en zeewaarts uitbouwen. Deze banken zijn niet de aanlandingsbanken, maar vormen wel de zandbron waaruit deze banken uiteindelijk worden opgebouwd. Als in meer detail naar de vorming van de banken gekeken wordt dan is te zien dat deze ontstaan door zandtoevoer vanuit de hoofdebeul en daarna snel zeewaarts migreren en groeien. In de huidige situatie gaat dit via een stelsel van kleinere ebscharen en ebschilden die gevoed worden vanuit de ebeul. De systemen migreren zeewaarts tot de rand van de buitendelta. Vanaf hier beweegt het ebschild vervolgens evenwijdig aan de rand van de buitendelta oostwaarts. De buitendeltasuppletie is aangelegd aan de bovenstroomse zijde van het ebschild. Dit deel is eigenlijk vrij statisch. De maatgevende processen hier zijn de golfgedreven transporten. Doordat de suppletie relatief diep ligt is er alleen significante golfbreking tijdens storm. Hierdoor blijft de suppletie naar verwachting lang aanwezig en geeft dan episodisch, tijdens stormen, een extra zandaanbod (langetermijnbron). Een suppletie aangebracht aan de benedenstroomse zijde vertoont waarschijnlijk een dynamischer gedrag omdat hier zowel de geul als golven verplaatsing kunnen veroorzaken. Zo'n suppletie zal dan sneller in het systeem worden opgenomen. In theorie zou er dan vaker sediment aangebracht kunnen worden.

### 3.4 Samenvattende conclusies

*Wat is de rol van de buitendelta in het kuststelsel?*

Op de grote schaal, de schaal van de Waddenzee en de kustzone, is de buitendelta een zandbuffer, waar grote hoeveelheden zand in opgeslagen zijn of van waaruit zand beschikbaar kan komen. Op de kleinere schaal van de individuele zeegaten beïnvloedt de buitendelta de lokale dynamiek van de kustprocessen. De voorliggende geulen en banken bepalen in grote mate de kustlijnontwikkeling van de naastliggende eilanden. Daarnaast zorgt golfbreking op de buitendelta ervoor dat Noordzeegolven vrijwel niet doordringen tot in de Waddenzee.

De buitendelta vormt een doorgeefluik in de kustsedimentstroom. Sediment kan direct via de geulen getransporteerd worden en zo rechtstreeks het zeegat passeren, of het sediment vormt banken op de buitendelta. Deze banken migreren van west naar oost en uiteindelijk verhelen ze met het benedenstroomse eiland. De bankverhelingen bepalen voor een belangrijk deel, op zowel de korte als langere termijn, de kustlijnontwikkeling van het benedenstrooms gelegen eiland.

*In welke vorm en omvang moeten buitendelta's gehandhaafd blijven?*

Het is wenselijk dat de buitendelta's gehandhaafd worden op een zodanige omvang dat ze hun functie als doorgeefluik, sedimentbuffer en kustbeschermer kunnen blijven uitoefenen. De Waddenzee met zijn huidige karakteristieken kan alleen in stand gehouden worden als er een balans is tussen de vergroting van de accommodatieruimte in het bekken door (relatieve) zeespiegelstijging, de sedimenttransportcapaciteit door de keel van het zeegat en het zandaanbod vanuit de kustzone. Vanuit dit oogpunt is handhaving van de bufferwerking van de buitendelta essentieel. Echter, met de huidige kennis is het moeilijk te zeggen welk minimale omvang hiervoor per zeegat nodig is. De buitendelta zal nooit geheel verdwijnen, er zal altijd een minimum volume zand aanwezig zijn. Echter, als er niet voldoende sediment beschikbaar is op de buitendelta dan



zullen de aanliggende kusten het sediment moeten leveren met aanzienlijke kusterosie tot gevolg. De buitendelta's van de oostelijke Waddenzee lijken in dynamisch evenwicht en meegroeien van het sedimentvolume met zeespiegelstijging zou kunnen volstaan. De buitendelta's van de westelijke Waddenzee zijn nog niet in dynamisch evenwicht. Wat daar de minimaal te handhaven omvang van de buitendelta's is, kan nog niet aangegeven worden.

*Kunnen de (morfologische processen op de) buitendelta's gebruikt worden voor kustbeheer (zandbuffer, kustlijnhandhaving, suppletie/locatie)?*

Buitendeltasuppleties kunnen gebruikt worden om het huidige beheer te optimaliseren. Voor toekomstig beheer zijn ze wellicht essentieel. Door zeespiegelstijging is meewerken met de natuurlijke processen de beste manier om het natuurlijke zeegatsysteem te behouden. Dat pleit voor de keuze voor buitendeltasuppleties, die in de toekomst (bij versnelde zeespiegelstijging) mogelijk zelfs een onmisbaar onderdeel van de suppletiestrategie kunnen worden. Door klassieke strand- of vooroeversuppleties worden negatieve effecten van de natuurlijke processen (kustachteruitgang) gemitigeerd. Buitendeltasuppleties zijn niet primair gericht op het tegengaan van kustachteruitgang, maar gebruiken de natuurlijke processen om het hele kustsysteem van sediment te voorzien.

De buitendelta vormt een gebied waarop grote hoeveelheden zand kunnen worden aangebracht, bijvoorbeeld in de vorm van een buitendeltasuppletie zoals recent uitgevoerd bij Ameland. Op de grote schaal dragen suppleties altijd bij tot het vergroten van het zandvolume van de buitendelta. Na aanbrengen kunnen de natuurlijke processen deze sedimenten dan verspreiden, waardoor voldoende zandaanbod ter compensatie van de sedimentvraag van de Waddenzee, op lange termijn, kan worden gewaarborgd.

Suppleties op de buitendelta vergroten ook de zandvolumes binnen de sediment-bypassing cyclus. Het feit dat het gedrag van de buitendelta gestuurd kan worden door ingrepen op de schaal van individuele banken of geulen, biedt mogelijkheden voor het kustbeheer. Dan moeten de onderliggende processen en mechanismen wel voldoende begrepen worden. Met behulp van buitendeltasuppleties kan ingespeeld worden op de dynamiek van platen en geulen in de buitendelta, zodat meer zand richting de kust beweegt, waar het kustlijnerosie mitigeert, voordat er kustlijnhandhaving nodig is vindt via reguliere suppleties.

### 3.5 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Het proces van sediment-bypassing speelt in principe op alle buitendelta's, maar de exacte uitwerking op de mesoschaal is voor ieder zeegat verschillend. Voor de inpassing van de buitendeltasuppleties in een sediment-bypassing cyclus is gedetailleerde kennis en voorspelling van de dynamiek van platen en geulen nodig. Dit vereist per zeegat een gedetailleerde uitwerking van het sediment-bypassing mechanisme. Een generieke uitwerking die geldig is voor alle zeegaten is nog niet mogelijk.

De toepassing van strategisch geplaatste buitendelta- of systeemsuppleties biedt kansen om de nu onder druk staande zeeeringen (o.a. Helderse Zeewering, bestorting Ameland) op natuurlijke wijze met zand te beschermen. Voordat deze suppleties echt aangebracht kunnen worden, is het zaak de uitwisseling tussen buitendelta, eilandkop en hoofdgeul veel beter te begrijpen.

De buitendelta's in de Oostelijke Waddenzee zijn waarschijnlijk in dynamisch evenwicht met het achterliggende bekken. Hier lijkt handhaving van de huidige buitendeltavolumes en -omvang een logische keuze, hoewel het effect van (versnelde) zeespiegelstijging wel onderzocht moet worden. Voor de toepassing van buitendeltasuppleties in de Westelijke Waddenzee is uitgebreider aanvullend onderzoek nodig. In de Westelijke Waddenzee is nog veel sediment nodig voor het hervinden van evenwicht na de afsluiting van de Zuiderzee. Zowel voor het bekken als voor de buitendelta's geldt dat het nog niet geheel duidelijk hoe dit nieuwe evenwicht er uitziet en of dit

evenwicht ooit bereikt zal worden. Zelfs zonder zeespiegelstijging gaan hier de verliezen van de buitendelta's waarschijnlijk nog lange tijd door. Deze verliezen kunnen ook hier gecompenseerd worden door buitendeltasuppleties alleen zal een groot volume benodigd zijn. Onderzocht moet worden of dat realistisch is.

Dit Technisch Advies is met name gebaseerd op de analyse van metingen die uitgevoerd zijn in het Zeegat van Ameland ten behoeve van Kustgenese 2.0, aangevuld met gegevens verzameld in het kader van de reguliere monitoring. Deze analyse heeft tot nieuwe inzichten in het gedrag van de buitendelta geleid. Aanvullende kennis kan worden verkregen uit de in het kader van het SEAWAD programma uitgevoerde analyses, uit doorgaande monitoring en analyse van de pilot suppletie (door bodemhoogtemetingen en X-band radar) en door de toetsing van de concepten en hypothesen met behulp van aanvullende morfologische modelering. Aanbevolen wordt om in de loop van 2021, als het SEAWAD programma en de monitoring van de pilot suppletie zijn afgerond, de kennis opnieuw te integreren ter beantwoording van de beleidsvraag in relatie tot suppleties bij buitendelta's en de meerwaarde voor kustbeheer.

## 4 Referenties

- Bruun, P., Gerritsen, F., 1959. Natural bypassing of sand at coastal inlets. *Journal of the Waterways and Harbors, Harbor Division*, 85 (4), p. 75-107.
- Cheung, K.F., Gerritsen, F., Cleveringa, J., 2007. Morphodynamics and sand bypassing at Ameland Inlet, The Netherlands. *Journal of Coastal Research* 23 (1), p. 106-118.
- Davis, R.A., Hayes, M.O., 1984. What is a wave-dominated coast? *Marine Geology* 60, p. 313-329.
- Dean, R.G., 1988. Sediment interaction at modified coastal inlets: processes and policies. In: Aubrey, D., Weishar, L. (Eds.), *Hydrodynamics and Sediment Dynamics of Tidal Inlets. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies* 29. Springer, New York, p. 412-439.
- Dean R.G., Walton, T.L., 1975. Sediment transport processes in the vicinity of inlets with special reference to sand trapping. In: Cronin, L.E. (Ed.), *Estuarine Research, Volume 2*. Academic Press, New York, p. 129-150.
- Deltares, 2020: Technisch advies sedimentbehoefte kustfundament; ten behoeve van het beleidsadvies voor Kustgenese 2.0, auteurs Arno Nolte, Claire van Oeveren, Edwin Elias, Jebbe van der Werf, Pieter Koen Tonnon, Bart Grasmeijer, Heleen Vreugdenhil, Zheng Wang en Ad van der Spek, Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0004, in opdracht van Rijkswaterstaat WVL, december 2019.
- Elias, E.P.L., 2006. Morphodynamics of Texel Inlet. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences (Delft): 261 pp.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., De Ronde, J., 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences* 91 (3), p. 293-310.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., 2017. Dynamic preservation of Texel Inlet, the Netherlands: understanding the interaction of an ebb-tidal delta with its adjacent coast. *Netherlands Journal of Geosciences* 96 (4), p. 293-317.
- Elias, E.P.L., 2019. Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Deltares rapport 11203683-001, Deltares Delft, 119 pp.
- Elias, E.P.L., & Wang, Z.B., 2019. Sedimentbalans Waddenzee. Synthese ten behoeve van Technisch Advies Kustgenese 2.0. Rapport 1220339, Deltares, Delft, 23 pp.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment-bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology* 415.
- FitzGerald, D.M., 1982. Sediment-bypassing at mixed energy tidal inlets. *Proceedings of 18th International Conference on Coastal Engineering, Cape Town*, p. 1094-1118.
- FitzGerald, D.M., 1988. Shoreline erosional-depositional processes associated with tidal inlets. In: Aubrey, D., Weishar, L. (Eds.), *Hydrodynamics and Sediment Dynamics of Tidal Inlets. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies* 29. Springer, New York, p. 186-225.

- FitzGerald, D.M., 1996. Geomorphic variability and morphologic and sedimentologic controls on tidal inlets. In: Mehta, A.J. (Ed.). Understanding Physical Processes at Tidal Inlets Based on Contributions by Panel on Scoping Field and Laboratory Investigations in Coastal Inlet Research. *Journal of Coastal Research* SI 23, p. 47-71.
- FitzGerald, D.M., Hubbard, D.K., Nummedal, D., 1978. Shoreline changes associated with tidal inlets along the South Carolina coast. *Proceedings Coastal Zone 1978*, American Society of Civil Engineers, New York, p. 1973-1994.
- FitzGerald, D.M., Kraus, N.C., Hands, E.B., 2000. Natural Mechanisms of Sediment-bypassing at Tidal Inlets. Report ERDC/CHL CHETN-IV-30, US Army Corps of Engineers, Vicksburg.
- FitzGerald, D.M., Penland, S., Nummedal, D., 1984. Control of barrier island shape by inlet sediment-bypassing: East Frisian Islands, West Germany. *Marine Geology* 60, p. 355-376.
- Flemming, B.W. & Davis, R.A., 1994. Holocene evolution, morphodynamics and sedimentology of the Spiekeroog barrier island system (Southern North Sea). *Senckenbergiana Maritima* 24 (1/6), p. 117-155.
- Gawehn, M., 2020. Ontwikkeling en toepassing X-Band radar voor morfologische analyse van het Amelander Zeegat. Eindrapportage ten behoeve van Kustgenese 2.0. Deltares report 1220339-007-ZKS-005, Deltares, Delft.
- Hein, C.J., Fitzsimons, G.G., FitzGerald, D.M., Fallon, A.R., 2016. Records of migration and ebb-delta breaching at historic and ancient tidal inlets along a river-fed paraglacial barrier island. *Journal of Coastal Research* SI 75, p. 228-232.
- Hillen, R. & De Haan, Tj., 1993. Development and implementation of the coastal defence policy for the Netherlands. In: Hillen, R. & Verhagen, H.J. (eds.) *Coastlines of the southern North Sea*, American Society of Civil Engineers (New York, NY), p. 118-201.
- Hillen, R. & Roelse, P., 1995. Dynamic Preservation of the Coastline in the Netherlands. *Journal of Coastal Conservation*, Vol. 1, No. 1, p. 17-28.
- Israël, C.G., 1998, Morfologische Ontwikkeling Amelander Zeegat. Report RIKZ/OS-98.147x (in Dutch), Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ, The Hague.
- Israël, C.G., Dunsbergen, D.W., 1999. Cyclic morphological development of the Ameland Inlet, The Netherlands. *Proceedings of Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Genova, Italy, Volume 2, p. 705-714.
- Jarrett, J.T., 1976. Tidal Prism – Inlet Area Relationships. General Investigation of Tidal Inlets, Report no. 3. Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers, Washington D.C.
- Louters, T., & Gerritsen, F., 1994. The Riddle of the Sands. A Tidal System's Answer to a Rising Sea Level., Report RIKZ-94.040. Rijkswaterstaat RIKZ, The Hague.
- O'Brien, M.P., 1931. Estuary tidal prisms related to entrance areas. *Civil Engineering* 1, p. 738-739.
- O'Brien, M.P., 1969. Equilibrium flow areas of inlets and sandy coasts. *Journal of Waterways, and Harbors, Harbor Division*, 95 (1), p. 43-55.
- Oertel, G.F., 1975. Ebb-tidal deltas of Georgia Estuaries. In: Cronin, L.E. (ed.): *Estuarine Research*, vol. 2. Academic Press, New York, p. 267-276.

- Oertel, G.F., 1977. Geomorphic cycles in ebb deltas and related patterns of shore erosion and accretion. *Journal of Sedimentary Petrology* 47, p. 1121-1131.
- Oost, A.P., 1995. Dynamics and Sedimentary Development of the Dutch Wadden Sea with Emphasis on the Frisian Inlet. A Study of Barrier Islands, Ebb-Tidal Deltas, Inlets and Drainage Basins. *Geologica Ultraiectina* 126, 454 pp.
- Van Rhijn, M.W., 2019. Sediment transport during the execution of the pilot nourishment Ameland Inlet. MSc. Thesis, Delft University of Technology, Delft, 197 pp.
- Rijkswaterstaat, 1990. A new coastal defence policy for the Netherlands. Rijkswaterstaat, Tidal Waters Division (The Hague): 100 pp.
- Rijkswaterstaat, 2016. Memo Rekenregel suppletievolumen, versie 1.0, 11 december 2016.
- Robin N. Levoy, F., Monfort, O., Anthony, E., 2009. Short-term to decadal-scale onshore bar migration and shoreline changes in the vicinity of a mega-tidal ebb delta. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 114, F04024.
- de Ruig, J.H.M., 1998. Coastline management in The Netherlands: human use versus natural dynamics. *Journal of Coastal Conservation*, 4 (2), p. 127-134.
- Sha, L.P., 1989. Variation in ebb-tidal delta morphologies along the west and East Frisian Islands, the Netherlands and Germany. *Marine Geology* 89, p. 11-28.
- Son, C.S., Flemming, B.W., Bartholomä, A., 2011. Evidence for sediment recirculation on an ebb-tidal delta of the East Frisian barrier-island system, southern North Sea. *Geo Marine Letters* 31, p. 87-100.
- Van der Spek, A.J.F., 1994. Large-Scale Evolution of Holocene Tidal Basins in The Netherlands. Ph.D. Thesis, Utrecht University (Utrecht).
- Van der Spek, A.J.F., 1995. Reconstruction of tidal inlet and channel dimensions in the Frisian Middelzee, a former tidal basin in the Dutch Wadden Sea. In: Flemming, B.W., Bartholomä, A. (Eds.), *Tidal Signatures in Modern and Ancient Sediments*. International Association of Sedimentologists, Special Publication 24. Blackwell Science, Oxford, p. 239-258.
- Stive, M.J.F., Wang, Z.B., 2003. Morphodynamic modeling of tidal basins and coastal inlets. In: Lakhani, C. (Ed.), *Advances in Coastal Modelling*. Elsevier Oceanography Series 67, p. 367-392.
- Van Straaten, L.M.J.U., 1975. De sedimenthuishouding van de Waddenzee. In: Swennen, C., De Wilde, P.A.W.J. & Haeck, J. (Eds): *Symposium Waddenonderzoek*, April 7, 1973 (in Dutch, with English summary). Mededeling Werkgroep Waddenzee 1 (Amsterdam), p. 5-20.
- De Vriend, 1991. Mathematical modelling and large-scale coastal behaviour, Part 1: physical processes. *Journal of Hydraulic Research* 29, p. 727-740.
- Walton, T.L., Adams, W.D. 1976. Capacity of inlet outer bars to store sand. *Proceedings 15th Coastal Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii. American Society of Civil Engineers, New York, p. 19-37.
- Wang, Z.B., Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Lodder, Q.L., 2018. Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea - impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Netherlands Journal of Geosciences* 97-3, p. 183-214.

Van Weerdenburg, R.J.A. (2019). Exploring the importance of wind for exchange processes around a tidal inlet system: the case of Ameland Inlet. MSc. Thesis Delft University of Technology, Delft, 78 pp.

Zijderveld, A., Peters H., 2006. Measurement program Dutch Wadden Sea. Proceedings 30th International Conference on Coastal Engineering, San Diego, USA. American Society of Civil Engineers, New York, p. 404-410.