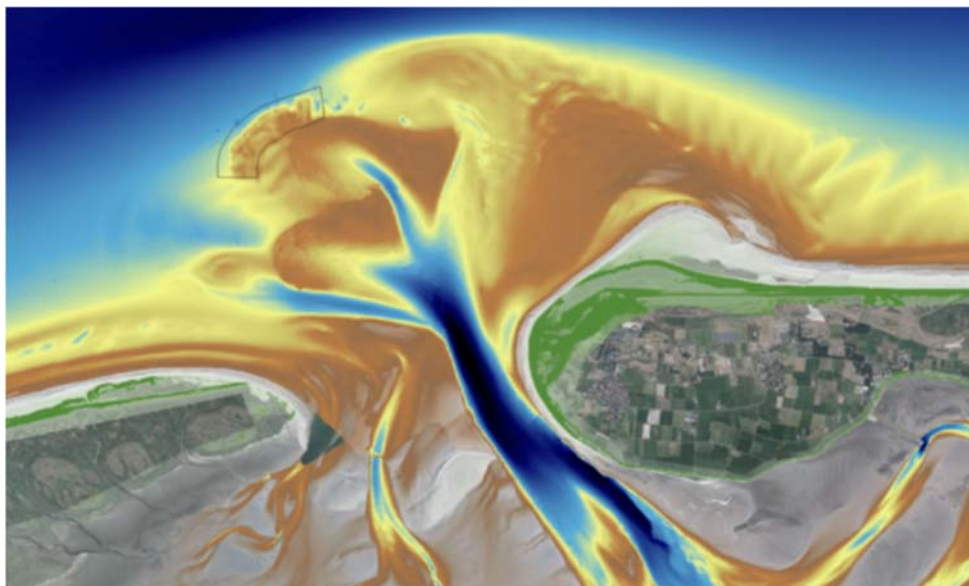




RWS BEDRIJFSINFORMATIE

Eindrapportage pilotsuppletie buitendelta Ameland Zeegat

Beschouwing morfologische en ecologische resultaten na aanleg van een pilotsuppletie op de buitendelta van het Ameland Zeegat



Datum	5 december 2022
Versie	1.0
Status	DEFINITIEF

Colofon

Uitgegeven door	RWS WVL
Auteur	Eltjo Ebbens (Ebbens Wateradvies)
Bijdragen	Cor Schipper (RWS-ZD), Stefan Pluis (RWS-WVL), Harry de Looff (RWS-WVL), Bernadette Botman (B2Consultancy) en Carola van Gelder-Maas (RWS-WVL)
Informatie	Harry de Looff (RWS-WVL)
E-mail	harry.de.looff@rws.nl
Datum	5 december 2022
Versie	1.0
Status	DEFINITIEF

Samenvatting

Een pilotsuppletie als onderdeel van Kustgenese 2.0.

In de periode 2015-2020 is het kennis- en onderzoeksprogramma Kustgenese 2.0 uitgevoerd. Dit programma had tot doel om kennis te genereren over het Nederlandse zandige kuststelsel, om na 2020 goed onderbouwde besluiten te kunnen nemen over het toekomstig beleid en beheer van dit stelsel. Eén van de onderdelen van dit programma betrof het uitvoeren van een pilotsuppletie op de buitendelta om de kennis met betrekking tot de werking van buitendelta's verder te ontwikkelen en de uitvoerbaarheid en vergunbaarheid van een dergelijke suppletie te kunnen testen.

Pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat

Als locatie voor de pilot suppletie is gekozen voor het Amelanders Zeegat, aangezien dit zeegat relatief lang ongestoord is én er in afgelopen decennia al veel kennis over is opgedaan door de uitvoering van verschillende meet- en monitoringsprogramma's. De pilotssuppletie is uitgevoerd tussen maart 2018 en februari 2019, waarbij in totaal 5 miljoen m³ zand op de buitendelta is aangebracht. Zowel voor, tijdens als na aanleg heeft intensieve monitoring plaatsgevonden. Daarnaast zijn aanvullende morfologische modelstudies uitgevoerd, wat veel waardevolle inzichten heeft opgeleverd met betrekking tot het gedrag van buitendeltasuppleties.

Eindevaluatie

Inmiddels is het monitoringsprogramma met betrekking tot de pilotsuppletie afgerond en zijn meerdere publicaties beschikbaar over zowel de morfologische (o.a. Elias, 2021) als de ecologische resultaten (o.a. Van Hal et. al., 2021 en Escaravage, 2022). Hierdoor is het mogelijk om de eindevaluatie van de pilotsuppletie op te stellen. Deze evaluatie heeft als doel om 1) een samenvatting te geven van de morfologische en ecologische ontwikkeling van de pilotsuppletie en 2) een overzicht te bieden van de belangrijkste conclusies en aanbevelingen, 3) handvaten te bieden om het instrument 'buitendeltasuppletie' in te kunnen zetten ten behoeve van het kustbeheer en 4) inzicht te bieden in de bredere impact van de pilotsuppletie op de wetenschap, samenwerking met partijen en onderzoeksmethodieken.

Eerdere conclusies naar aanleiding van de tussenrapportage pilotsuppletie

De opgestelde tussenevaluatie (Ebbens, 2019) vormt een belangrijk vertrekpunt voor deze eindevaluatie. Hieruit volgde al de conclusies dat het aanbrengen van een suppletie van 5 miljoen m³ op de buitendelta van het Amelanders Zeegat, op basis van de toen geldende wet- en regelgeving, vergunbaar was. Ondanks de bestaande dynamiek (onder invloed van stromingen en golven) op de buitendelta bleek de suppletie tevens uitvoerbaar. Bij de betrokken stakeholders bestond - mede dankzij het omvangrijke monitoringsprogramma - draagvlak voor het uitvoeren van de pilotsuppletie in het Amelanders Zeegat.

Beschouwing morfologische resultaten

Uit de uitgevoerde monitoring blijkt dat de aangebrachte suppletie op een geleidelijke wijze is opgenomen in het autonome morfologische stelsel van de buitendelta. De suppletie is hierdoor te typeren als een "stelsel-volgende" suppletie. De combinatie van uitgebreide metingen en modellering geeft veel inzicht in de morfologische veranderingen op de buitendelta en de maatgevende processen. Uit de aanvullende modellering blijkt dat suppleties op andere locaties in de buitendelta wel het

autonome gedrag van de buitendelta kunnen beïnvloeden. Dit type buitendeltasuppleties kunnen gedefinieerd worden als “systeem-veranderende” suppleties. De verkregen kennis maakt het mogelijk om morfologische processen in andere zeegaten beter te kunnen duiden.

Beschouwing ecologische resultaten

Voor aanleg van de pilotsuppletie was weinig bekend over de ecologische natuurwaarden van buitendelta's. Het ecologische monitoringsprogramma, waarbij zowel voor aanleg (T0, 2017) als na afloop van de pilotsuppletie (T1, 2019 & T2, 2021) ecologisch onderzoek heeft plaatsgevonden, heeft hier verandering in aangebracht. Dankzij het monitoringsprogramma is het gelukt om de relatie tussen de (morfologische) omstandigheden en de dichtheid en samenstelling van het bodemleven inzichtelijk te maken. Hierdoor is het mogelijk om het (tijdelijke) effect van buitendeltasuppleties op de bodemgemeenschap beter in te kunnen schatten. De suppletie is op een gunstige plek aangelegd, aangezien de oorspronkelijke bodemgemeenschap voornamelijk uit kortlevende mobiele soorten (lage dichtheid aan schelpdieren) bestond die snel kunnen reageren op veranderingen in de omgeving. Drie jaar na aanleg van de pilotsuppletie heeft zich ter hoogte van de suppletie opnieuw een bodemdiergemeenschap ontwikkeld die vergelijkbaar is met de situatie voor aanleg, met uitzondering van de schelpdieren. Op basis van het uitgevoerde benthosonderzoek kan worden geconcludeerd dat de effecten van de pilotsuppletie beperkt zijn in omvang. De samenstelling van benthosgemeenschappen op de buitendelta wordt sterk beïnvloed door de aanwezige golven en stroming in combinatie met diepte en sedimentsamenstelling. Door te suppleren in de dynamische delen van het gebied kan de ecologische impact worden beperkt omdat hier de meest robuuste soorten voorkomen.

Buitendeltasuppleties als instrument voor kustbeheer

De uitgevoerde pilotsuppletie toont de potentie aan van buitendeltasuppleties als instrument om het kustfundament op lange termijn (>20 jaar) in evenwicht te houden. In navolging van het beleidsadvies Kustgenese 2.0 kunnen buitendeltasuppleties daarmee mede invulling geven aan de sedimentbehoefte van het Waddengebied. Om buitendeltasuppleties als instrument binnen het kustbeheer in te zetten is het wenselijk om een beleidsmatig instrument te ontwikkelen waarmee Rijkswaterstaat op een eenduidige en systematische wijze kan besluiten wanneer overgegaan dient te worden op het extra toevoegen van zand op de buitendelta. Door te blijven investeren in morfologische en ecologische kennisontwikkeling en een bijpassend modelinstrumentarium wordt inzicht verkregen in de autonome werking van zeegatsystemen en de impact van ingrepen hierop. Dit draagt bij aan het maken van een inschatting van het effect van de suppletie op de morfologie en natuurwaarden. Op basis van de pilotsuppletie volgt de verwachting dat effecten op de natuurwaarden van “systeem-volgende” buitendeltasuppleties vergelijkbaar zijn met de effecten van reguliere vooroever-suppleties, mits aangebracht op een locatie op de buitendelta die gekenmerkt wordt door een gemeenschap van kortlevende mobiele soorten. Per buitendeltasuppletie is echter sprake van maatwerk en omstandigheden kunnen veranderen in de tijd. De uitvoerbaarheid in het kader van de Wet natuurbescherming blijft voor iedere suppletie een belangrijk aandachtspunt. Gezien bovenstaande aanbevelingen ligt het voor de hand om het bestaande uitvoeringskader voor het suppletieprogramma te actualiseren, zodat Rijkswaterstaat Kustlijn-zorg op een systematische en navolgbare wijze buitendeltasuppleties kan programmeren als onderdeel van het kustonderhoud.

Pilotsuppletie als katalysator voor (wetenschappelijk) onderzoek

Vanuit Rijkswaterstaat is bij het uitvoeren van de pilotsuppletie actief de samenwerking gezocht met lopende (wetenschappelijke) onderzoeksprogramma's, zoals SEAWAD en KPP B&O Kust. De gezamenlijke meetcampagne in het Amelanders Zeegat voor aanvang van de suppletie is daar een voorbeeld van. De resultaten van de pilot hebben tevens bijgedragen aan het vormgeven van het project Zandige Kust onder het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Dankzij het monitoringsprogramma zijn meerdere promovendi en afstudeerders in aanraking gekomen met het werkveld van Rijkswaterstaat. Het organiseren van meerdere ecologische veldcampagnes achter elkaar maakte het mogelijk om ideeën en innovaties snel te kunnen implementeren, waardoor de efficiency en kwaliteit van het veldwerk is verbeterd.

Slotconclusies en aanbevelingen

De pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat heeft bijgedragen aan het vergroten van de morfologische en ecologische systeemkennis over zeegatsystemen. Daarnaast is er veel inzicht verworven in het ontwerp en haalbaarheid van buitendeltasuppleties. Het hele proces van ideevorming, voorbereiding, uitvoering, monitoring en evaluatie is relatief snel verlopen met veel steun vanuit de omgeving. Aanbevolen wordt om het gedrag van de pilotsuppletie blijvend te volgen door de jaarlijkse vaklodingen van het Amelanders Zeegat uit te voeren. Door binnen het project Zandige Kust onder het kennisprogramma Zeespiegelstijging en het onderzoeksprogramma KPP B&O Kust in samenwerking met het programma Kustlijnzorg openstaande leemten in kennis en het modelinstrumentarium op te pakken, wordt de basis gelegd om buitendeltasuppleties ook op andere buitendelta's mogelijk te maken. Vanuit Rijkswaterstaat is het wenselijk dat er een beleidsmatig instrument beschikbaar is waarmee op een eenduidige en systematische wijze besloten kan worden tot het toevoegen van extra zand op de buitendelta. Voor het kustbeheer is het ook wenselijk om verder te investeren in morfologische en ecologische kennisontwikkeling én in meer detail te kijken naar de uitvoerbaarheid van buitendeltasuppleties op basis van de huidige wet- en regelgeving.

Inhoud

Samenvatting 5

Inhoud 8

1 Inleiding 10

- 1.1 Een buitendeltasuppletie als pilot binnen Kustgenese 2.0 10
- 1.2 Pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat 10
- 1.3 Eindevaluatie pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat 11
- 1.4 Leeswijzer 12

2 Achtergrondinformatie en context 13

- 2.1 Buitendelta's & Waddengebied 13
- 2.2 Beschrijving van het Amelanders Zeegat 14
- 2.3 Pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat 16
- 2.4 Monitoring- en evaluatieprogramma 18
- 2.5 Beschikbare publicaties 19

3 Inzichten vanuit de voorbereiding en aanleg 20

- 3.1 Locatiekeuze en ontwerp 20
- 3.2 Organisatie, draagvlak en vergunningen 21
- 3.3 Resultaten meetcampagne T0 meting voor aanvang van de aanleg 22
- 3.4 Uitvoering suppletie 24
- 3.5 Eerdere getrokken conclusies voorbereiding en aanleg 26

4 Morfologische inzichten vanuit monitoring en onderzoek 28

- 4.1 Resultaten bathymetrische monitoring 28
- 4.2 Morfologische inzichten werking Amelanders Zeegat 29
- 4.3 Innovatieve modellen als aanvullende opbrengst 31
- 4.4 Effect buitendeltasuppletie op de autonome processen van een zeegat 33

5 Ecologische inzichten vanuit monitoring en onderzoek 35

- 5.1 Ecologische kartering Amelanders Zeegat op basis van fysiotopen 35
- 5.2 Resultaten ecologische monitoring T1 en T2 37
- 5.3 Inzichten vanuit ecologische monitoring en onderzoek 39

6 Een buitendeltasuppletie als instrument voor kustbeheer 43

- 6.1 Relatie van buitendeltasuppleties met de huidige suppletievormen 43
- 6.2 Beleidsadvies Kustgenese 2.0: introductie tijdshorizon 44
- 6.3 Beschouwing toepasbaarheid buitendeltasuppleties 44
- 6.4 Conclusies en aanbevelingen toepasbaarheid buitendeltasuppleties 47

7 Bredere opbrengst van de pilotsuppletie 50

- 7.1 Gezamenlijk veldwerk en data-management 50
- 7.2 Wetenschappelijke opbrengst pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat 51
- 7.3 Innovaties in het veldwerk 51

8 Conclusies en aanbevelingen 53

- 8.1 Conclusies op hoofdlijnen 53
- 8.2 Conclusies per thema 54
- 8.3 Aanbevelingen 56

9 Literatuurverwijzingen indevaluatie 58

Bijlage A Opgestelde hypothesen en onderzoeksvragen 60

**Bijlage B Literatuuroverzicht pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat
61**

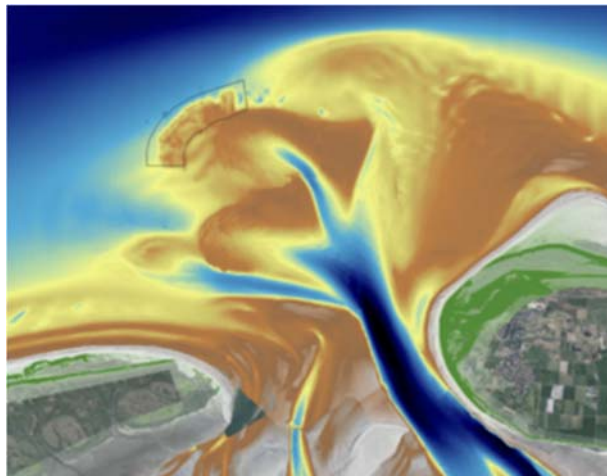
1 Inleiding

In dit inleidende hoofdstuk wordt ingegaan op de achtergrond en doelen van de pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat. Vervolgens wordt ingegaan op de doelen en gevolgde werkwijze van deze eindevaluatie. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een leeswijzer.

1.1 Een buitendeltasuppletie als pilot binnen Kustgenese 2.0

Het onderzoeksprogramma Kustgenese 2.0 liep tussen 2015 en 2020 en had als doel om kennis te genereren over het Nederlandse zandige kuststelsel, om na 2020 goed onderbouwde besluiten te kunnen nemen over toekomstig beleid en beheer van de kust. Naast kennisontwikkeling had Kustgenese 2.0 ook de opdracht voor het uitvoeren van een of meer pilots. Concreet is hier invulling aan gegeven door het uitvoeren van een pilot op de buitendelta van het Amelanders Zeegat. De buitendelta vormt een buffer waar grote hoeveelheden zand in opgeslagen zijn en heeft hierdoor een belangrijke rol voor de toevoer van sediment naar de eilandkusten als ook de bescherming van eilandkoppen en getijbekkens tegen golfaanvallen. Het risico bestaat dat op termijn buitendelta's kleiner worden door de zandvraag vanuit de Waddenzee, waardoor de koppen en eilandkusten op termijn minder zand krijgen en minder beschermd zijn.

Binnen Kustgenese 2.0 is daarom onderzocht in hoeverre suppleren op de buitendelta een kansrijke methode kan zijn om het kustfundament van voldoende sediment te kunnen voorzien. Naast een algemeen bureauonderzoek naar de werking van buitendelta's, de mogelijkheden voor het fysiek kunnen uitvoeren van buitendeltasuppleties en de meerwaarde voor het kustbeheer is gericht onderzoek gedaan naar de uitvoering en effecten door aanleg van een pilotsuppletie op de buitendelta van het Amelanders Zeegat.



Figuur 1 Locatie pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat

1.2 Pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat

Keuze voor het Amelanders Zeegat

Bij de keuze van een geschikte locatie voor een buitendeltasuppletie kwam het Amelanders Zeegat al snel naar voren. Deze buitendelta is namelijk een relatief

ongestoorde buitendelta. De aanleg van de Afsluitdijk heeft gezien de oostelijke ligging van de komberging nauwelijks effect gehad op het Amelanders Zeegat. Dankzij eerdere meet- en onderzoeksprogramma's in de nabijheid van het Amelanders Zeegat zoals Sterkte en Belasting van Waterkeringen (SBW), Synoptic Intertidal Benthic Survey (SIBES) en Ecologisch gericht suppleren (EGS)¹ was reeds een stevige kennisbasis aanwezig.

Gevolgte aanpak

In 2016 is gestart met de voorbereidingen voor het uitvoeren van de pilotsuppletie op het Amelanders Zeegat. In 2017 is het ontwerp voor de suppletie bepaald, zijn belanghebbende instanties geconsulteerd, zijn de noodzakelijke vergunningen aangevraagd en is een aannemer gecontracteerd. Tussen maart 2018 en maart 2019 is de pilotsuppletie aangelegd. De jaren 2019 tot en met 2022 hebben in het teken gestaan van monitoring en evaluatie.

Doelstellingen van de pilotsuppletie

De pilotsuppletie is aangelegd met als doel om ervan te leren. Bij het uitwerken van het plan van aanpak (Rijkswaterstaat, 2016) zijn de volgende doelstellingen voor de pilot opgesteld.

1. Vergroten van kennis over zeegatsystemen:
 - a. Morfologische kennis zeegatsystemen verder ontwikkelen;
 - b. Kennis omtrent het effect op natuurwaarden in buitendelta's vergroten en inzicht krijgen in kansen en bedreigingen voor natuur voor zowel habitats als soorten in Waddenzee en Noordzeekustzone;
2. Inzicht verkrijgen in ontwerp en haalbaarheid (draagvlak, vergunbaarheid en uitvoerbaarheid) van een buitendeltasuppletie ter onderbouwing van het advies van het programma Kustgenese 2.0 over de langetermijn zandsuppletie strategie;
3. Bijdragen aan versterken van het kustfundament conform beleid uit de tweede en derde kustnota.

Morfologisch en ecologische monitoring

Om te kunnen leren van de pilot is een omvangrijk monitoringsprogramma opgesteld en uitgevoerd. Zowel voor, tijdens als na aanleg heeft intensieve morfologische en ecologische monitoring plaatsgevonden om te leren van de uitvoering, het gedrag van de suppletie en om zicht te hebben in hoeverre de suppletie effect heeft op de aanwezige natuurwaarden.

1.3 Eindevaluatie pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat

Timing en scope

Inmiddels is het monitoringsprogramma van de pilotsuppletie afgerond en zijn meerdere rapporten beschikbaar waarin de resultaten worden beschreven en geanalyseerd. In de tussenevaluatie van de pilot (Ebbens, 2019) is reeds uitvoerig

¹ Ecologisch gericht suppleren was een samenwerking tussen Rijkswaterstaat en vier natuurbeschermingsorganisaties, waarbij onderzoek verricht wordt naar mogelijke effecten van zandsuppleties op het kustecosysteem (inmiddels voortgezet in Natuurlijk Veilig). SIBES staat voor Synoptic Intertidal Benthic Surveys of the Wadden Sea en zorgt voor jaarlijkse bemonstering van alle droogvallende delen van de Nederlandse wadbodem.

stilgestaan bij zowel de voorbereiding als de aanleg van de suppletie. Deze eindevaluatie bouwt hierop voort en concentreert zich met name op de recente monitoringsresultaten na aanleg van de pilotsuppletie (periode 2019-2022).

Elias (2021) heeft op basis van de resultaten van de uitgevoerde morfologische monitoring een analyse opgesteld van de morfologische werking van de buitendelta van het Ameland Zeegat inclusief de rol van de pilotsuppletie. De conclusies met betrekking tot de ecologische impact van de pilotsuppletie zijn na de T1 (2019) en T2 (2021) beschreven in respectievelijk Van den Bogaart et. al. (2019) en Escaravage (2022).

Bij de interpretatie van de monitoringsresultaten is dankbaar gebruik gemaakt van beschikbare resultaten uit gerelateerde onderzoeksprogramma's als KPP Beheer & Onderhoud Kust (KPP B&O Kust) en SEAWAD². Daarnaast wordt tevens een doorkijk gegeven wat er nodig is om buitendeltasuppleties als instrument binnen het kustbeheer toe te kunnen passen. Daarmee heeft deze eindevaluatie een bredere scope dan alleen het toetsen in hoeverre de opgestelde doelstellingen zijn bereikt.

Doelstellingen voor de eindevaluatie

De eindevaluatie heeft de volgende doelen:

1. Een samenvattend beeld te geven van de morfologische ontwikkeling van de pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat én de effecten op de ecologie van het Amelanders Zeegat;
2. Een overzicht te bieden van de belangrijkste conclusies en aanbevelingen met betrekking tot de uitvoering van buitendeltasuppletie op basis van recente kennis en expertise;
3. Inzichtelijk te maken wat nodig is om buitendeltasuppleties in te zetten als instrument binnen het kustbeheer;
4. Inzicht te bieden in de bredere impact van de pilotsuppletie.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt in ingegaan op de aanleiding voor de pilotsuppletie, de kenmerken van het Amelanders Zeegat en de gehanteerde aanpak van de pilot en de monitoring in het bijzonder. In hoofdstuk 3 zijn de resultaten en conclusies over de jaren 2016 – 2019, de periode van voorbereiding tot en met aanleg, samengevat. De inhoudelijke kern van deze eindevaluatie wordt gevormd door de hoofdstukken 4 en 5. In deze hoofdstukken worden de resultaten vanuit de morfologische en ecologische monitoring weergegeven, inclusief de inzichten die de monitoring uiteindelijk heeft opgeleverd. In hoofdstuk 6 komt de potentie van het toepassen van buitendeltasuppleties als instrument binnen het kustbeheer aan bod. Na een beschouwing van de bredere impact van de pilotsuppletie in hoofdstuk 7 wordt afgesloten met een concluderend hoofdstuk 8 waarin ook aanbevelingen zijn opgenomen.

² SEDiment supply At the WAdden sea ebb-tidal Delta, een 4 jaar durend onderzoeksproject waarbij de universiteiten van Delft, Utrecht en Twente samen fundamenteel onderzoek doen naar de (systeem) werking van de Nederlandse buitendelta's.

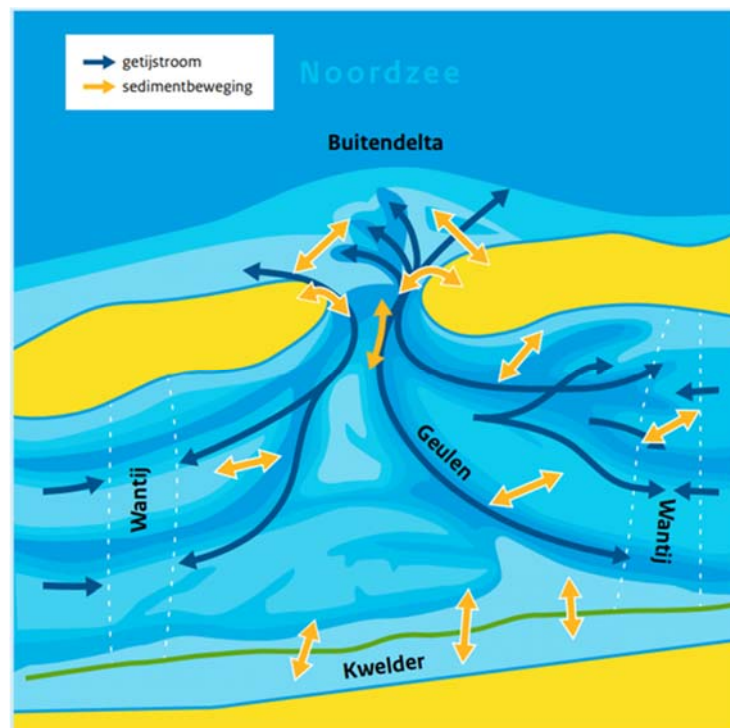
2 Achtergrondinformatie en context

In dit hoofdstuk wordt de nodige achtergrondinformatie en context verstrekt met betrekking tot de pilotsuppletie op de buitendelta van het Amelanders Zeegat. Achtereenvolgens wordt ingegaan op de rol van buitendelta's binnen het kustbeheer, de kenmerken van het Amelanders Zeegat, de gevolgde aanpak van de pilotsuppletie en de context waarbinnen het onderzoek naar de werking en de effecten van de suppletie plaatsvond.

2.1 Buitendelta's & Waddengebied

Systeembeschrijving: Zeegaten en buitendelta's

Zeegaten vormen een smalle opening waarin ieder getij grote hoeveelheden water en sediment doorheen geperst worden. Er ontstaan hoge stroomsnelheden die zich tijdens eb ver zeewaarts uitstrekken. Waar de snelheden kleiner worden dan de kritische transportsnelheid voor bezinking vormen zandbanken. Hierdoor ontstaat aan de zeezijde de ondiepte die ebdelta of buitendelta wordt genoemd. Aan de landzijde is het proces omgekeerd. Hier ontstaat de vloeddelta. De buitendelta's beïnvloeden en bepalen voor een groot deel de (lokale) dynamiek van de naastliggende eilanden en de zandtransporten langs de eilandkusten. De buitendelta vormt het doorgeefluik voor de sedimentstroom van het 'bovenstroomse' eiland naar het 'benedenstroomse' eiland. Daarnaast dempt de buitendelta de invloed van golven op de Waddenzee (zie Figuur 2).



Figuur 2 Het zanddelende systeem van het kustfundament en de Waddenzee. Bron: Rijkswaterstaat (2020)

De Waddenkust wordt gekenmerkt door een aaneenschakeling van zeegatsystemen en eilanden. Elk zeegatsysteem heeft een buitendelta (of ebdelta) en een vloeddelta. De morfologie van deze gebieden is dynamisch en verandert constant door het samenspel van golven en stromingen. Geulen veranderen van positie en zandplaten vormen en migreren over de buitendelta in de richting van het benedenstroomse eiland. Daarmee vormen buitendelta's een samenhangend, zanddelend systeem binnen de zeegatsystemen en zijn buitendelta's een schakel tussen de getijdenbekkens van de Waddenzee en de eilandkusten (Elias et al., 2012). De buitendelta's en de eilanden zijn een belangrijk onderdeel van het kustfundament van het Waddengebied.

Afnemende sedimentvolumes hebben effect op onderhoud van de kustlijn

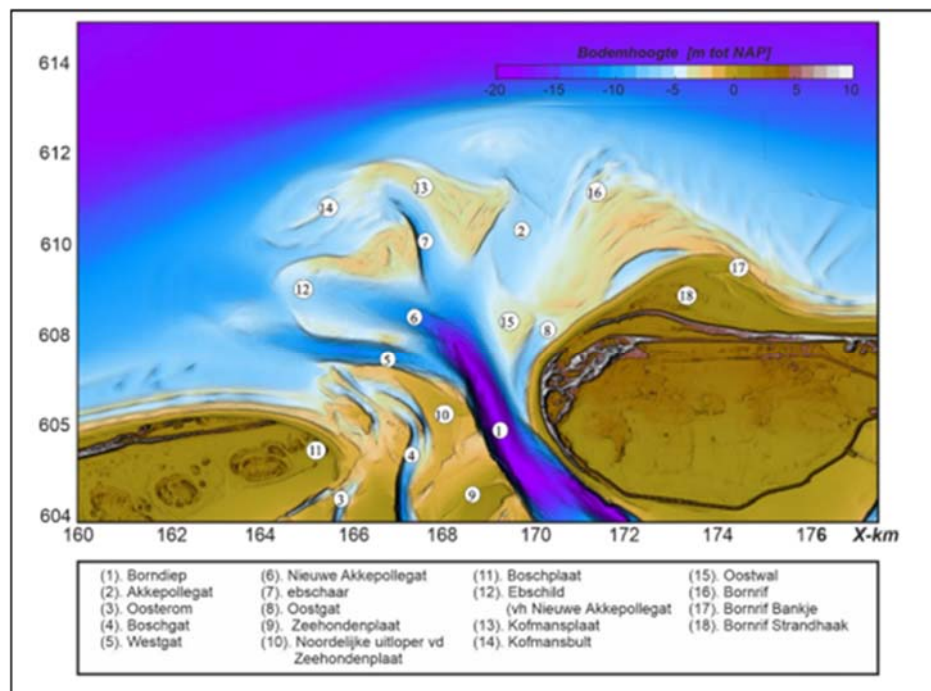
Op een aantal buitendelta's zijn veranderingen in vorm en een terugloop van de omvang (volume) waargenomen. Studies laten zien dat er in de afgelopen decennia een aanzienlijk volume sediment vanuit het kustfundament naar de Waddenzee is getransporteerd (o.a. Elias et al., 2020). Dit sedimenttransport vormt een belangrijke 'verliespost' voor het kustfundament. De Waddenzee maakt namelijk geen onderdeel uit van het kustfundament. Een deel van het zand op de buitendelta's komt door natuurlijke processen op de Noordzeekust van de eilanden terecht. Door de terugloop van de omvang van buitendelta's bestaat de kans dat op termijn bestaande erosieprocessen aan de Noordzeekust toenemen, waardoor het suppletievolume en wellicht de frequentie van suppleties ten behoeve van het kustlijnonderhoud op de eilanden toenemen. Buitendeltasuppleties hebben de potentie om bij te dragen aan het dynamisch handhaven van de kustlijn op de langere termijn én aan het mee laten groeien van het kustfundament met de zeespiegelstijging.

2.2 Beschrijving van het Amelanders Zeegat

Morfologische beschrijving Amelanders Zeegat

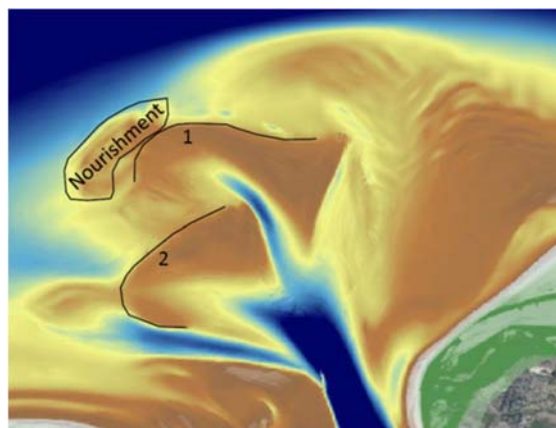
Binnen Kustgenese 2.0 is, mede door de locatie van de pilot suppletie, veel kennis en expertise opgedaan van de optredende processen binnen het Amelanders Zeegat en uitvoerig over gerapporteerd. Het Amelanders Zeegat wordt hieronder beschreven op basis van de 2021 bodem (Elias, 2021). Zie Figuur 3 voor de ruimtelijke weergave.

De dominante uitstroomgeul wordt gevormd door het Borndiep [1] en loopt langs de westkust van Ameland. De meest landwaarts gelegen eb-schaar [6] vormt in deze bodem de belangrijkste uitstroomgeul. Deze geul heeft de functie van het Akkepollegat overgenomen en heeft daarom de naam Nieuwe Akkepollegat gekregen. Op de buitendelta bevinden zich drie duidelijke platen [12, 13, 16]. De grootste plaat, Bornrif [16], ligt oostelijk van het Akkepollegat [2]. Als onderdeel van de sediment-bypassing cyclus vormen er zich periodiek op het Bornrif kleinere platen zoals het Bornrif Bankje [17] en de Bornrif Strandhaak [18]. Aan de zeewaartse zijde van de Boschplaat [11] bevindt zich de vloed-gedomineerde geul Westgat [5]. Op de Kofmansbult [14] hebben zich recent twee ebscharen [6 en 7] met bijbehorende ebschilden gevormd [12 en 13]. Het zeewaartse ebschild [13] is de Kofmansplaat. Het zuidelijke eb-schild [12] heeft zich vanaf 2016 ontwikkeld. Het merendeel van het sedimenttransport met de buitendelta vindt via dit landwaartse eb-schild plaats. Sedimenttransport naar de buitendelta rand vindt plaats via het zeewaardse ebschild en via het Akkepollegat.



Figuur 3 beschrijving van Amelanders Zeegat op basis van recente bodem van 2021 (Elias, 2021)

In Figuur 4 is de ligging van beide eb-schilden bij aanleg van de suppletie weergegeven (Ebbens, 2019).



Figuur 4 Overzicht van zeewaartse eb-schild (1) en landwaartse eb-schild (2)

Ecologische beschrijving Amelanders Zeegat

De buitendelta van het Amelanders Zeegat behoort tot het Natura 2000 gebied Noordzeekustzone. De Noordzeekustzone is aangewezen voor diverse habitattypen en soorten vogels, vissen en zeezoogdieren. In een groot deel van de Noordzee, en ook in de buitendelta's, is het habitatype permanent overstromde zandbanken aanwezig. Op de bodem komen wormen, schelpdieren en andere weekdieren voor. Ook is het een belangrijk opgroei gebied voor vis. Waar voor aanleg van de

pilotsuppletie op morfologisch vlak al veel bekend was over het Amelanders Zeegat, was op ecologisch vlak sprake van een kennislacune (Leopold & Baptist, 2016). Uit habitatmodellering was al wel bekend dat de buitendelta's vanwege hoge dynamiek relatief ongeschikt (zouden moeten) zijn voor de grote tweekleppigen die talrijk in de Noordzeekustzone en aan de randen van de buitendelta's voorkomen. Daarnaast was de verwachting dat buitendelta's wel van belang waren als leefgebied voor vissen als zandspijering, tarbot, griet en mogelijk haaien.

2.3 Pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat

Welk proces is doorlopen?

Het doorlopen proces met betrekking tot de pilotsuppletie is onder te verdelen in een drietal verschillende fases: 1) de voorbereidingsfase met aandacht voor scope, ontwerp en vergunningverlening, 2) realisatiefase waarin contractering van de aannemer centraal stond inclusief de aanleg en 3) monitoring- en evaluatiefase waarin op basis van onderzoeksresultaten conclusies getrokken over de morfologische werking van buitendeltasuppleties en de eventuele effecten op de ecologie. Hieronder wordt het doorlopen proces geschetst. In Figuur 5 wordt dit schematisch weergegeven.

De jaren 2016 en 2017 hebben in het teken gestaan van de voorbereiding, ontwerp, consultatie, vergunningverlening en contractering. De suppletie zelf is aangelegd tussen maart 2018 en maart 2019. De periode van 2019 – 2022 is gebruikt voor het uitvoeren van aanvullende monitoring en het evalueren van de resultaten.



Figuur 5 Doorlopen proces, activiteiten en mijlpalen

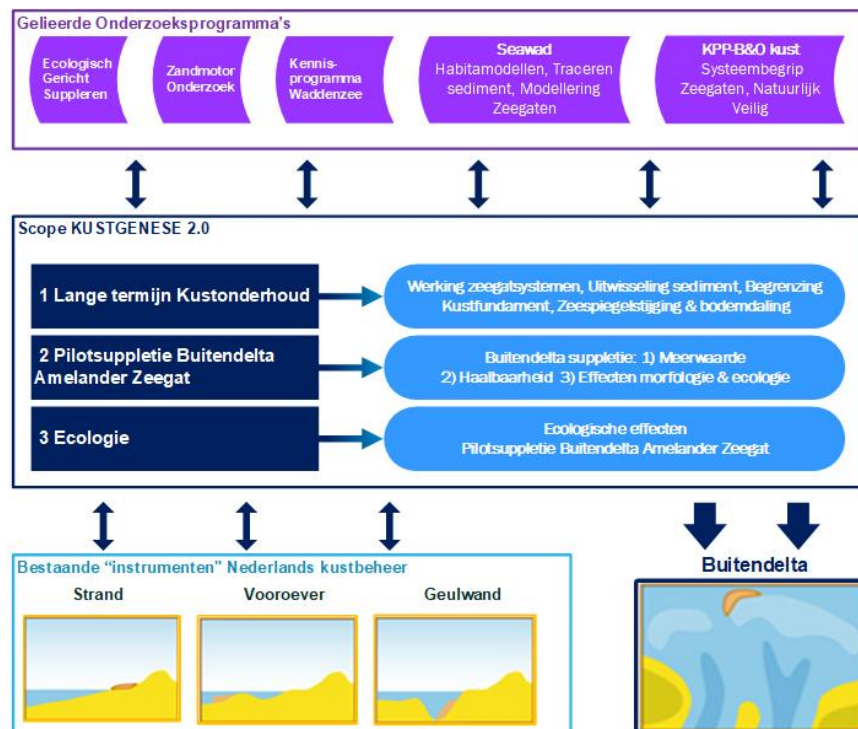
In september 2022 is een brede expertbijeenkomst georganiseerd, waarbij zowel morfologen als ecologen aan deel namen. Aan de hand van deze workshop zijn de voorlopige resultaten en conclusies nader aangescherpt.

Context van de pilotsuppletie

Zoals in hoofdstuk 1 en in paragraaf 1.1 aangegeven was de pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat ingebed binnen het programma Kustgenese 2.0. Rijkswaterstaat heeft bij de uitvoering van de pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat breed de samenwerking gezocht met andere onderzoeksprogramma's die zich richten op het beter begrijpen van de ecologische en morfologische processen in buitendelta's en

het Amelanders Zeegat in het bijzonder. Bijvoorbeeld met het onderzoeksprogramma SEAWAD, waar o.a. gewerkt werd aan modellen voor het traceren van sediment en het opstellen van habitatmodellen. De meetcampagne in het Amelanders Zeegat in het kader van Kustgenese 2.0 is ook samen met de onderzoekers van SEAWAD voorbereid en uitgevoerd. Daarnaast vond er veelvuldig afstemming plaats tussen het projectteam van de pilotsuppletie en KPP B&O Kust. Vooral de aanvullende morfologische modelleringen zijn erg relevant voor het vertalen van de lessen van het Amelanders Zeegat naar een meer generalistisch niveau. In Figuur 6 is de context waarbinnen de pilot plaatsvond schematisch weergegeven.

Bij de voorbereiding van de pilot kon daarnaast dankbaar gebruik gemaakt worden van eerdere meet- en onderzoeksprogramma's die gericht zijn geweest op het Amelanders Zeegat (zie paragraaf 1.2). De kennis en ervaring die is opgedaan uit het reguliere kustbeheer en projecten als de Zandmotor zijn uiteraard ook betrokken bij de opzet van de pilot. De aanleg van de pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat, de uitgevoerde modellering binnen het Programma Kustgenese 2.0 én het verrichte onderzoek vanuit gelieerde onderzoeksprogramma's heeft geresulteerd in een groot aantal rapporten en publicaties. Als input voor deze eindevaluatie is in september 2022 een expert workshop georganiseerd met experts op gebied van morfologie, ecologie en kustbeheer. Tijdens deze bijeenkomst zijn de resultaten en conclusies met betrekking tot de pilotsuppleties besproken en waar nodig aangescherpt. Gezien het doel van deze eindevaluatie om een samenvattend beeld te geven van de beschikbare rapporten is in bijlage B een overzicht opgenomen van de relevante publicaties.



Figuur 6 Schematische weergave van verband tussen de pilot, Kustgenese 2.0, instrumenten huidige kustbeheer en gelieerde onderzoeksprogramma's

2.4 Monitoring- en evaluatieprogramma

Om zoveel mogelijk te leren van de pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat is een uitgebreid monitoringsprogramma opgesteld. Bij het opstellen van het monitoringsplan is gebruik gemaakt van vooraf opgestelde hypothesen (zie bijlage A). De morfologische monitoring had als doel om de ontwikkeling van de suppletie te kunnen volgen en de link te kunnen leggen naar het gedrag van het zeegatsysteem. Om een goed gedetailleerd beeld te kunnen krijgen van de bathymetrische ontwikkelingen van het Amelanders Zeegat zijn in de jaren 2016 tot 2022 in totaal tien vaklodingen uitgevoerd. Daarnaast werden de ontwikkelingen continue gemeten door middel van de X-band radar. Voor aanvang van de suppletie is een grootschalige meetcampagne in het kader van Kustgenese 2.0 uitgevoerd, waarbij zowel bathymetrische als en hydromorfologische metingen zijn verricht. Middels 5 golfboeien zijn de lokale golfcondities in beeld gebracht. De aannemer heeft zowel tijdens als na aanleg meerdere lodingen uitgevoerd van de suppletielocatie en omliggend gebied.

De ecologische monitoring was primair toegespitst op benthos en bodemvis. Ter voorbereiding van de aanleg van de suppletie is een T0 meting verricht in 2017 met aandacht voor de bestaande natuurwaarden (benthos en vis) van het Amelanders Zeegat. Deze T0 meting werd tegelijk uitgevoerd met de hierboven omschreven meetcampagne.

Om goed de ecologische effecten in kaart te kunnen brengen is een T1 (2019) en T2 (2021) meting uitgevoerd, waarin benthos onderzoek is uitgevoerd. Bij het vaststellen van de bemonsteringslocaties is rekening gehouden met de aanwezigheid van fysiotopen. Dit zijn gebieden met vergelijkbare fysische omstandigheden qua sedimentatiepatroon, bodemhoogte, helling, oriëntatie en stroming. Tijdens deze metingen zijn over de gehele buitendelta korrelgrootte bepalingen van het sediment uitgevoerd. In 2019 heeft als onderdeel van de T1 tevens onderzoek naar de aanwezigheid van zandspiering en schol plaatsgevonden. In tabel 1 is een overzicht gegeven van alle monitoringsactiviteiten die zijn uitgevoerd in het kader van de pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat.

Naast de fysieke monitoringsactiviteiten zijn meerdere ondersteunende instrumenten ontwikkeld en modelberekeningen uitgevoerd, vanuit Kustgenese 2.0 of vanuit gerelateerde onderzoeksprogramma's. Het betreft de volgende modelleringen:

Tot en met aanleg

- Een analyse naar het verspreidingsgedrag van het nog aan te brengen zand op basis van numerieke tracers (Elias, 2017);
- Een instrument op basis van Matlab en QGIS software om de aanleg van de suppletie te kunnen monitoren (Van Rhijn, 2019);
- Een operationeel systeem op basis van (X-band)radarbeelden van het Amelanders Zeegat waarmee de bodemligging ingeschat kan worden (Gawehn et. al., 2020).

Na aanleg

- Morfostatistische modellering naar de invloed van de aangebrachte plotsuppletie op de autonome processen in het Amelanders Zeegat (Lambregts, 2021);

- Morfodynamische modellering waarmee de morfologische veranderingen van suppleties op de buitendelta op de lange-termijn voorspeld kunnen worden (Harlequin, 2021).

Tabel 1 Overzicht uitgevoerde bathymetrische en hydromorfologische metingen

Monitoringsactiviteiten pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat	
voorbereiding en aanleg 2016 – 2019	na aanleg 2019 – 2022
Morfologie	
Bathymetrie suppletie	
<u>T0</u> : Contour suppletielocatie + straal van 1 km (maart 2018)	<u>Ieder Kwartaal (8x)</u> : contour suppletielocatie + straal 1 km (gereed maart 2021)
<u>Uitvoering</u> : 8 metingen om 6 – 8 weken: contour suppletielocatie + 500m	
<u>Uitpeiling</u> : contour suppletielocatie + 500m (maart 2019)	
Bathymetrie Amelanders Zeegat	
Vakloding in voorjaar en najaar: 2016, 2017 en 2018	Vakloding in voorjaar 2019, 2020, 2021 en 2022
Continue meting d.m.v. X-band radar beelden (2017-2019)	Continue meting d.m.v. X-band radar beelden (2019-2021)
Hydromorfologische metingen	
<u>T0</u> : 2 meetframes op suppletielocatie: golf-, getij en sedimentbewegings-informatie (2017)	<u>T1</u> : 216 Sedimentmonsters voor korrelgrootte analyse in Amelanders Zeegat (2019)
<u>T0</u> : 216 Sedimentmonsters Amelanders Zeegat voor korrelgrootte analyse (2017-2018)	<u>T2</u> : 216 Sedimentmonsters voor korrelgrootte analyse in Amelanders Zeegat (2021)
Golfmetingen met 5 golfmeetboeien (jaarlijks tussen oktober en mei)	
Ecologie	
Benthos	
<u>T0</u> : Bemonstering AZG (sept. 2017)	<u>T1</u> : bemonstering AZG (feb 2020)
	<u>T2</u> : bemonstering AZG (sept. 2021)
Vissen	
<u>T0</u> : Zandspiering (maart 2018)	<u>T1</u> : Zandspiering (juni 2019)

2.5

Beschikbare publicaties

De aanleg van de pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat, de uitgevoerde modellering binnen het Programma Kustgenese 2.0 én het verrichte onderzoek vanuit gelieerde onderzoeksprogramma's heeft geresulteerd in een groot aantal rapporten en publicaties. Gezien het doel van deze eindevaluatie om een samenvattend beeld te geven van de beschikbare rapporten is in bijlage B een overzicht opgenomen van de relevante publicaties.

3 Inzichten vanuit de voorbereiding en aanleg

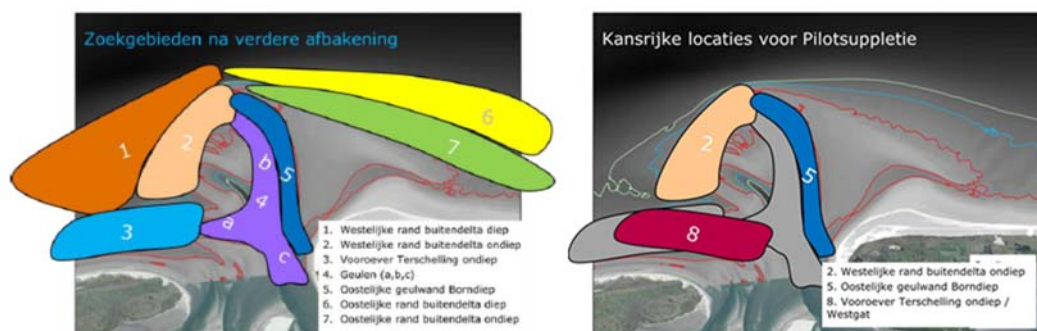
In 2019 is direct na aanleg van de pilotsuppletie de tussenevaluatie (Ebbens, 2019) opgesteld als input voor het programma Kustgenese 2.0. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste ontwikkelingen tot en met de aanleg beschreven en de bevindingen en conclusies vanuit de tussenevaluatie samengevat. Voor een meer gedetailleerde inblik in de periode van voorbereiding en aanleg en de onderbouwing met betrekking tot conclusies en aanbevelingen wordt verwezen naar de tussenevaluatie.

3.1 Locatiekeuze en ontwerp

Locatiekeuze

De keuze voor het Amelanders Zeegat om de pilot aan te leggen was snel gemaakt (zie ook paragraaf 1.3). De volgende stap betrof het vaststellen van de exacte locatie op het Amelanders Zeegat. Vanuit het projectteam zijn meerdere expertsessies georganiseerd om te komen tot een goede locatie. Uit een eerste inventarisatie kwamen zeven potentiële locaties naar voren (zie *Figuur 7*). Alle locaties lagen binnen het bereik van de X-band radar op de Vuurtoren van Ameland, waardoor het mogelijk was om "real-life" het gedrag van de suppletie te kunnen volgen. Deze zeven locaties zijn vervolgens op basis van een multi-criteria analyse teruggebracht naar 3 kansrijke locaties (zie *Figuur 7*). De trechtering heeft onder andere plaatsgevonden op basis van uitvoerbaarheid, kosten en effecten op de natuur. Het belangrijkste uitgangspunt voor natuur was dat de kwaliteit van bodemleven hoger is op plekken waar niet te veel dynamiek is. Hierdoor viel zowel de buitenrand als het oostelijk deel van het Amelanders Zeegat af. De inschatting was dat op de overgebleven kansrijke locaties relatief beperkte Natura 2000 waarden aanwezig waren, zodat de effecten van de suppletie ook beperkt zouden zijn.

Voor de overgebleven locaties is met numerieke tracers een analyse uitgevoerd naar het verspreidings-gedrag van het aan te brengen zand. Uiteindelijk kwam de westelijke rand van de buitendelta (locatie 2) als beste naar voren, aangezien hier de gehele hoeveelheid aan zand aangebracht kon worden op één locatie en er voldoende dynamiek werd verwacht om van de suppletie te kunnen leren.



Figuur 7 Van 7 potentiële locaties (links) naar 3 kansrijke locaties (rechts)

Ontwerp

Ter voorbereiding van de aanbesteding is vervolgens een initieel ontwerp opgesteld. Gekozen is om de suppletie op een diepte van NAP -5m tot -8m aan te leggen in een hoefijzervorm, die aansluit bij de bestaande vorm van het ebschild. De omvang van de suppletie is gekozen om voldoende "signaal" te kunnen genereren binnen de aanwezige dynamiek van de buitendelta, zonder het gevaar te lopen dat het systeem te veel beïnvloed zou worden. Op basis van de MER winning suppletiezand Noordzee 2018-2027 is een zandwink gekozen. Dit vak lag op een vaarafstand van 7 kilometer en bestond uit een homogeen zandpakket (D_{50} van 180 – 200 μm voor 1^e meter en 170 – 190 μm voor 2^e meter).

3.2 Organisatie, draagvlak en vergunningen

Organisatie

Voor de pilotsuppletie is een apart projectteam ingericht binnen het programma Kustgenese 2.0 met medewerkers vanuit zowel RWS-WVL als RWS-NN. Het raakvlak met Kustgenese 2.0 kon dankzij een overlap in bemensing goed worden beheerst. Dankzij de vertegenwoordiger vanuit RWS-NN was ook specifieke kennis met betrekking tot stakeholders geborgd. Daarnaast is intensief samengewerkt met het programma Kustlijnzorg, waardoor goed gebruik gemaakt kon worden van de kennis en expertise met betrekking tot uitvoering en het verkrijgen van vergunningen.

De nut- en noodzaak voor het uitvoeren van een pilotsuppletie op de buitendelta was binnen het projectteam van Kustgenese 2.0 al snel duidelijk. In een bestuurlijke setting, met onder andere de deltacommissaris en andere relevante bestuurders uit het waddengebied, is het belang van de pilot uitgesproken. Dit overleg maakte het mogelijk om de ecologische monitoring binnen de scope van de pilot te brengen.

Draagvlak

Vanuit het projectteam voor de pilot is veel aandacht geweest voor het draagvlak voor de pilotsuppletie. Door zowel collega RWS-ers, als relevante wetenschappers te betrekken bij de voorbereiding werd een breed inhoudelijk draagvlak gevonden. Het projectteam kwam tot de conclusie dat de scope van de pilot in eerste instantie te veel vanuit morfologisch perspectief was ingevuld. De keuze om ook de ecologie breed te betrekken bij de monitoring, heeft zeker geholpen om draagvlak voor de pilot te genereren bij natuurorganisaties. De pilotsuppletie is in verschillende bestaande overleggen en gremia met de Waddenzee als onderwerp aangekondigd. Vanuit de omgeving werd hier overwegend positief op gereageerd.

Vergunningen en meldingen

Voor het aanleggen van de pilot suppletie was het niet noodzakelijk een ontgrondingsvergunning aan te vragen. Hiervoor kon gebruik gemaakt worden van de ontgrondingsvergunning van het RWS-programma Kustlijnzorg. Om de suppletie aan te kunnen leggen was wel een vergunning ten behoeve van de Wet natuurbescherming benodigd, aangezien deze pilot suppletie geen onderdeel uitmaakte van het Natura 2000 beheerplan voor de Noordzeekustzone en effecten op de natuur niet uit te sluiten waren. Ook voor het uitvoeren van de meetcampagnes was een vergunning vanuit de Wet natuurbescherming noodzakelijk. Daarnaast dienden voor aanvang van de aanleg van de suppletie meldingen verricht worden vanuit het Besluit lozingen buiten inrichtingen (Bibi) en het Besluit bodemkwaliteit (Bbk).

Voor het opstellen van de passende beoordeling is gebruikt gemaakt van de passende beoordelingen die in het verleden door RWS Kustlijnzorg waren opgesteld. De vergunning diende al aangevraagd te worden voordat de uitkomsten van de ecologische T0-meting (zie volgende paragraaf) bekend waren. Bij de voorbereiding van de suppletie kon nog gebruik gemaakt worden van de Programmatische Aanpak Stikstof (PAS). De pilotsuppletie werd aangemeld als prioritair project waarvoor ontwikkelingsruimte werd gereserveerd. Uit de gemaakte AERIUS berekeningen (2017) bleek dat de stikstofdepositie van de pilotsuppletie binnen de gereserveerde ontwikkelingsruimte bleef en vanuit het aspect stikstof vergunbaar was.

3.3 Resultaten meetcampagne T0 meting voor aanvang van de aanleg

Integrale meetcampagne

In augustus t/m oktober 2017 hebben morfologische en ecologische metingen plaatsgevonden in het Amelanders Zeegat in het kader van Kustgenese 2.0 in samenwerking met de onderzoekers van SEAWAD. Voor de pilotsuppletie was dit een unieke kans om een goede nulmeting uit te voeren.

Deze monitoring is uniek aangezien er niet eerder op zo'n grote schaal monitoring heeft plaatsgevonden op de buitendelta. Daarnaast vond tegelijkertijd monitoring plaats vanuit zowel morfologisch als ecologisch perspectief, waardoor een integraal beeld is ontstaan tussen de aangetroffen biodiversiteit en de morfologische omstandigheden. In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de resultaten vanuit zowel morfologische als ecologische perspectief. Zie Figuur 8 voor een impressie van deze monitoring.



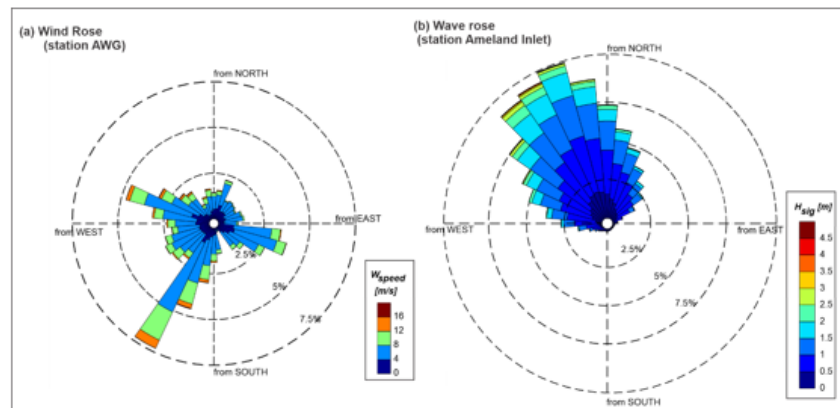
Figuur 8 Impressie ecologische monitoring buitendelta Amelanders Zeegat (Foto's C.A. Schipper)

Morfologie

Als onderdeel van de Kustgenese 2.0 meetcampagne is de samenstelling van het bodemsediment in kaart gebracht en zijn op de suppletielocatie verschillende metingen uitgevoerd aan de hand van meetframes. In Elias (2021) zijn de resultaten hiervan op hoofdlijnen beschreven. Hieronder volgt een korte samenvatting hiervan. De gemiddelde korreldiameter (d_{50}) op de buitendelta is homogeen. Het merendeel van de bodem bestaat uit zand met een diameter tussen van 170-230 μm . Het slibgehalte is laag, over het algemeen kleiner dan 1%. Alleen in de diepere geulen en

langs de rand van de buitendelta zijn metingen aangetroffen met een slibgehalte van meer dan 1%.

Het getij is een belangrijke aandrijver van de stromingen en transporten in het Amelanders Zeegat. Langs de Waddenkust is er 2 keer per dag hoog- en laagwater. De gemiddelde getijslag is 2,0m bij Ameland. Tijdens springtij ligt de getijslag hoger tot 3 m en deze reduceert tot ongeveer 1,5 m tijdens doodtij. Naast de getijbeweging kunnen stormen ook zorgen voor een aanzienlijke verhoging van de waterstanden.



Figuur 9 overzicht van het wind – en golfklimaat representatief voor het Amelanders Zeegat gebaseerd op de periode 2007-2017

Golven dragen indirect bij aan de sediment-transporten door vergroting van de bodemschuifspanning en door meer sediment in suspensie te brengen, waardoor het getij ook meer sediment kan verplaatsen. Een overzicht van de wind- en golfcondities die optreden in het Amelanders Zeegat is weergegeven in Figuur 9. Een analyse van recente metingen over de periode 2007-2017 laat zien dat de significante golfhoogte over het algemeen kleiner is dan 2 m. Tijdens stormen ligt de gemiddelde golfhoogte op 2 tot 3 m met een gemiddelde golfperiode van rond de 6 s. Gedurende het merendeel van de metingen ligt de windsnelheid onder de 10 m/s en komt deze uit zuidelijke tot westelijke richtingen.

Ecologie

De resultaten van het uitgevoerde T0 onderzoek zijn vastgelegd in meerdere rapporten. De resultaten van de benthosmetingen zijn beschreven in Verduin en Leewis (2017). Van Hal (2017, 2018) beschrijft de uitkomsten van de zandspiering bemonstering. In Van den Bogaart et. al. (2019) is op basis van deze resultaten de ecologie van het Amelanders Zeegat uitvoerig beschreven. Hieruit blijkt dat de benthos-gemeenschap van het Amelanders Zeegat over het algemeen weinig divers is in zowel de stroomgeulen als op de zandplaten en er meer diversiteit is aan de buitenzijde van het gebied. Daarnaast vertoont de benthosgemeenschap een duidelijke relatie met de heersende abiotische factoren in het gebied. De meeste soorten en de hoogste dichtheden zijn aangetroffen in de dieper gelegen ecotopen in het noordoostelijk deel van het gebied. Hier is de sedimentsamenstelling relatief fijn en het organisch stofgehalte hoger.

De biodiversiteit en dichtheid op de beoogde suppletielocatie is armer dan het hiervoor genoemde gebied in het noordoosten, maar rijker dan de geulen, geulwanden en ondiepe zandplaten meer naar het zuiden. Er komen voornamelijk kleine

kreeftachtigen en wormen voor die kenmerkend zijn voor ondiepe dynamische kustgebieden. Dit zijn kortlevende opportunistische soorten met een hoge reproductie- en verspreidingscapaciteit.

In het Amelanders Zeegat komen drie soorten zandspiering voor, met name de kleine zandspiering en de Noorse zandspiering. Sporadisch werd ook smelt aangetroffen. Zie Figuur 10 voor de weergave van de gevonden zandspierungen. Op de suppletielocatie zelf zijn geen monsters genomen vanwege de aanwezigheid van meetframes. Direct ten oosten van de suppletielocatie zijn de hoogste aantallen Noorse en kleine zandspiering aangetroffen, met name juveniele kleine zandspiering.



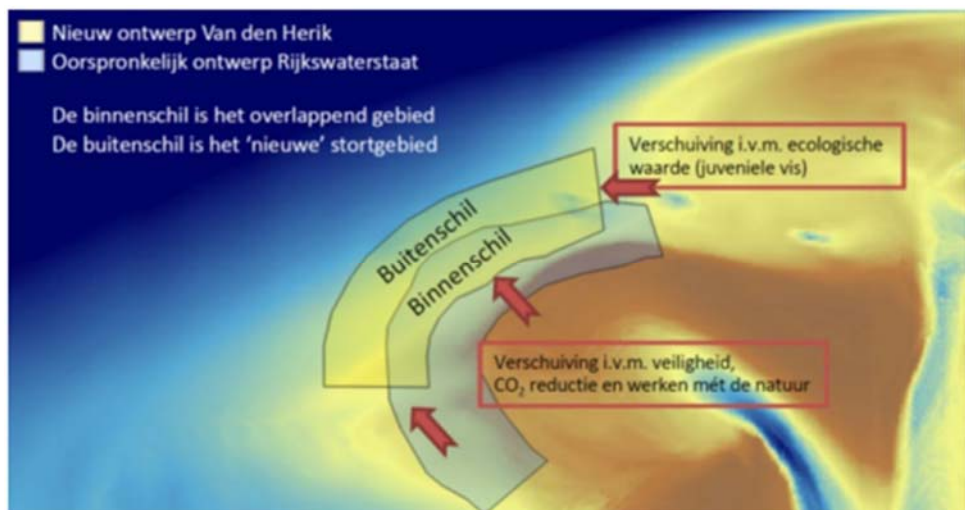
Figuur 10 De drie soorten zandspiering; boven de kleine zandspiering (*Ammodytes tobianus*), midden de Noorse zandspiering (*Ammodytes marinus*) en onder smelt (*Hyperoplus lanceolatus*).

In het kader van de T0 meting zijn er geen specifieke studies aan vogels of zeehonden uitgevoerd. Uit eerdere studies blijkt echter dat buitendelta's van belang zijn voor de grote stern. De eerste resultaten van een studie met gezenderde grote sterns uit de broedkolonie Utopia op Texel geven aan dat grote sterns flexibel zijn wat betreft keuze voor foerageerlocaties. De Gewone zeehond en de Grijze zeehond komen in grote aantallen voor in het gebied. Uit analyse van zenderdata naar het duikgedrag in de buitendelta volgt dat beide soorten in het gebied foerageren.

3.4 Uitvoering suppletie

Vorbereiding

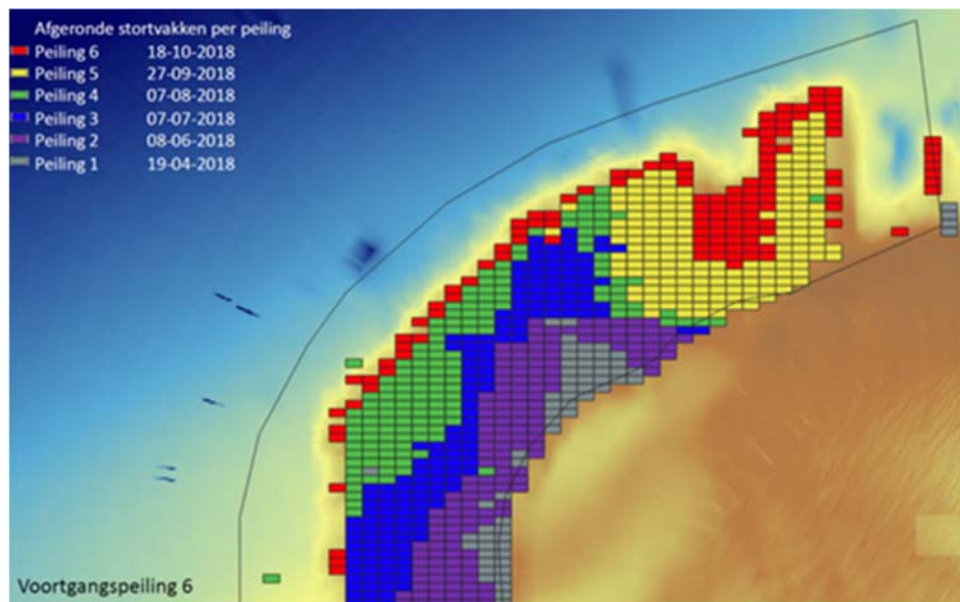
Het ontwerp van de pilotsuppletie is na contractering nog aangepast. Bij het inpeilen van de omgeving bleek rondom het eb-schild veel verschillende stromingen te zijn, waardoor het manoeuvreren met een sleephopper boven een ondiepe bodem niet verantwoord was. Daarnaast was ter hoogte van de suppletielocatie jonge zandspiering aangetroffen in de T0 meting, met name in de oosthoek. Gezien bovenstaande is de suppletielocatie iets verschoven naar het diepere deel van de buitendelta. In Figuur 11 is de verschuiving van het initiële ontwerp weergegeven. Deze wijziging van het ontwerp is middels een brief gecommuniceerd richting het bevoegde gezag voor de Wet natuurbescherming.



Figuur 11 Verschuiving ontwerp suppletie naar aanleiding van veiligheid en aantreffen zandspiëring

Uitvoering

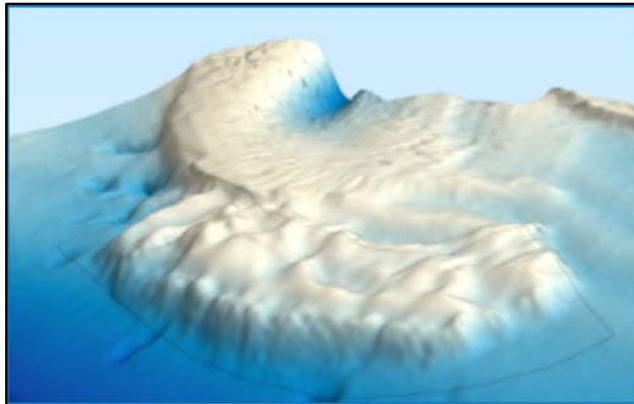
De pilotsuppletie is aangelegd in de periode tussen maart 2018 en februari 2019. Voor de werkzaamheden is gebruik gemaakt van de sleephopperzuiger Charlock, één van de meest duurzame hoppers gezien het lage brandstofverbruik (minder uitstoot aan CO₂ en NO_x). De uitvoeringswijze voor de aanleg van de suppletie is gefaseerd aangepakt, waarbij rekening is gehouden met de diepgang in relatie tot het stormseizoen. De start van de werkzaamheden vond onder relatief rustige omstandigheden plaats. Hierdoor lag het voor de hand om te starten met de aanleg van de (ondiepere) binnenschil. Gedurende het stormseizoen was het hierdoor langer mogelijk om bij slecht weer door te werkende gezien de diepere buitenschil. In Figuur 12 is deze gefaseerde aanpak goed te zien.



Figuur 12 Gefaseerde aanpak tijdens uitvoering

Gedurende de uitvoering is door de aannemer elke 4 tot 6 weken een peiling uitgevoerd van het suppletiegebied en een gebied van 500m er omheen. Op basis hiervan was de aannemer in staat om wijzigingen aan te brengen in de te volgen aanpak voor de realisatie. Van Rhijn heeft hiervoor een instrument ontwikkeld om peilgegevens visueel weer te geven. In Figuur 13 *3D-weergave sedimenttransport direct na aanleg van de pilotsuppletie*

is een 3D weergave gegeven van de suppletie, zoals deze er begin 2019 bij lag (Van Rhijn, 2019).



Figuur 13 3D-weergave sedimenttransport direct na aanleg van de pilotsuppletie (Van Rhijn, 2019)

In totaal is er circa 5 miljoen m³ zand aangebracht op de buitendelta. Gezien het optreden van stortverliezen is in totaal circa 5,75 miljoen m³ (in-situ) zand gewonnen.

3.5 Eerdere getrokken conclusies voorbereiding en aanleg

Conclusie tussenevaluatie

De tussenevaluatie over de pilotsuppletie (Ebbens, 2019) diende als input voor het synthese rapport Kustgenese 2.0. (Rijkswaterstaat, 2020). De nadruk van de conclusies van de tussenevaluatie lagen daarbij uiteraard op de voorbereiding en de aanleg. Hieronder volgt per doelstelling (zie paragraaf 1.2) een samenvatting van de conclusies.

Vergroten van systeemkennis over zeegatsystemen

Het uitvoeren van de pilotsuppletie heeft binnen Kustgenese 2.0 gezorgd voor een extra impuls in het vergroten van systeemkennis van zeegatsystemen in het algemeen en van het Amelanders Zeegat in het bijzonder. De intensieve monitoring van de (aanleg van de) pilotsuppletie geeft de mogelijkheid om resultaten uit bestaande modellen en metingen, waaronder de Xband-radar, beter te kunnen duiden. Door de enorme veelheid en dichtheid aan data is meer inzicht verkregen hoe het aangebrachte zand zich op korte termijn gedraagt. De vooraf uitgevoerde ecologische en morfologische monitoring heeft daarnaast een enorme impuls gegeven aan de kennis omtrent zeegatsystemen. Door vanuit de pilotsuppletie de verbinding te zoeken met andere lopende onderzoeksprogramma's is op efficiënte wijze nieuwe systeemkennis verworven.

Inzicht in ontwerp en haalbaarheid ter onderbouwing advies Kustgenese 2.0

Door het uitvoeren van de pilotsuppletie is goed inzicht verkregen in ontwerp variabelen in relatie tot uitvoerbaarheid en veiligheid van betrokkenen en materieel. Daarnaast geeft het doorlopen vergunningentraject inzicht in de belangrijkste elementen voor het vergunbaar krijgen van toekomstige suppleties op de buitendelta. Uit de pilotsuppletie in het Amelanders Zeegat is gebleken dat er geen of nauwelijks effecten zijn op andere gebruiksfuncties. Mede dankzij het uitgebreide ecologische monitoringsprogramma bleek er draagvlak te zijn voor het uitvoeren van een buitendeltasuppletie.

Bijdragen aan versterken van het kustfundament

Met de pilotsuppletie werd beoogd om bij te dragen aan het versterken van het kustfundament conform het beleid uit de derde kustnota. Door het aanbrengen van het zand binnen het kustfundament is hier aan voldaan, het feit dat het zand ook relatief stabiel op de buitendelta is blijven liggen, geeft aan dat de suppletie ook in de praktijk heeft bijgedragen aan versterking van het kustfundament.

Tussenevaluatie als input voor synthesesrapport Kustgenese 2.0

Mede aan de hand van bovenstaande conclusie is in het syntheses rapport (Rijkswaterstaat, 2020) ingegaan op de mogelijkheid voor het regulier gebruik van buitendelta-suppleties als vast instrument van het Nederlandse kustbeheer. In het Beleidsadvies (Rijkswaterstaat, 2021) is aangegeven dat meer kennis nodig is over onder meer de beste ligging van een buitendelta-suppletie, de bijdrage aan de kustlijnhandhaving en de ecologische randvoorwaarden voor de uitvoering. In hoofdstuk 6 van deze eindevaluatie wordt daar verder in detail op ingegaan.

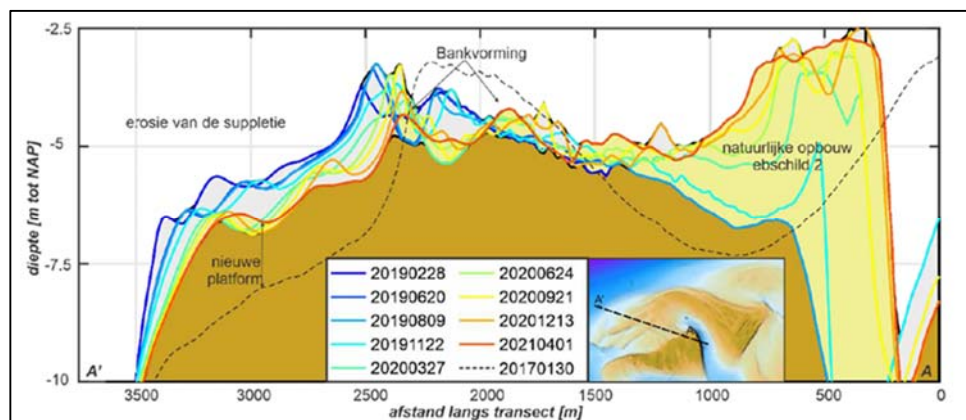
4 Morfologische inzichten vanuit monitoring en onderzoek

Om de impact van de pilotsuppletie in kaart te brengen is na aanleg doorgegaan met het uitvoeren van het monitoringsprogramma. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste resultaten en bevindingen vanuit de morfologische monitoring. Daarnaast wordt ingegaan op de verkregen inzichten vanuit de morfologisch modellering.

4.1 Resultaten bathymetrische monitoring

Ontwikkeling van de pilotsuppletie

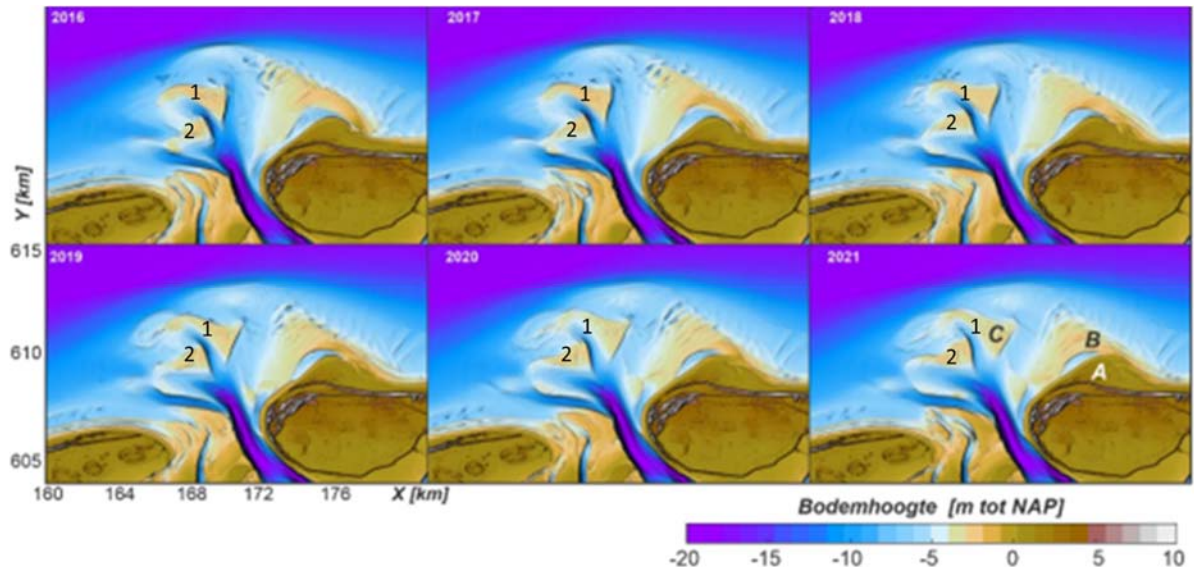
In Elias (2021) is op basis van alle uitgevoerde bathymetrische metingen de ontwikkeling van de pilotsuppletie na aanleg beschreven. Uit de monitoringsresultaten blijkt dat er een erosieve trend is; het volume gesuppleerde zand binnen de suppletiecontour neemt namelijk geleidelijk af. De pilotsuppletie blijft na aanleg zichtbaar als ondiep platform, waarbij medio 2021 nog 2,9 Mm³ van de initiële hoeveelheid zand (5 Mm³) binnen de contour van de suppletielocatie aanwezig is. Wat ook opvallend is, is dat er zich al snel na aanleg ook op de suppletie grote banken vormen. Daarnaast valt ook de sterke groei van het ten zuiden van de pilotsuppletie gelegen ebschild op (aangeduid als '2' in Figuur 15) (Elias, 2021). Dit is een autonome ontwikkeling van de buitendelta, gedreven vanuit de getijstrooming van het zeegat. In Figuur 14 is aan de hand van een dwarsdoorsnede het verloop van de suppletie weergegeven van het moment na realisatie van de suppletie februari 2019 (blauwe lijn) tot april 2021 (rode lijn). Ook de natuurlijke opbouw van het eb-schild is daarin goed te zien.



Figuur 14 Dwarsdoorsnede getrokken over de pilotsuppletie met bodemontwikkeling na aanleg (22-02-2018 - 01-04-2021). De bodem voor aanleg is weergegeven met de zwarte streepjeslijn. Bathymetrie bovenaanzicht 2021.

Ontwikkeling Amelanders Zeegat

De uitgevoerde monitoring richtte zich niet alleen op de pilotsuppletie zelf, maar ook op het gehele Amelanders Zeegat. Dankzij de bathymetrische monitoring van het gehele zeegat is een goed beeld ontstaan van de ontwikkeling van het zeegat over de jaren van 1989 tot en met 2021. Als illustratie is in Figuur 15 het verloop voor de jaren 2016 - 2021 weergegeven (uit Elias, 2021).



Figuur 15 Ontwikkeling van de buitendelta tussen 2016 en 2021 op basis van de Vaklodgingen en Kustgenese 2 metingen inclusief ligging zeewaartse eb-schild (1) en landwaartse eb-schild (2)

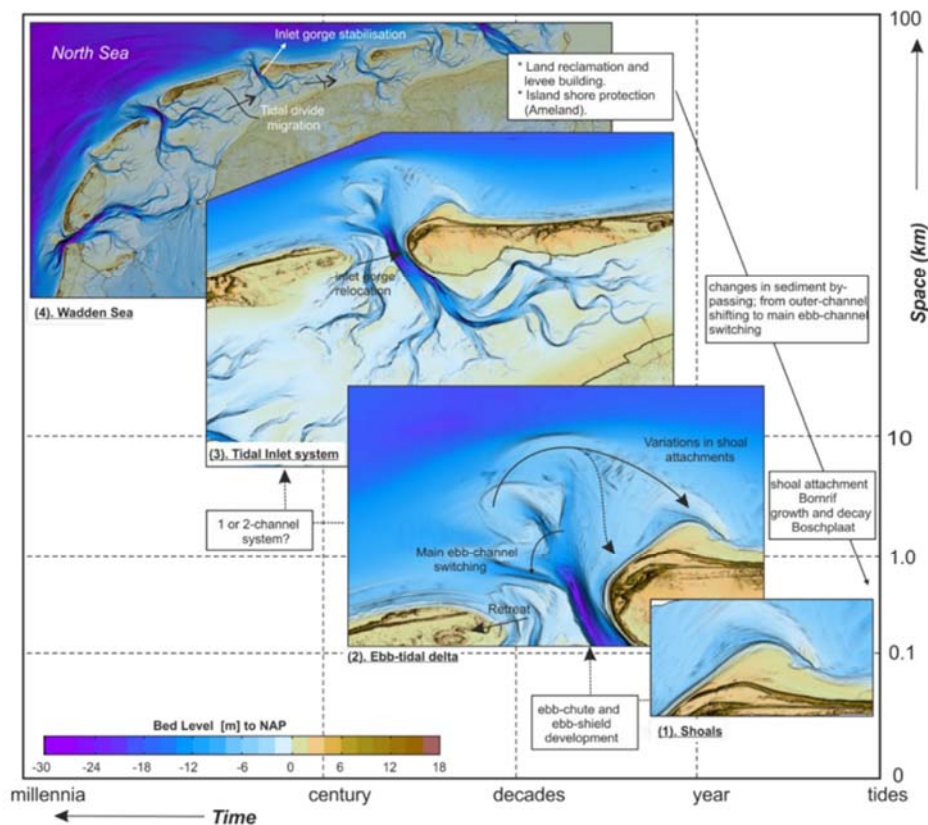
4.2 Morfologische inzichten werking Amelanders Zeegat

Ontwikkeling aan de hand van een schaalcascade

Een belangrijk onderdeel van de dynamiek op buitendelta's betreft sediment bypassing. Sediment bypassing beschrijft hoe de sedimentstroom zich over de buitendelta verplaatst. Als de buitendelta in evenwicht is, dan bepalen getij en golven het sediment bypassing proces. Sediment kan rechtstreeks via de geulen getransporteerd worden en zo direct het zeegat passeren, of het sediment vormt banken op de buitendelta die dan over de buitendelta heen migreren. Bij aanlanding van deze banken groeit de eilandkust uit. Vaak wordt dit gevolgd door een (langdurige) periode van erosie van de aangelande bank. De interactie van morfologische processen die over verschillende tijd en ruimteschalen spelen maakt het soms moeilijk de buitendelta ontwikkelingen goed te begrijpen en te beschrijven. Elias et al. (2019) hebben aan de hand van een schaalcascade de ontwikkeling van de buitendelta van Ameland gestructureerd in kaart gebracht (Figuur 16).

Analyses van de ontwikkelingen van de eilandkoppen van Texel, Terschelling, Ameland en Schiermonnikoog laten allen zien dat bankaanlandingen voor een belangrijk deel de kustlijnontwikkeling van de benedenstrooms gelegen eilanden bepalen. De ontwikkeling van geulen en zandplaten op de buitendelta en het aanlanden van deze zandplaten op de eilandkust werd voorheen vaak opgevat als een cyclisch en daarmee voorspelbaar proces. Elias et al. (2019) heeft echter aangetoond dat voor Ameland deze voorspelbaarheid niet optreedt. De configuratie van de geulen en platen op de buitendelta blijken het resultaat te zijn van zowel deterministische ontwikkelingen die gedreven kunnen worden vanuit de veranderingen in het bekken (langdurige en grootschalige processen), maar ook door stochastische interacties op de kleinste schaal (instabiliteiten op de buitendelta). De verstoringen die deze instabiliteit veroorzaken zijn inherent onvoorspelbaar, waardoor modellen ten aanzien

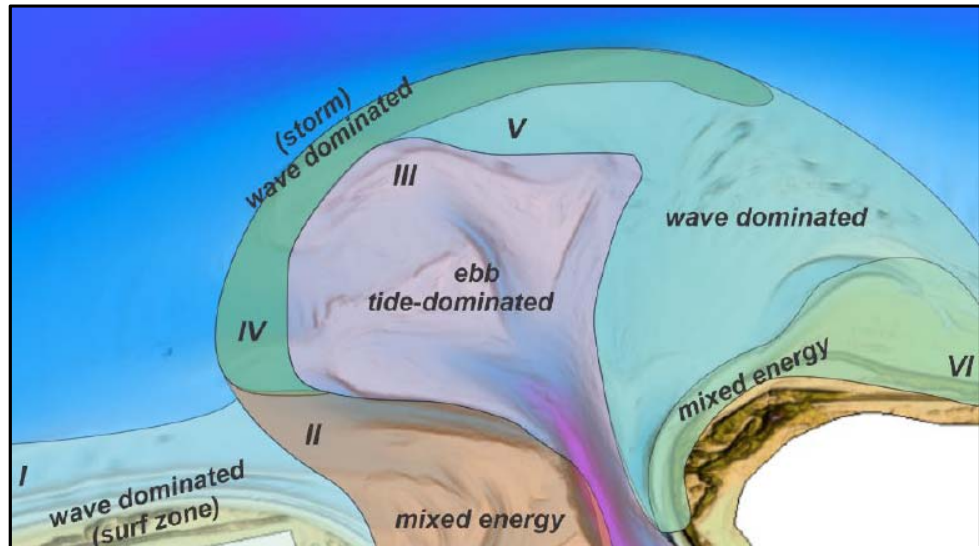
van de timing van cyclisch gedrag niet geldig of accuraat zijn. Op buitendelta's is dus vaak sprake van een herhaling van patronen, maar deze patronen voltrekken zich niet met een vast interval.



Figuur 16 Een schaalcascade voor de dominante processen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland (uit Elias et al. 2019)

Conceptueel model aan de hand van de morfodynamiek

Op basis van de verkregen dataset is door Elias (2019) de morfodynamiek van de buitendelta van het Zeegat van Ameland beschreven aan de hand van een conceptueel model. Dit concept beschrijft de werking van de buitendelta op schaalniveau 2 van de schaalcascade (buitendelta), waarbij de verschillende zones verschillen in gedrag en patronen. In Figuur 17 zijn deze zones ter illustratie weergegeven, waarbij de dominante processen worden weergegeven (golfgedreven, getij-gedreven of een combinatie van beiden).



Figuur 17 Conceptueel model buitendelta I – Eilandkust bovenstrooms, II- Ondiepe platform van het Boschgat, III- Ebscharen en ebschilden, IV- Rand van de buitendelta, V-Buitendeltaplatform en VI- Aanlandingsgebied van banken

4.3

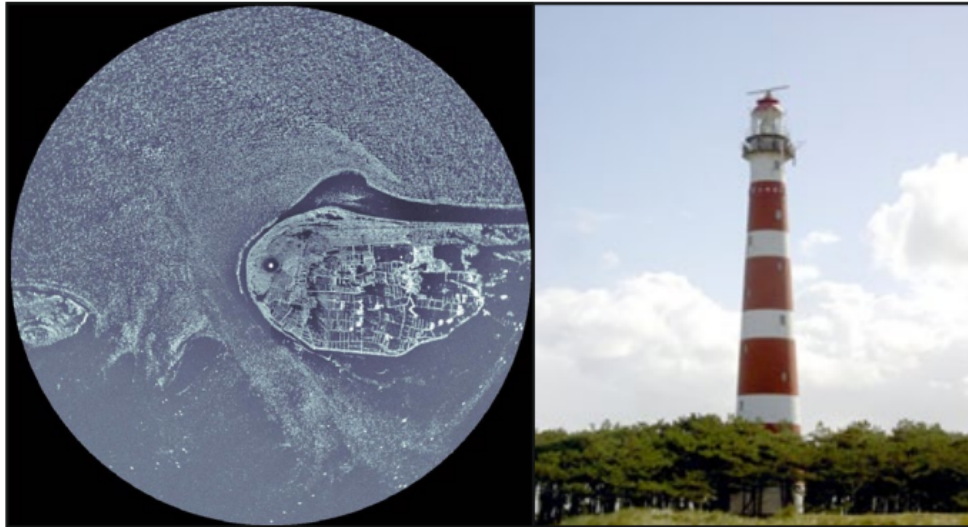
Innovatieve modellen als aanvullende opbrengst

De metingen op de suppletielocatie en in het Amelanders Zeegat hebben, zoals in voorgaande hoofdstuk beschreven, geresulteerd in een “aanvullende opbrengst” van innovatieve modellen die in het kader van Kustgenese 2.0 en/of onderzoeksprojecten als Beheer & Onderhoud Kust zijn ontwikkeld. In deze paragraaf worden deze modellen behandeld.

X-band radar

Als onderdeel van Kustgenese 2.0 is medio 2017 een operationeel systeem opgezet waarbij radarbeelden (XBand-radar) van het Amelanders Zeegat lokaal worden verwerkt om een schatting te maken van de bodemligging in het gebied. Hiermee is het mogelijk om continu ontwikkelingen van de bodem op afstand in te kunnen winnen met een frequentie van 1 schatting per uur. Het systeem is gebaseerd op een algoritme genaamd 'XMFit' (Gawehn et al. 2020). De frequente bodemopnames vanuit de pilot Amelanders Zeegat zijn gebruikt voor de validatie van het systeem.

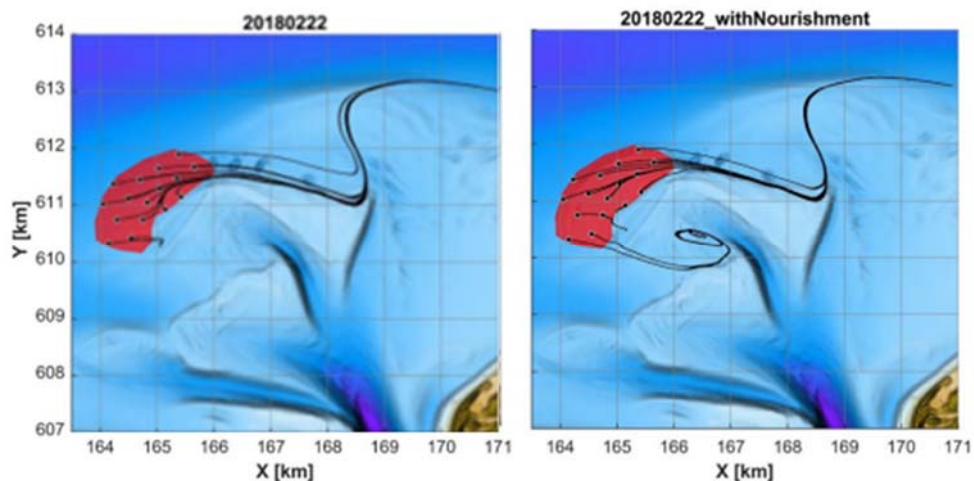
De berekeningen van volumes uit radar resultaten in het suppletiegebied geven na optimalisatie van het 'XMFit' – algoritme (Gawehn et al. 2021) een accuraat beeld van de volumeverandering en ook een accurate weergave van de absolute hoeveelheid (Elias, 2021). De X-band radar heeft de noord en noordoostelijke verplaatsingen van banken van het ebschaar en -schild systeem kunnen traceren en gekwantificeerd op 700-800 m in 4 jaar tijd. Daarnaast is het met de X-band mogelijk om de effecten van “storm-events” goed in kaart te brengen. Dankzij de ontwikkeling van de X-band radar kan op afstand gedetailleerde informatie ingewonnen worden over de bodemligging.



Figuur 18 Output X-band radar(links) en locatie op de vuurtoren Ameland (rechts)

Morfostatische modellering

Lambregts (2021) heeft in het kader van Beheer & Onderhoud Kust (KPP B&O Kust) morfostatische modelleringen uitgevoerd om de invloed van de pilotsuppletie op de autonome processen inzichtelijk te kunnen maken. Op basis van deze morfostatische modellering kan inzicht verkregen worden in de transportbanen van het sediment voor zowel de situatie met als zonder suppletie. Door de uitkomsten met elkaar te vergelijken, is het dus mogelijk om de invloed van de suppletie op autonome processen van de buitendelta inzichtelijk te maken.



Figuur 19 Sedimenttransport patronen voor bronnen gelegen op de pilotsuppletie AZG met onderliggende bodem van 22-02-2018 zonder suppletie (links) en met suppletie (rechts) voor simulaties met getij en golven

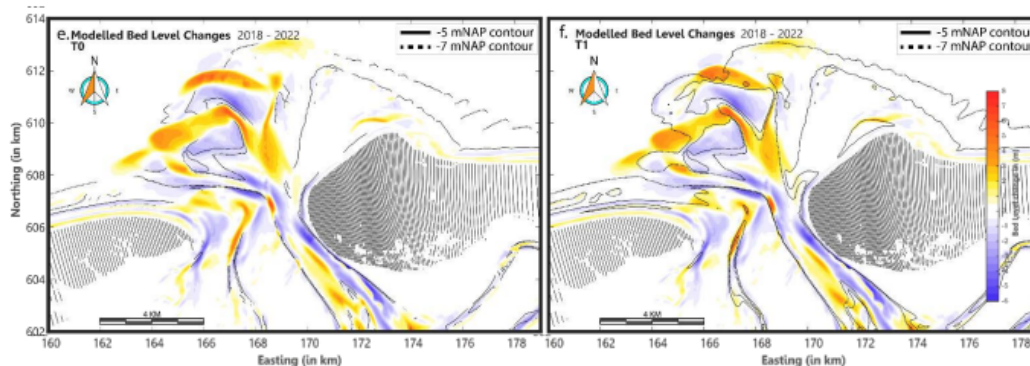
In Figuur 19 is het resultaat weergegeven voor de situatie met getij en golven. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de pilotsuppletie geen beïnvloeding van de optredende

processen geeft. Door golfbreking op het ebschild en de suppletie ontstaat wel een sterkere transportstroom en treedt er minder uitwisseling op met de ebschaar. Golven zorgen er ook voor dat de deeltjes verder langs de rand van de buitendelta worden getransporteerd (Elias, 2021).

Morfodynamische modellering

Harlequin (2021) heeft verschillende morfodynamische simulaties uitgevoerd om de morfologische veranderingen van suppleties op de buitendelta op de lange-termijn te kunnen voorspellen. Voor deze modellering is als basis gebruik gemaakt van Delft3D 4 stromings- en sedimenttransportmodel van het Amelanders Zeegat in combinatie met het spectrale golfmodel Swan. Voor verdere detaillering van de modelschematisatie wordt verwezen naar Harlequin (2021).

De effecten van de pilotsuppletie zijn door Harlequin (2021) berekend door het uitvoeren van een simulatie op de 2018 bodem met en zonder de suppletie over een periode van 4 jaar. In Figuur 20 *Morfologische verandering van de buitendelta zonder pilotsuppletie (links) en met suppletie (rechts) gebaseerd op Elias (2021)* is het resultaat van de modelsimulatie weergegeven voor de situatie met en zonder pilotsuppletie. De modelresultaten laten duidelijk zien dat transporten alleen ter plaatse van de ebschilden worden beïnvloed. De beperkte verschillen bevestigen de conclusie uit de morfostatische modellering dat op de schaal van de gehele buitendelta de hydrodynamische en morfologisch impact van de pilotsuppletie beperkt is.



Figuur 20 *Morfologische verandering van de buitendelta zonder pilotsuppletie (links) en met suppletie (rechts) gebaseerd op Elias (2021)*

Gebleken is dat met morfodynamische modellering het gedrag van een suppletie in de buitendelta op hoofdlijnen te voorspellen is voor een doorlooptijd tot circa 4 jaar. Bij langere doorlooptijden bleek het verschil tussen de gemodelleerde morfologie en de geobserveerde morfologie te veel uit elkaar te liggen.

4.4

Effect buitendeltasuppletie op de autonome processen van een zeegat

Op basis van de hierboven beschreven monitoringsresultaten én de aanvullend uitgevoerde modellering is door Elias (2021) geconcludeerd dat de pilotsuppletie op de buitendelta van het Amelanders Zeegat het autonome gedrag van de buitendelta niet significant heeft beïnvloed. Daarmee is de pilotsuppletie te zien als een zogenaamde "systeem-volgende" suppletie. Dergelijke suppleties verstoren de autonome processen op de buitendelta niet en versterken de sediment bypassing cyclus doordat het zandaanbod wordt vergroot. Uit het onderzoek van Elias (2021) blijkt dat dit niet altijd het geval hoeft te zijn. Bij aanleg van de suppletie op andere

locaties binnen het Amelanders Zeegat of op andere zeegaten is het mogelijk dat de autonome processen wel significant beïnvloed worden. Dergelijke “systeem-veranderende” suppleties zorgen voor een verstoring/verandering van de autonome morfologische processen op de buitendelta. Daarmee kan ook de sediment bypassing cyclus veranderd worden, wat gunstig is bij aanhoudende kustlijnerosie. Aangezien met dergelijke suppleties nog geen ervaring in de praktijk is opgedaan, brengen “systeem-veranderende” suppleties grotere onzekerheden met zich mee.

Om de werking van een suppletie goed te kunnen begrijpen is het noodzakelijk om voor aanleg van de suppletie voldoende kennis te hebben van de aanwezige natuurlijke dynamiek in het betreffende zeegat. Het helpt daarbij om een conceptueel model uit te werken, op basis waarvan het mogelijk is om het gedrag van de suppletie te kunnen voorspellen. Hoe meer metingen beschikbaar, des te hoger de geloofwaardigheid van het conceptuele model. Met behulp van morfostatische modellering is het mogelijk om het conceptuele model nader aan te scherpen. Om een goed beeld te krijgen van verschillen qua gedrag van suppletievarianten (omvang en locatie) helpt het om morfodynamische modelberekeningen uit te voeren.

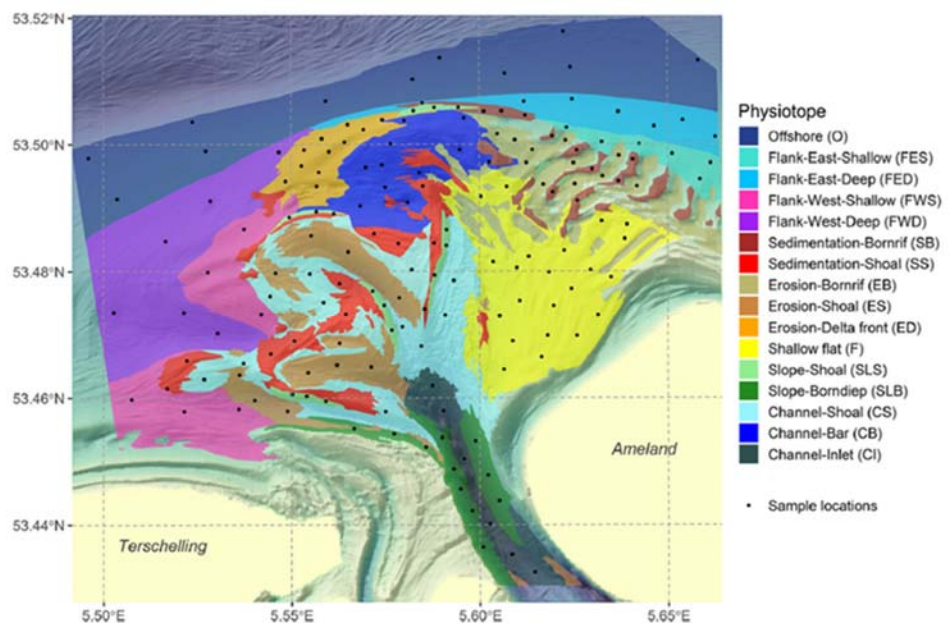
5 Ecologische inzichten vanuit monitoring en onderzoek

In het vorige hoofdstuk is ingegaan op de verkregen inzichten naar aanleiding van de morfologische monitoring. Dit hoofdstuk is vergelijkbaar, maar gaat over de verkregen inzichten met betrekking tot de ecologische monitoring. Allereerst wordt ingegaan op de ecologische kartering van het Amelanders Zeegat. Vervolgens volgt een overzicht van de uitgevoerde monitoringsactiviteiten (T0, T1 en T2) inclusief de analyses die binnen andere kaders zijn uitgevoerd voor grote sterns en zeehonden. Het hoofdstuk wordt afgesloten met de verkregen inzichten vanuit de ecologische monitoring.

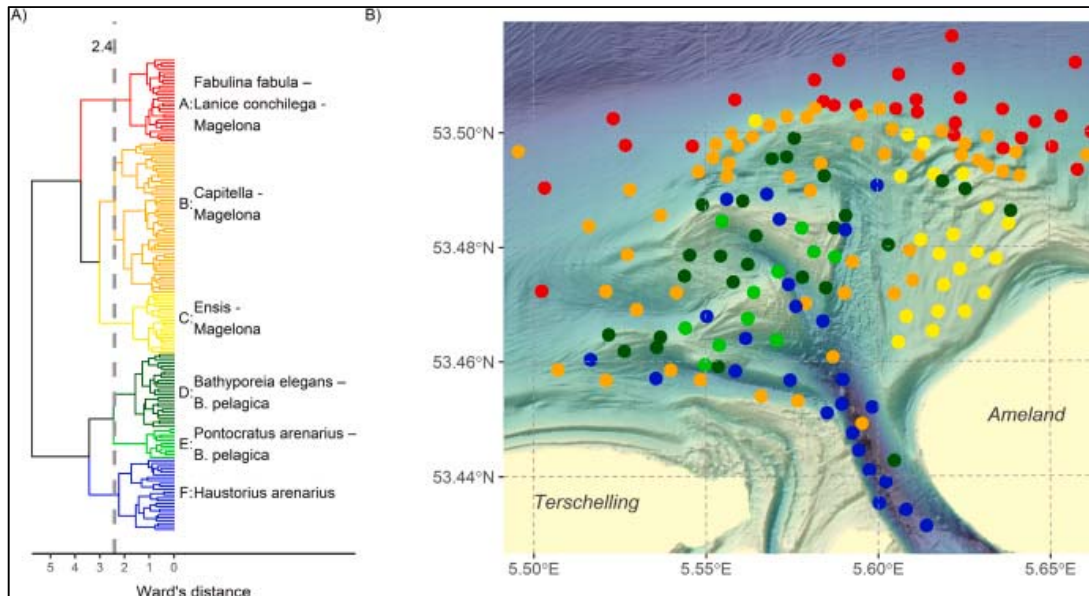
5.1

Ecologische kartering Amelanders Zeegat op basis van fysiotopen

Het aanleggen van de pilotsuppletie inclusief de uitgevoerde ecologische monitoring heeft de kennis vergroot van de aanwezige natuurwaarden van met name de bodemdiergemeenschap op de buitendelta van het Amelanders Zeegat. Vanuit SEAWAD is voor deze eindevaluatie zeer relevant onderzoek uitgevoerd, waaronder de samenstelling van bodemdieren-gemeenschappen op basis van de geomorfologische omstandigheden (Holzhauer et. al., 2021). Gebieden waar deze geomorfologische omstandigheden vergelijkbaar zijn, worden fysiotopen genoemd. In 2017 is aan de hand van bodemschuifspanning, korrelgrootte, organische stofgehalte én erosie- sedimentatiepatroon het Amelanders Zeegat ingedeeld in fysiotopen (zie Figuur 21). Deze kaart vormde de basis voor het vaststellen van de bemonsteringslocaties voor de T0. Voor de T1 en T2 is een vergelijkbare bemonsteringsstrategie gevolgd (zie paragraaf 2.4).



Figuur 21 Indeling Amelanders Zeegat in fysiotopen (Holzhauer et. al., 2021)



Figuur 22 Verdeling bodemgemeenschappen T0 over het Amelanders Zeegat aan de hand van een zestal clusters (Holzhauer, et. al., 2021)

In Figuur 22 is de verdeling van de benthosgemeenschap aan de hand van een zestal clusters³ weergegeven op basis van de T0 (Holzhauer, et. al., 2021). In gebieden binnen de buitendelta die het meest blootgesteld worden aan golven en getij leven kleine, kortlevende organismen. Deze zijn dankzij hun mobiliteit in staat om te anticiperen op een dynamische omgeving. Op de gebieden aan de rand van de buitendelta waar in toenemende mate sprake is van beschutting zijn grotere, langlevende, filtervoedende en sessiele organismen dominant aanwezig. De samenstelling van de aanwezige bodemdiergemeenschappen op het Amelanders Zeegat is te verklaren aan de hand van twee verschillende gradiënten. De eerste gradiënt betreft de aanwezigheid van fijn sediment, organisch koolstof en oxisch sediment op de buitendelta naar grof sediment naar binnen toe. De tweede gradiënt is de sortering van door golf en getij gedomineerd sediment aan de met name door de golf- en getij stroming (bodemschuifspanning) blootgestelde zijde.

Uit een vergelijking tussen figuren Figuur 21 en Figuur 22 volgt dat op basis van een indeling naar fysiotopen het mogelijk is om een voorspelling te maken van de samenstelling van de aanwezige bodemdiergemeenschap. Op locaties met veel dynamiek, een hoge mate van blootstelling aan golven en getij, komen robuuste soorten voor die zich goed kunnen aanpassen aan de wisselende omstandigheden. Deze pionierssoorten kunnen zich na bedekking snel opnieuw vestigen, waardoor relatief snel een bodemdiergemeenschap aanwezig is die vergelijkbaar is met de situatie voor aanleg. De indeling naar fysiotopen maakt het dus mogelijk om voor aanvang van de suppletie de ecologische impact in te kunnen schatten. Holzhauer et. al. (2021) benadrukt dat de gehanteerde systematiek geoptimaliseerd en gevalideerd kan worden aan de hand van aanvullende studies.

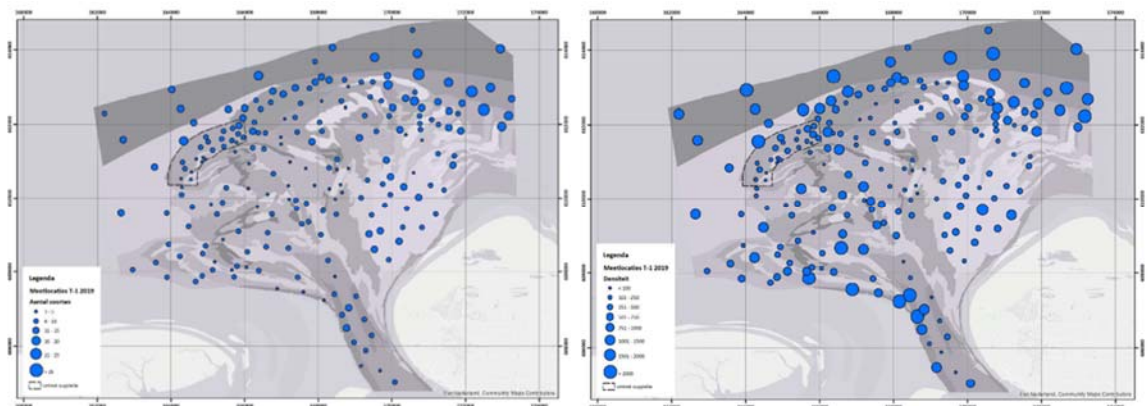
³ De clusters zijn te typeren op basis van abiotiek en biotiek. Rood = "slibrijksand met schelpdieren", Oranje = "Overgangen tussen vlaktes en platen met wormen en schelpdieren", Geel = stabiel zandbed met wormen en schelpdieren, Donker groen = "Zand onder invloed van getijstroming en golven met kreeftachtigen en wormen, Licht groen = "Dynamisch zandbed met kreeftachtigen" en Blauw = Geulen met enkele mobiele soorten".

5.2 Resultaten ecologische monitoring T1 en T2

T1-meting

Benthos

In Van Hal et. al. (2021) is een totaal overzicht gegeven van de resultaten en uitgevoerde analyses met betrekking tot de ecologische bemonstering na het uitvoeren van de T1. Hieronder worden belangrijke elementen uit deze analyse weergegeven. De T1 dichtheden en biomassa's van benthos op de suppletielocatie waren lager dan in het omliggende gebied. Uit de T1 bemonstering -zeven maanden na de afronding van de suppletie- blijkt dat het herstel van de bodemgemeenschap in gang gezet is. Met name buiten de suppletielocatie zijn er op kleine schaal verschillen in benthossamenstelling tussen de T0 en de T1, van met name pionierssoorten die zijn toegenomen in aantallen en verspreiding. De toename van pionierssoorten suggereert dat er meer verstoring is geweest in de periode voor de T1-bemonstering dan voor de T0-bemonstering. Het is niet duidelijk of dit een effect van de suppletie is, dan wel door een natuurlijke metrologische variatie (golven, stroming, stormen) is. In Figuur 23 zijn de resultaten van de T1 benthos bemonstering weergegeven (Schellekens en Verduin, 2020).



Figuur 23 Aantal taxa (links) en dichtheden (rechts) van benthos metingen T1 T1-bemonstering (Schellekens en Verduin, 2020)

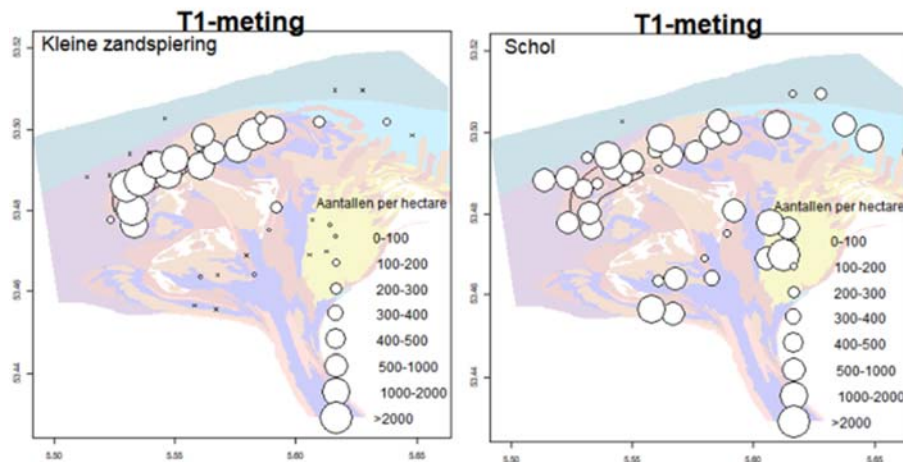
Bij de vergelijking van de T0 en T1 situatie voor het Amelanders Zeegat zijn verschillende analyse en clusteringsmethoden toegepast op de benthische data (Schellekens en Verduin, 2020). Zowel uit de T0 als de T1 volgt een duidelijk onderscheid tussen een cluster in de meest noordoostelijke gebieden gekenmerkt door verschillende schelpdierssoorten en hoge aantallen en biomassa's, en een cluster in de overige gebieden inclusief het suppletiegebied gekenmerkt door lagere aantallen en biomassa's. Uit de reconstructie van de T0-situatie benthos op de suppletielocatie (Escavara, 2022) blijkt dat de halfgeknotte strandschelpen (*Spisula subtruncata*) niet voorkomen. Amerikaanse zwaardscheden (*Ensis*) komen wel voor in relatief lagere dichtheden ten opzichte van de diepere delen en het oostelijk deel van het Amelanders Zeegat. Uit Schellekens en Verduin (2020) volgt dat het aandeel aan

mobiele (pioniers) soorten, die goed zijn aangepast aan de omstandigheden in van nature dynamische gebieden, over de gehele buitendelta is toegenomen ten opzichte van de T0.

Zandspiering en schol

De zandspieringbemonstering liet zien dat alle drie de soorten zandspiering zich na de aanleg van de suppletie hebben geconcentreerd op en nabij de suppletielocatie. De vangsten in de andere gebieden tijdens de T1 waren veel lager in vergelijking met de T0. Het is niet mogelijk om te onderscheiden of dit een verbeterde habitatkwaliteit op de suppletielocatie of een verslechtering in de ondieper geworden delta of natuurlijk variatie is. Naast zandspiering werd ook juveniele schol in grote aantallen gevangen in het gebied, zonder duidelijk verschil tussen de dichtheden op de suppletielocatie of het omliggende gebied (Van Hal et. al., 2021). Uit de T1 zandspiering bemonstering blijkt dat de hoogste dichtheden van zandspiering op en rond de locatie van de suppletie zijn waargenomen, daar waar in de T0 bemonstering zandspiering meer verspreid over het gebied werd aangetroffen. Het lijkt erop dat zandspiering en schol binnen een relatief korte tijd na de suppletie op dezelfde manier gebruik maken van het gesuppleerde gebied (Van Hal et. al., 2021, zie

Figuur 24).

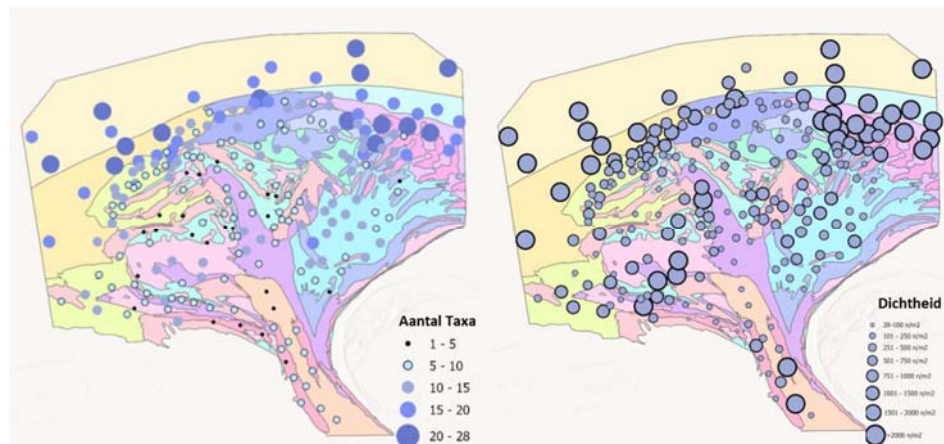


Figuur 24 Weergave T1 bemonstering zandspiering (links) en schol (rechts)

T2-meting

In september 2021 heeft de T2 monitoring plaatsgevonden, waarin over het gehele Amelanders Zeegat de samenstelling van het leven van bodemdieren in en op de bodem is onderzocht. Gezien de resultaten van de T1 monitoring met betrekking tot de uitgevoerde vismonitoring is vooraf besloten om de monitoring alleen toe te spitsen op de samenstelling van de benthosgemeenschap. Net als in de vorige meetcampagnes zijn naast de benthosmetingen ook sedimentmonsters genomen ten behoeve van korrelgrootte analyses. De resultaten van de T2 bemonstering zijn weergegeven in Schellekens (2022), waarin met behulp van statistische analyses het verband tussen de aangetroffen benthos en de abiotische factoren in beeld zijn gebracht.

In het onderzoeksgebied zijn in 2021 in totaal 120 unieke taxa gevonden, waarvan 88 soorten. Deze aantallen liggen hoger dan in 2017 (Verduin & Leewis, 2018) en 2019 (Verduin en Olie, 2019), wat (deels) te verklaren valt door het hoger aantal genomen monsters in 2021. Op relatief korte geografische afstand van elkaar komen grote verschillen qua biodiversiteit voor (zie Figuur 25). Deze verschillen in biodiversiteit houden in hoge mate verband met verschillen in gemeten abiotische factoren (diepte en korrelgrootte) binnen het Amelanders Zeegat (Schellekens, 2022).



Figuur 25 Resultaten T2-bemonstering aantal taxa (links) en totale biodiversiteit (rechts) gebaseerd op Schellekens (2022)

Uit de uitgevoerde T2 bemonstering volgt een significante relatie tussen enkele abiotische parameters en de soortensamenstelling van bodemdieren in het Amelanders zeegat. Het organisch stof, de mediane korrelgrootte en de diepte hebben een significante relatie met de soortensamenstelling van de monsters. Tegelijk zijn ook verschillende soortensamenstellingen aangetroffen binnen hetzelfde habitat.

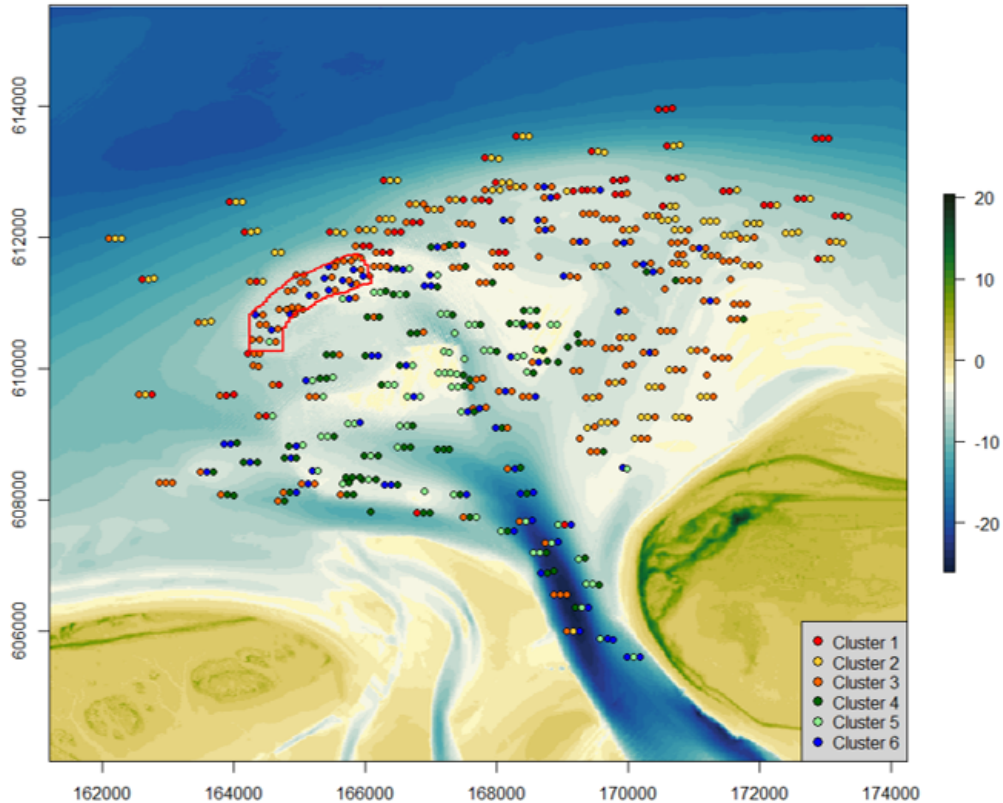
5.3

Inzichten vanuit ecologische monitoring en onderzoek

Zoals in paragraaf 2.2 aangegeven was er voor aanleg van de pilot suppletie buitendelta Amelanders Zeegat weinig bekend van de aanwezige ecologische waarde in buitendelta's in het algemeen en het Amelanders Zeegat in het bijzonder. Dankzij de uitgevoerde T0, T1 en T2 metingen en de resultaten vanuit het onderzoeksprogramma SEAWAD is veel kennis opgedaan met betrekking tot de samenstelling en temporele veranderingen binnen de benthosgemeenschap van het Amelanders Zeegat (Schellekens, 2022).

Ruimtelijke verdeling en temporele variatie op het Amelanders Zeegat

Escaravage (2022) heeft de veranderingen in de ruimtelijke verdeling en temporele variatie van de bodemdierengemeenschap van het Amelanders Zeegat onderzocht. Op basis van een clusteranalyse van de aangetroffen bodemdiergemeenschappen over alle 597 monsterpunten van de T0, T1 en T2 tezamen is een zestal clusters te onderscheiden. In Figuur 26 is de verdeling van deze clusters over het Amelanders Zeegat weergegeven. Drie aaneengesloten bolletjes geeft aan dat op die locatie zowel tijdens de T0 (links), T1 (midden) als de T2(rechts) de bodemgemeenschap bemonsterd is. Deze figuur toont aan dat door het hoog dynamische karakter van het Amelanders Zeegat de bodemdierengemeenschap continue in ontwikkeling is.



Figuur 26 Resultaat clusteranalyse op basis van bodemdieren-soortensamenstelling (T0-T1-T2). (Escaravage, 2022)

Het vergelijken van de resultaten werd gecompliceerd door de van nature aanwezige dynamiek op het Amelanders Zeegat. Het jaar 2019 werd begin januari gekenmerkt door noordwesterstormen waarbij op Terschelling golven tot 8 m werden gemeten. Van Hal (2021) concludeerde al dat deze stormen een grote impact hebben gehad op de bathymetrie en sedimentsamenstelling van het gebied en daarmee ook op de benthosgemeenschap. Dit verklaart wellicht ook de verschillen in clustering van bodemdiergemeenschappen tussen de T0 en de T1/T2 aan de noordelijke rand van de buitendelta (zie Figuur 26).

Ruimtelijke verdeling en temporele variatie ter hoogte van suppletielocatie

Op basis van de uitgevoerde T0, T1 en T2 bemonsteringen is door Escaravage (2022) ook een statistische analyse uitgevoerd naar de temporele veranderingen van de bodemdiersamenstelling ter hoogte van de suppletielocatie. Uit statistische analyses volgt het beeld dat de bodemdierengemeenschap direct na de aanleg (T1 in 2019), sterk verandert op de suppletielocatie. Twee jaar later (T2 in 2021) lijkt de samenstelling van de bodemdierengemeenschap weer meer op de oorspronkelijke bodemdierengemeenschap. De snelheid waarmee dit herstel plaatsvindt in het suppletie gebied wijst op het opportunisme van soorten in gebieden die van natuur blootgesteld zijn aan sterke fysieke verstoringen. Dit herstel blijft wel voorlopig beperkt tot de schaaldieren waar schelpdieren in lage dichtheden blijven in 2019 én 2021 (Escaravage, 2022).

Effect op vogels en zeezoogdieren

Van Hal et al. (2021) heeft ook de effecten van de pilotsuppletie op (de voedselbeschikbaarheid van) zwarte zee-eenden, sterns en zeehonden ingeschat. Omdat op de suppletielocatie geen of geringe dichtheden van schelpdiersoorten (voedsel voor zwarte zee-eenden) werden aangetroffen, is de suppletielocatie ongeschikt als foerageergebied voor zwarte zee-eenden. Het is daarom aannemelijk dat de suppletie geen nadelige effecten heeft gehad op het voedselaanbod van zwarte zee-eenden. Daarnaast is het voedselaanbod in de overige delen van het Amelanders Zeegat niet achteruitgegaan wat suggereert dat de suppletie geen nadelige effecten heeft gehad op het voedselaanbod voor de populatie zwarte zee-eenden die rond het Amelanders Zeegat foerageren.

Er is geen gericht onderzoek gedaan om de effecten van de suppletie op grote stern en dwergstern in beeld te brengen. Wel waren er zenderdata beschikbaar van grote sterns van Texel. Doordat de gezenderde grote sterns van Texel ook na de suppletie worden geregistreerd in het Amelanders Zeegat en er weinig veranderd lijkt te zijn aan hun belangrijkste voedsel, zandspiering, is er op basis van de beschikbare gegevens geen effect van de suppletie te verwachten op grote sterns. Ook is de verwachting dat de suppletie geen effect heeft gehad op de voedselvoorziening van dwergsterns die broeden op Ameland.

Ook naar de effecten op gewone en grijze zeehonden is geen gericht onderzoek gedaan. Om toch enigszins de vraag met betrekking tot de invloed van de suppletie via effecten op het habitat te beantwoorden is er gebruik gemaakt van een habitatmodel voor gewone zeehonden op basis van bestaande zenderdata uit de gehele zuidelijke Noordzee. Dit model laat zien dat gewone zeehonden relatief meer gebruik maken van diepere delen. Een groot deel van de suppletielocatie is relatief ondiep en zou daarmee mogelijk minder worden bezocht door de gewone zeehonden. De mogelijke gevolgen van de pilotsuppletie op gewone zeehonden lijken daarmee beperkt. Een vergelijkbare methode en analyse ontbreekt vooralsnog voor de grijze zeehonden.

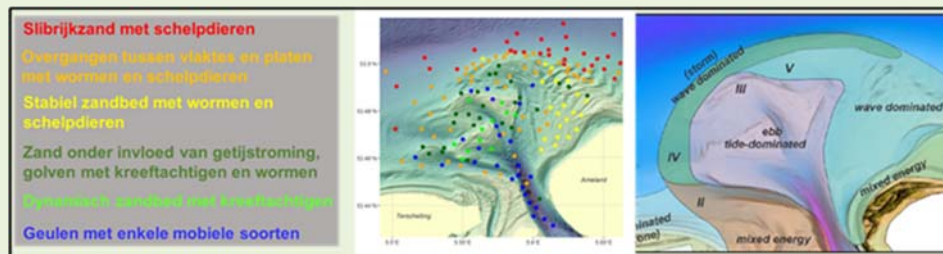
Vergelijking morfologische en ecologische conceptuele modellen

Uit Elias (2021) blijkt dat het Amelanders Zeegat ingedeeld kan worden in verschillende zones (zie Figuur 17 en Figuur 27), waarbij de zones II en III te zien zijn als "systeem-veranderende" suppletielocaties en de zones IV en V als "systeem-volgende" suppletielocaties. In het kader van de eindevaluatie is dit beeld vergeleken met de clustering naar verschillende bodemdiergemeenschappen, zoals door Holzhauer et. al. (2021) voor de T0 is uitgewerkt (zie Figuur 22 en Figuur 27). De volgende aspecten kwamen daarbij naar voren:

- Het grootste deel van het Amelanders Zeegat dat conform Elias (2021) als "systeem-volgend" wordt getypeerd, bestaat uit bodemdiergemeenschappen die gedomineerd worden door grotere, langlevende, filter voedende en sessiele organismen (o.a. schelpdieren). Schelpdieren zijn onder meer van belang voor schelpdieretende vogels (waarvoor Natura 2000 instandhoudingsdoelen gelden) en kennen na een suppletie een langere hersteltijd van kortlevende mobiele soorten. Dit geldt overigens niet voor alle locaties. Zo is de pilotsuppletie ook een "systeem-volgende" suppletie gebleken, maar werd deze locatie gedomineerd door kortlevende mobiele organismen.
- Bij de programmering van "systeem-volgende" buitendeltasuppleties wordt aanbevolen actief te zoeken naar locaties die gekenmerkt worden door een

gemeenschap van kortlevende mobiele soorten die snel kunnen reageren op veranderingen in de omgeving. Dergelijke gemeenschappen zijn vooral in hoog dynamische gebieden te verwachten. Na een suppletie ontwikkelt zich snel weer een nieuwe bodemdiergemeenschap die vergelijkbaar is qua samenstelling en dichtheid met de oorspronkelijke gemeenschap. Verwacht mag worden dat dergelijke suppleties uitvoerbaar zijn conform de Wet natuurbescherming (Botman en Koolstra, 2022).

- Gezien de aanwezige hoge dynamiek op "systeem-veranderende" suppletielocaties zijn op de suppletielocatie beperkte nadelige effecten op aanwezige ecologische waarden te verwachten. Door de veranderingen in de bestaande autonome processen zijn (indirecte) significant negatieve effecten op Natura 2000 doelen op voorhand niet uit te sluiten. Pas na nader onderzoek kan een uitspraak omtrent de uitvoerbaarheid conform de Wet natuurbescherming verricht worden.



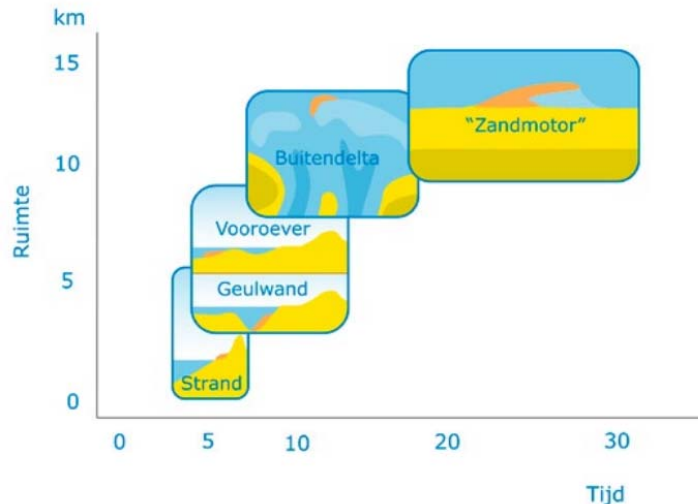
Figuur 27 Resultaat indeling in fysiotype (links/midden Holzhauser et. al., 2021) en verdeling zones buitendelta naar dominante processen (rechts, Elias, 2021)

6 Een buitendeltasuppletie als instrument voor kustbeheer

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het “instrument” buitendeltasuppleties als mogelijk onderdeel van het kustbeheer. Nadat de relatie van buitendeltasuppleties ten opzichte van de huidige suppletievormen is toegelicht wordt stilgestaan bij het beleidsadvies van Kustgenese 2.0. Vervolgens wordt de toepasbaarheid van buitendeltasuppleties op basis van de huidige kennis beschouwd. Het hoofdstuk wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen met betrekking tot het instrument buitendeltasuppletie.

6.1 Relatie van buitendeltasuppleties met de huidige suppletievormen

Rijkswaterstaat heeft opdracht om uitvoering te geven aan het kustbeleid door de kustlijn te onderhouden en het zandtekort van het kustfundament te compenseren door middel van suppleties. In het uitvoeringskader suppletieprogramma (Min. Infrastructuur & Waterstaat en Rijkswaterstaat WVL, 2022) wordt het proces uitgelegd hoe het kustbeleid door Rijkswaterstaat wordt doorvertaald in een meerjarig suppletieprogramma van het uitvoeringsprogramma Kustlijn zorg. Daarnaast wordt in dit kader inzichtelijk gemaakt welk type zandsuppleties gebruikt kunnen worden (Figuur 28).



Figuur 28 Verdeling van verschillende suppleties naar ruimte en tijd (Rijkswaterstaat, 2020)

Het Rijkswaterstaat programma Kustlijn zorg programmeert met name een drietal suppletietypes in het beheer van de Nederlandse kust: strandsuppleties, vooroeversuppleties en geulwandsuppleties⁴. De keuze voor het suppletietype hangt grotendeels samen met de lokale morfologie, de noodzaak van een suppletie in relatie tot de waterveiligheid van het kustgebied, maar ook bestuurlijke factoren zoals gemaakte afspraken met de regio zijn daarbij van belang. In de regel worden

⁴ Geulwandsuppleties zijn een variant op de vooroeversuppletie waarbij zand wordt aangebracht onder water om de kustwaartse migratie van een geul tegen te gaan en om, daar waar nodig, grote hoeveelheden zand aan het kuststelsel toe te voegen.

suppleties aangebracht onder water (als vooroever of geulwand), omdat de kosten voor deze suppleties lager liggen, doordat het zand eenvoudiger aangebracht kan worden. Wanneer i) de lokale morfologie dit niet toestaat, ii) uit ervaring is gebleken dat onderwater suppleties niet efficiënt zijn in het kustlijnonderhoud of iii) wanneer de ligging van de kustlijn sterk gekoppeld is aan de veiligheid van de waterkering, wordt gekozen voor een strandsuppletie.

In tegenstelling tot vooroever-, geulwand- en strandsuppleties dragen buitendeltasuppleties niet direct bij aan het behoud van de kustlijn. Buitendeltasuppleties zijn net als de Zandmotor meer te zien als een systeemsuppletie, waarmee het kustfundament in evenwicht gehouden kan worden door het toevoegen van relatief grote volumes zand aan het kuststelsel. Systeemsuppleties worden op een grotere ruimteschaal uitgevoerd en hebben een langduriger effect. In Figuur 28 worden de verschillende schaalniveaus per suppletievorm weergegeven.

6.2 **Beleidsadvies Kustgenese 2.0: introductie tijdshorizon**

Het beleidsadvies van het programma Kustgenese 2.0 heeft geresulteerd in een voorkeursstrategie, waarbij de komende jaren in totaal jaarlijks 11,0 miljoen m³ zand wordt gesuppleerd langs de gehele Nederlandse kust (Rijkswaterstaat, 2020). Dit volume zand is opgebouwd uit de minimale hoeveelheid zand van 10,1 miljoen m³ die nodig is voor het handhaven van de kustlijn op een termijn van 0 - 20 jaar plus 0,9 miljoen m³ zand dat aanvullend wordt gesuppleerd voor het in evenwicht houden van het kustfundament voor de langere termijn (> 20 jaar). Dit laatste volume zand is met name bedoeld voor het Waddengebied, gezien de sedimentbehoefte van dit deel van de kust. Deze voorkeursstrategie impliceert een aanscherping van de bestaande operationele doelstellingen met betrekking tot zowel het handhaven van de kustlijn als het in evenwicht houden van het kustfundament door een tijdshorizon te introduceren. De aangepaste doelen kunnen als volgt worden geformuleerd:

1. Dynamisch handhaven van de kustlijn op een tijdschaal van 0 tot 20 jaar;
2. Voldoende in evenwicht houden van het kustfundament op langere termijn (>20 jaar).

In het advies is aangegeven dat buitendeltasuppleties een goede invulling kunnen zijn voor het voldoen aan het tweede operationele doel: het voldoende in evenwicht houden van het kustfundament op langere termijn. Een buitendeltasuppletie zou dan gemiddeld eens per 5 tot 10 jaar (uitgaande van orde grootte 5 miljoen m³ zand) uitgevoerd kunnen worden.

6.3 **Beschouwing toepasbaarheid buitendeltasuppleties**

Voor het regulier inzetten van buitendeltasuppleties, moet het mogelijk zijn om aan de hand van een "standaard" voorbereiding tot een goed ontwerp te komen. In de tussenevaluatie (Ebbens, 2019) is gesteld dat er, voordat buitendeltasuppleties op reguliere basis inzetbaar zijn, meer kennis nodig is over de beste ligging van een buitendeltasuppletie, de bijdrage aan kustlijnhandhaving en de ecologische randvoorwaarden voor de uitvoering. In deze paragraaf wordt ingegaan wat hiervoor nodig is.

Buitendeltasuppleties als integraal onderdeel van het kustbeleid en kustbeheer

Uit de pilotsuppletie blijkt dat het morfologisch gedrag en de effecten op natuurwaarden van een buitendeltasuppletie op basis van een conceptueel model inzichtelijk te maken zijn. Met behulp van morfostatische modellering is het mogelijk om het conceptuele model nader aan te scherpen. Voor de verdere voorbereiding van een uit te voeren buitendeltasuppletie maakt het uit tot welke type de suppletie behoort. Dankzij de pilotsuppletie is al ervaring met een "systeem-volgende" suppletie en is veel kennis en expertise opgedaan met betrekking tot het gedrag en de effecten op natuurwaarden. Door een ingreep te plaatsen in een van de getij-geulen van de buitendelta, is te verwachten dat de suppletie eerder "systeem-veranderend" van aard zal zijn. Huidige modellen kunnen dit soort ingrepen nog niet voldoende voorspellen. Daarnaast is een "systeem-veranderende" suppletie nog niet eerder uitgevoerd. Het risico op onverwachte morfologische effecten bij "systeem-veranderende" suppleties is hierdoor groter in vergelijking met "systeem-volgende" suppleties. Het verdient aanbeveling het modelinstrumentarium door te ontwikkelen om dergelijke "systeem-veranderende" suppleties beter te kunnen voorspellen. Hierbij dient tevens aandacht te zijn voor de mogelijke effecten op de natuurwaarden. Het risico spitst zich daarbij vooral toe op de suppletielocatie zelf (naar verwachting erg dynamisch), maar op de indirecte effecten door wijziging van de autonome processen.

De pilotsuppletie leert dat buitendeltasuppleties (type "systeem-volgend") kunnen bijdragen bij aan het voldoende in evenwicht houden van het kustfundament op langere termijn. Om als beheerder van de kust hier invulling aan te kunnen geven, is het wenselijk om inzicht te hebben in de bestaande zandvoorraad per buitendelta. Op basis van een nieuw te ontwikkelen beleidsinstrument kan Rijkswaterstaat op eenduidige wijze besluiten wanneer overgegaan dient te worden op het extra toevoegen van zand. Hiermee wordt het mogelijk om de keuze voor het suppleren van extra zand op buitendelta's goed te kunnen onderbouwen. Daarnaast verdient het aanbeveling om aan hand van de uitkomsten van de pilotsuppletie en het beleidsadvies Kustgenese 2.0 het uitvoeringskader suppletieprogramma te actualiseren om inzichtelijk te maken hoe buitendeltasuppleties vanuit de doelstellingen van het kustbeleid onderdeel kunnen vormen van de suppletieprogrammering van Kustlijninzorg.

Interactie tussen buitendeltasuppleties en kustlijnsuppleties

Uit het uitgevoerde onderzoek blijkt dat het zand van de pilotsuppletie zich op een natuurlijke manier over het buitendeltasysteem verdeelt. Daarmee versterkt deze suppletie de gangbare, autonome "Sediment-bypassing" processen (Elias, 2021) en kan daarmee mogelijk (op termijn) ook een bijdrage leveren aan het voeden van de (erosieve) kustlijn van Ameland Noordwest. Hoe groot deze bijdrage precies is, is vooralsnog moeilijk te zeggen. De verwachting is dat deze bijdrage in absolute zin zal toenemen wanneer deze suppletie herhaald wordt. Dit illustreert dat buitendeltasuppleties niet alleen kunnen bijdragen aan het in evenwicht houden van het kustfundament, maar ook (voor een deel) aan het handhaven van de kustlijn van Ameland op de middellange tijdschaal. Dit laat zien dat de verschillende suppletietypes (kustlijnsuppleties versus systeemsuppleties) ook met elkaar interacteren. Door het verder ontwikkelen van het bestaande modelinstrumentarium (Delft3D Brute Force, SedTRAILS) kan worden bijgedragen aan het verbeteren van de modellering van sediment bypassing processen op buitendelta's. Hiermee kan het morfologisch gedrag van suppleties op buitendelta's nog beter worden ingeschat en

wordt het wellicht mogelijk om te kwantificeren hoeveel van het gesuppleerde zand binnen welke termijn de eilandkusten kan bereiken.

Uitvoerbaarheid van buitendeltasuppleties conform de Wet natuurbescherming

In het kader van deze eindevaluatie is door Botman en Koolstra (2022) onderzocht in hoeverre ook toekomstige buitendeltasuppleties uitvoerbaar zijn in het kader van de Wet natuurbescherming. Hiervoor is gekeken naar de mogelijke gevolgen van in beweging zijnde kaders van de Wet natuurbescherming en zijn de effecten van buitendeltasuppleties vergeleken met die van reguliere suppleties.

Momenteel lopen diverse discussies en ontwikkelingen die kunnen leiden tot wijzigingen van de juridische kaders rondom de Wet natuurbescherming. Het gaat daarbij om de kaders voor stikstofdepositie en de voorwaarden die gesteld worden aan de uitvoering van suppleties. Deze kaders zijn nog niet uitgekristalliseerd, waardoor het niet mogelijk is om met zekerheid een uitspraak te doen over de uitvoerbaarheid conform de Wet natuurbescherming. Dit geldt echter voor alle type suppleties. Buitendeltasuppleties zijn daarin niet onderscheidend. In het onderzoek is ervan uitgegaan dat kustsuppleties in principe uitvoerbaar blijven conform de Wet natuurbescherming vanwege het grote veiligheidsbelang dat hiermee gemoeid is.

Onderscheidend voor de effecten tussen de verschillende suppletievormen is de locatie waar de suppletie plaatsvindt. Buitendelta- en vooroeversuppleties vinden beide onderwater plaats, strandsuppleties op het land. Strandsuppleties hebben naast vergelijkbare effecten als onderwatersuppleties (denk aan verstoring door zandtransport), kans op significante effecten op Natura 2000 doelen (habitattypen van het land en broedvogels) die niet of minder beïnvloed worden door onderwatersuppleties. Strandsuppleties worden (afhankelijk van de locatie) dichterbij stikstofgevoelige habitats uitgevoerd dan onderwatersuppleties en hebben daarom een grotere kans om tot significante effecten te leiden op stikstofgevoelige habitats dan onderwatersuppleties. Bij strandsuppleties speelt ook dat deze door bedekking met zand of verstoring (significante) effecten kunnen hebben op landhabitattypen en broedvogels, hetgeen niet aan de orde is bij onderwatersuppleties. Strandsuppleties moeten om significante effecten op Natura 2000 doelen te voorkomen aan meer voorwaarden voldoen dan onderwatersuppleties, hetgeen de uitvoerbaarheid lastiger maakt.

Buitendeltasuppleties, vooroeversuppleties en strandsuppleties (alleen in geval er een geul gegraven moet worden) kunnen alle drie effecten hebben op benthos en daarmee op schelpdieren foeragerende eenden. Als net zoals bij de pilotsuppletie in het Amelanders Zeegat gekozen wordt voor een suppletie op een hoogdynamische locatie in de buitendelta, geldt voor alle genoemde suppleties dat deze plaatsvinden in hoogdynamisch gebied waar weinig schelpdierconcentraties aanwezig zijn. De suppleties zijn in die zin niet onderscheidend. Wanneer de suppletie echter plaatsvindt in een laagdynamisch gebied met een hoge concentratie schelpdieren kunnen mogelijk wel significant negatieve effecten optreden op benthos en schelpdieretende vogels. Ook hierin zijn de suppleties niet onderscheidend.

Uit het morfologisch onderzoek is gebleken dat de pilotsuppletie zoals uitgevoerd is in het Amelanders Zeegat een "systeem-volgende" suppletie is. Het is ook mogelijk systeem-veranderende suppleties aan te leggen. Naar de verwachte effecten op Natura 2000-waarden van "systeem-veranderende" suppleties is echter nog geen onderzoek gedaan. Dit zal eerst moeten gebeuren, alvorens uitspraken gedaan

kunnen worden over de verwachte uitvoerbaarheid conform de Wet natuurbescherming van "systeem-veranderende" buitendeltasuppleties.

De verwachting is dat toekomstige buitendeltasuppleties – mits deze "systeem-volgend" worden aangelegd en op locaties met lage schelpdierconcentraties – evengoed uitvoerbaar zijn conform de Wet natuurbescherming als vooroeversuppleties en makkelijker uitvoerbaar zijn dan strandsuppleties.

Vergelijking aannames passende beoordeling en uitkomsten monitoring

Omdat de ecologische T0-meting nog niet beschikbaar was ten tijde van het opstellen van de Passende Beoordeling zijn de effecten van de pilotsuppletie op benthos, vis, vogels en zeehonden ingeschat op basis van de best beschikbare kennis. Door Botman en Koolstra (2022) is, naast bovenstaande toetst op uitvoerbaarheid conform de Wet natuurbescherming, een analyse uitgevoerd in hoeverre de uitkomsten van het monitoringsprogramma afwijken van de gestelde uitgangspunten in de passende beoordeling.

In het onderzoek wordt geconcludeerd dat de inzichten uit het morfologische en ecologische onderzoek in lijn zijn met de uitgangspunten en voorspelde effecten in de Passende Beoordeling en vergunning voor de pilotsuppletie Amelanders Zeegat. Er zijn geen verschillen naar voren gekomen die maken dat de effecten anders dan wel ernstiger zouden zijn dan destijds verondersteld. De effectvoorspelling in de Passende Beoordeling vormt een goed vertrekpunt voor de effectvoorspelling van een toekomstige buitendeltasuppletie. De inzichten uit het morfologisch en ecologisch onderzoek kunnen benut worden om de effectbepaling en de locatiekeuze van toekomstige buitendeltasuppleties (met oog op zo min mogelijk effecten op Natura 2000 waarden) verder te optimaliseren.

6.4 Conclusies en aanbevelingen toepasbaarheid buitendeltasuppleties

Uit de opgedane kennis vanuit de pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat, de conclusies in voorgaande paragraaf én de bespreking met experts in september 2022 blijkt dat buitendeltasuppleties invulling kunnen geven aan de doelstelling om het kustfundament op langere termijn (>20 jaar) voldoende in evenwicht te houden. Dit is – conform beleidsadvies Kustgenese 2.0 – een geschikt instrument om aan de sedimentbehoefte van met name het Waddengebied te voldoen. Voor het opnemen van buitendeltasuppleties als instrument voor het reguliere kustbeheer bestaan meerdere argumenten. Buitendeltasuppleties:

- verhogen het zandaanbod op de buitendelta en dragen daarmee bij aan het kustbeleid door het 'kustfundament in evenwicht te houden' en 'zandverliezen op diep water te compenseren';
- zorgen voor aanbod van zand om aan toekomstige zandvraag van de Waddenzee te voldoen;
- dragen direct bij aan het voldoende in evenwicht houden van het kustfundament op langere termijn (>20 jaar) en kunnen tevens bijdragen aan het handhaven van de kustlijn op termijn. De verwachting is dat deze bijdrage in absolute zin zal toenemen wanneer deze suppletie herhaald wordt;
- kunnen aan de hand van analyses van bodemdata, aangescherpt met morfostatische en morfodynamische berekeningen (conceptuele modellen) op hoofdlijnen worden geprogrammeerd.
- kunnen op basis van een indeling in fysiotopen met een beperkte ecologische impact worden aangebracht, mits gekozen wordt voor een locatie met een gemeenschap van kortlevende mobiele soorten en de autonome

morfologische processen niet worden beïnvloed. In dat geval zijn de effecten vergelijkbaar als bij vooroeversuppleties en is naar verwachting de buitendeltasuppletie uitvoerbaar in het kader van de Wet natuurbescherming.

Voordat deze vorm van buitendeltasuppleties onderdeel kunnen worden van het reguliere instrumentarium voor het kustbeheer dient nog een aantal zaken nader in detail uitgewerkt te worden en bestaan er meerdere aandachtspunten voor de verdere uitwerking. Deze worden hieronder weergegeven:

- **Beleidsinstrument** Om de rol van beheerder goed uit te kunnen voeren is het wenselijk om een nieuw beleidsinstrument te ontwikkelen, waarmee Rijkswaterstaat op een eenduidige en systematische wijze kan besluiten wanneer overgegaan dient te worden op het extra toevoegen van zand. Hiermee wordt het tevens mogelijk om een prioritering aan te kunnen brengen tussen verschillende buitendelta's.
- **Actualiseren uitvoeringskader suppletieprogramma:** Het bestaande uitvoeringskader van het suppletieprogramma kan op basis van de uitkomsten van de pilotsuppletie en het beleidsadvies Kustgenese 2.0 geactualiseerd worden. Een nieuw te ontwikkelen beleidsinstrument voor buitendeltasuppleties kan helpen in het aanscherpen van het kader en de vertaling van beleidsdoelstellingen over het kustfundament naar kustbeheer. Hiermee wordt helderheid gegeven op welke wijze in de praktijk invulling wordt gegeven aan het voldoende in evenwicht houden van het kustfundament.
- **Morfologische modellering:** de huidige morfodynamische modellering levert redelijke accurate voorspellingen op tot maximaal 4 jaar. Optimalisatie van de bestaande modellen is gewenst om het effect van buitendeltasuppleties ook op een langere termijn dan 4 jaar te kunnen voorspellen;
- **Modellering ecologie en morfologie:** Om ook voor andere zeegaten vast te kunnen stellen welke locaties op de buitendelta geschikt zijn om zand aan te brengen dienen de morfologisch en ecologische modellen aan elkaar verbonden te worden. Hiermee kan de hydrodynamiek toegevoegd worden aan het bestaande fysiotopen model. De voorkeur gaat uit van het ontwikkelen van modellen op basis van Open Source. Hiermee wordt het op termijn mogelijk voor adviesbureaus een toetsing uit te kunnen voeren naar de meest geschikte locatie.
- **Monitoring:** Het aanbrengen van suppleties met grote omvang (orde grootte 10 miljoen m³) kan leiden tot de diversificatie in de korrelgrootteverdeling van het sediment en daarmee een impact hebben op aanwezige natuurwaarden. Aanvullende monitoring met betrekking tot dit effect is gewenst.
- **Uitvoerbaarheid conform de Wet natuurbescherming:** De kennis uit het morfologisch en ecologisch onderzoek kan ingezet worden om bij volgende buitendeltasuppleties een locatie te bepalen met minimale effecten op Natura 2000 doelen. Indien een "systeem-veranderende" buitendeltasuppletie aangelegd wordt, is eerst aanvullend onderzoek naar de effecten noodzakelijk aangezien op voorhand significant negatieve effecten niet zijn uit te sluiten.
- **Geschikte suppletielocaties:** De Waddenzee heeft net als het kustfundament extra voeding van zand nodig om mee te groeien met de zeespiegelstijging. Op lange termijn zal bij versnelde zeespiegelstijging dus meer volume toegevoegd moeten worden. Op het niveau van de gehele

buitendelta is het noodzakelijk om inzicht te hebben hoe groot de vraag per locatie is. Op het strand en in de vooroever is hiervoor te weinig plek.

- **Praktische Uitvoerbaarheid:** een belangrijk aspect uit de evaluatie van de pilot betreft de uitvoerbaarheid van de suppletie. Bij het vaststellen van toekomstige suppletielocaties op buitendelta's is het noodzakelijk om niet alleen naar morfologie en ecologie te kijken. De uitvoerbaarheid is daarbij ook van belang. Het vroegtijdig betrekken van de aannemer bij het ontwerp is hierbij belangrijk;
- **Gestandaardiseerd proces:** Een belangrijk aspect voor het regulier kunnen toepassen van suppleties is een standaard proces. Voordat buitendeltasuppleties als instrument aan het kustbeheer toegevoegd worden, dient inzichtelijk te zijn welke morfologische en ecologische onderzoeksinspanning noodzakelijk is voor zowel "systeem-volgende" als "systeem-veranderende" suppleties. Het gaat daarbij zowel om de programmering als om de conditionering van buitendeltasuppleties.

Het heeft de voorkeur om bovenstaande aanbevelingen zoveel als mogelijk te integreren binnen de scope van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging – project Zandige Kust en het onderzoeksprogramma KPP B&O Kust. In dit laatste programma is de afgelopen jaren al meerdere malen onderzoek gedaan naar systeemsuppleties waartoe ook buitendeltasuppleties behoren.

7 Bredere opbrengst van de pilotsuppletie

Voor de pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat zijn doelen gesteld met betrekking tot de haalbaarheid (vergunbaarheid, uitvoerbaarheid & draagvlak), morfologische werking en mogelijke effecten op de ecologie. De pilot heeft echter ook op andere vlakken en thema's een belangrijke rol gespeeld. In dit hoofdstuk wordt hier op ingegaan.

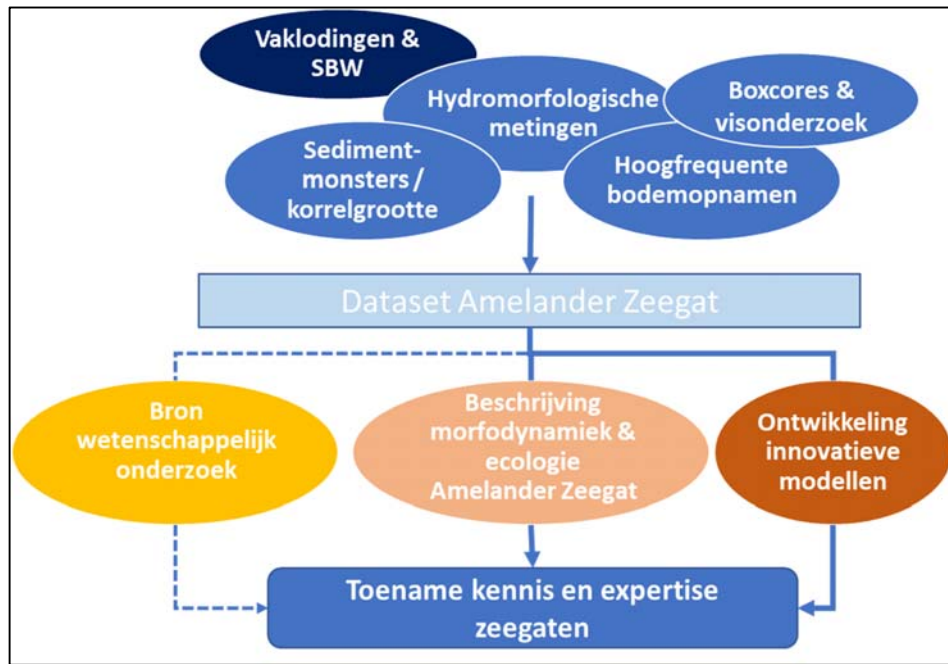
7.1 Gezamenlijk veldwerk en data-management

Voor aanvang van de suppletie was het noodzakelijk om een T0 meting uit te voeren. Rijkswaterstaat WVL heeft daarbij getracht om gelieerde onderzoeksprogramma's als KPP B&O-kust en SEAWAD te betrekken. Dit heeft geresulteerd in een gezamenlijke meetcampagne in 2017, waarbij zowel bootcapaciteit als data met elkaar gedeeld is. Rijkswaterstaat, Deltares en de partners van het SEAWAD onderzoeksproject, Technische Universiteit Delft, Universiteit Utrecht en Universiteit Twente, hebben nauw samengewerkt om alle beschikbare data te combineren in één dataset, waarmee processen binnen zeegaten en buitendelta's zoals waterbeweging en sedimenttransport beter begrepen en gemodelleerd kunnen worden. Deze dataset is uniek, vanwege 1) het grote aantal meetlocaties, 2) het groot aantal geavanceerde meetinstrumenten) en 3) de veelzijdigheid van de metingen (waterbeweging, zwevend stof, sedimentsamenstelling, bodemvormen, morfologie en macrobenthos). Een overzicht van metadata en methode van inwinning is beschreven in een datarapport (Van der Werff, 2019) en is beschikbaar via www.waterinfo-extra.rws.nl. Via deze site is ook de data in te zien en te downloaden.

Dankzij de monitoring kon, zowel tijdens de aanleg als na afronding van de aanleg, de ontwikkeling van de suppletielocatie goed gevolgd worden (paragraaf 3.2). De opbrengst met betrekking tot de morfologische kennis en expertise is echter veel meer dan alleen de morfologische ontwikkeling van de aangelegde pilotsuppletie. Het gaat daarbij onder andere om:

- Een langjarig overzicht is beschikbaar van de bathymetrische ontwikkeling van het Amelanders Zeegat;
- Dankzij de jaarlijkse bathymetrische opnames van het zeegat en de intensieve monitoring van de suppletielocatie tijdens en na aanleg is er een beter zicht op de korte termijn processen die binnen zeegaten een rol spelen;
- De T0 meetcampagne maakt het mogelijk om integraal te kunnen kijken naar het verband tussen sedimentsamenstelling, optredende morfologische processen en de aangetroffen natuurwaarden;
- De intensieve monitoring van de aanleg van de pilotsuppletie gaf de mogelijkheid innovatieve meettechnieken, zoals de Xband radar, te ontwikkelen, waarmee het mogelijk is om de ontwikkelingen continu te kunnen volgen.
- Dankzij de frequentere metingen is meer kennis ontwikkeld omtrent het Amelanders Zeegat, die bijdraagt om beter inzicht te krijgen in de sturende processen bij de ontwikkeling van overige zeegaten.

In Figuur 29 is bovenstaande schematisch weergegeven.



Figuur 29 Schematische weergave impact metingen pilotsuppletie Amelanders Zeegat

7.2

Wetenschappelijke opbrengst pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat

De (wetenschappelijke) impact van de pilotsuppletie is groter dan alleen Kustgenese 2.0. Zo hebben de resultaten van de pilotsuppletie bijgedragen aan het vormgeven van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging en is de wetenschappelijke kennis met betrekking tot de pilotsuppletie breeduit gedeeld. De pilotsuppletie Amelanders Zeegat heeft tevens een belangrijke rol gespeeld in het opleiden en enthousiast maken van jonge professionals voor het werkveld van kustveiligheid en ecologie. Dankzij het monitoringsprogramma zijn zeker twaalf promovendi en afstudeerders in aanraking gekomen met het werkveld van Rijkswaterstaat. Hiermee is de verbinding tussen de praktijk en de (toegepaste) wetenschap toegenomen. De dataset over het Amelanders Zeegat vormt ook voor toekomstige onderzoekers een waardevolle bron voor het (door)ontwikkelen van kennis en expertise met betrekking tot het gedrag van zeegaten inclusief buitendelta's.

7.3

Innovaties in het veldwerk

Als laatste punt in het kader van "aanvullende opbrengsten" kunnen innovaties in het veldwerk worden genoemd. Om te beginnen is het goed om te constateren dat het uitvoeren van het veldwerk met een T0, T1 en T2 op de buitendelta al een uitdaging op zich is. Door de enorm dynamische omstandigheden op de buitendelta's heeft in het verleden hier nog weinig tot geen veldwerk plaatsgevonden. Daarnaast is er in vergelijking tussen de uitgevoerde T0 meting in 2017 en de T2 meting in 2021 een efficiëncyslag gemaakt in de uitvoering van het ecologische veldwerk. In 2021 heeft de registratie aan boord van het schip van alle monsters en metingen vol automatisch plaatsgevonden door de inzet van handcomputers aan boord.

8 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk komen de conclusies en aanbevelingen aan bod met betrekking tot de pilotsuppletie. Begonnen wordt met de conclusies op hoofdlijnen. Vervolgens wordt voor verschillende thema (morfologie, ecologie, etc.) in meer detail ingegaan op de conclusies. Het hoofdstuk wordt afgesloten met aanbevelingen.

8.1 Conclusies op hoofdlijnen

Uitvoeren van pilotsuppletie op de buitendelta

De pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat is de eerste suppletie die aangelegd is op een buitendelta. Op basis van de eindevaluatie kan gesteld worden dat het aanbrengen van een suppletie van 5 miljoen m³ op de buitendelta van het Amelanders Zeegat op basis van de toen geldende wet- en regelgeving vergunbaar was. Ondanks de hoge dynamiek (getijstrooming en golven) op de buitendelta bleek de suppletie tevens uitvoerbaar. In de uitvoeringsfase is de beoogde suppletielocatie nog wat aangepast in verband met veiligheid van werken én het aantreffen van jonge zandspiëring. Bij de betrokken stakeholders bestond er, mede dankzij het omvangrijke monitoringsprogramma, draagvlak voor het uitvoeren van de pilotsuppletie.

Inzichten vanuit het monitoringsprogramma

Uit de uitgevoerde monitoring blijkt dat de aangebrachte suppletie op een geleidelijke wijze is opgenomen in het autonome morfologische systeem van de buitendelta. De suppletie is hierdoor te typeren als een "systeem-volgende" suppletie. De suppletie is op een gunstige plek aangelegd, aangezien de oorspronkelijke bodem-gemeenschap op de suppletielocatie voornamelijk uit pionierssoorten bestond, waarvan de diversiteit en dichtheid lager ligt in vergelijking met diepere delen van de buitendelta. Drie jaar na aanleg van de pilotsuppletie heeft zich ter hoogte van de suppletie opnieuw een bodemdiergemeenschap ontwikkeld die vergelijkbaar is met de situatie voor aanleg, met uitzondering van de schelpdieren. Op basis van het uitgevoerde benthos- en visonderzoek kan worden geconcludeerd dat de effecten van de pilotsuppletie beperkt zijn in omvang. De pilotsuppletie heeft, naast onderzoeken vanuit de projecten Kustgenese 2.0, SEAWAD en KPP B&O-kust, een enorme bijdrage geleverd aan het vergroten van systeemkennis over zeegaten in het algemeen en het Amelanders Zeegat in het bijzonder. De verkregen dataset heeft daarnaast als een katalysator gewerkt voor de samenwerking tussen verschillende kennis- en onderzoeksprogramma's en het ontwikkelen van nieuwe (innovatieve) modellen.

Potentie van het instrument "buitendeltasuppletie"

De uitgevoerde pilotsuppletie toont de potentie aan van buitendeltasuppleties als instrument om het kustfundament op lange termijn (>20 jaar) in evenwicht te houden en mogelijk (op termijn) een eroderende eilandkust van enige zandaanvoer voorzien. Deze bijdrage wordt groter, naarmate de buitendeltasuppletie structureel wordt opgenomen in de suppletieprogrammering. Daarmee kunnen buitendeltasuppleties een bijdrage leveren in de sedimentbehoefte van het Waddengebied in navolging van het beleidsadvies Kustgenese 2.0.. Door te kijken naar de a-biotische omstandigheden op de beoogde suppletielocatie aan de hand van fysiotopen kan vooraf een inschatting gemaakt worden van de hersteltijd van de lokale

benthosgemeenschap. Vanuit Rijkswaterstaat is het wenselijk dat er een beleidsmatig instrument beschikbaar is waarmee op een eenduidige en systematische wijze besloten kan worden tot het toevoegen van extra zand op de buitendelta. Voor het kustbeheer is het ook wenselijk om verder te investeren in morfologische en ecologische kennisontwikkeling én in meer detail te kijken naar de uitvoerbaarheid van buitendeltasuppleties op basis van de huidige wet- en regelgeving.

8.2 Conclusies per thema

Nu de pilotsuppletie is aangelegd, het monitoringsprogramma is afgerond en de resultaten zijn geanalyseerd kunnen conclusies getrokken worden met betrekking tot de buitendeltasuppletie. In deze paragraaf wordt tevens stilgestaan in hoeverre de beoogde doelstellingen voor de pilotsuppletie zijn behaald.

Morfologie

- De uitgevoerde suppletie laat zien dat een suppletie van 5 miljoen m³ aangelegd kan worden op de buitendelta zonder het autonome gedrag van de buitendelta significant te beïnvloeden ("systeem-volgende" suppletie). De suppletie is op een geleidelijke wijze opgenomen in het autonome morfologische systeem van de buitendelta. Het is dus mogelijk om de buitendelta met zand te voeden zonder dat de autonome processen op de buitendelta verstoord worden;
- De pilotsuppletie vertoont geen grootschalige dynamiek, er is wel sprake van een erosieve trend op de locatie van aanleg. Er verdwijnt zand op een geleidelijke wijze van de locatie van aanleg naar elders in de buitendelta. Het volume is daar afgenomen van 5 miljoen m³ na aanleg in februari 2018 tot 2,9 miljoen m³ in juli 2021;
- De combinatie van uitgebreide metingen en modellering geeft veel inzicht in de morfologische veranderingen op de buitendelta en de maatgevende processen. Deze processen kunnen inzichtelijk gemaakt worden middels een conceptueel model.
- Het onderzoek dat in de afgelopen jaren is uitgevoerd bij Ameland heeft veel inzicht opgeleverd in de complexe processen op de buitendelta;
- De pilotsuppletie draagt bij aan versterken van het kustfundament conform bestaand beleid en voorziet mogelijk (op termijn) de eilandkust van enige zandaanvoer;
- Het regelmatig uitvoeren van bathymetrische en korrelgrootte metingen voor, tijdens en na de pilotsuppletie heeft enorm bijgedragen aan het vergroten van systeemkennis over zeegatsystemen én het Amelanders Zeegat. Hiermee is een impuls gegeven aan het valideren van bestaande modellen en ontwikkelen van nieuwe modellen.

Uitvoerbaarheid conform Wet natuurbescherming

- Het aanbrengen van een suppletie met een omvang van 5 miljoen m³ op de buitendelta van het Amelanders Zeegat bleek eind 2017 vergunbaar, alle benodigde vergunningen waaronder de Wet natuurbeschermingsvergunning zijn verkregen.
- De uitkomsten vanuit de uitgevoerde ecologische monitoring komen overeen met de gemaakte aannames in de passende beoordeling uit 2017 ten behoeve van de vergunningaanvraag inzake de Wet natuurbescherming;
- Ten behoeve van deze eindevaluatie is onderzocht in hoeverre buitendeltasuppleties ook op basis van de Wet natuurbescherming uitvoerbaar is. Hieruit volgt de verwachting dat effecten op de natuurwaarden

van "systeem-volgende" buitendeltasuppleties vergelijkbaar zijn met de effecten van reguliere vooroeversuppleties, mits aangebracht op een locatie op de buitendelta die gekenmerkt wordt door een gemeenschap van kortlevende mobiele soorten;

- Voor "systeem-veranderende" suppleties is het niet mogelijk een uitspraak te doen inzake uitvoerbaarheid conform Wet natuurbescherming, gezien het gebrek aan praktijk gegevens en de bestaande onzekerheden met betrekking tot de gevolgen van het veranderen van de autonome morfologische processen;

Praktische uitvoerbaarheid

- De omstandigheden op buitendelta's kunnen gezien de diepte en het golfklimaat lastig zijn voor sleephopperzuigers om het zand aan te brengen op de locatie. Integrale veiligheid voor zowel materieel als personeel is bij het vaststellen van de suppletielocatie en voor de uitvoering van groot belang;
- Door rekening te houden met de diepgang in relatie tot het stormseizoen was het mogelijk om jaarrond te werken;
- Door gedurende de uitvoering elke 4 tot 6 weken een peiling uit te voeren was de aannemer in staat om gedurende de aanleg wijzigingen aan te brengen in de te volgen aanpak.

Draagvlak en zichtbaarheid

- Binnen de (bestuurlijke) omgeving van het Amelanders Zeegat bleek voldoende draagvlak te zijn voor het uitvoeren van de suppletie. De suppletie heeft geen aantoonbare gevolgen gehad voor andere functies;
- De monitoringcampagne T0 voor aanvang van de buitendeltasuppletie heeft veel media aandacht getrokken en daarmee voor zichtbaarheid gezorgd van het werk van Rijkswaterstaat en het Nederlands kustbeheer in het bijzonder;
- Door het bewust opzoeken van de samenwerking vanuit Rijkswaterstaat met gelieerde onderzoeksprogramma's is een impuls gegeven aan de kennisuitwisseling. De gezamenlijke integrale meetcampagne is daar een mooi concreet voorbeeld van.

Ecologie

- Dankzij het monitoringsprogramma is het gelukt om de relatie tussen de (morfologische) omstandigheden en de dichtheid en samenstelling van het bodemleven inzichtelijk te maken. Hierdoor is het mogelijk om het (tijdelijke) effect van buitendeltasuppleties op de bodemgemeenschap beter in te kunnen schatten;
- De suppletie is op een gunstige plek aangelegd, aangezien de oorspronkelijke bodem-gemeenschap voornamelijk uit kortlevende mobiele soorten (dus lage dichtheid aan schelpdieren) bestond die snel kunnen reageren op veranderingen in de omgeving.
- Drie jaar na aanleg van de pilotsuppletie heeft zich ter hoogte van de suppletie opnieuw een bodemdiergemeenschap ontwikkeld die vergelijkbaar is met de situatie voor aanleg, met uitzondering van de schelpdier gemeenschap;
- Het lijkt erop dat bodemgebonden vissoorten binnen een relatief korte tijd na aanleg van de pilotsuppletie op dezelfde manier gebruik maken van het gesuppleerde gebied;
- Het aanbrengen van een pilotsuppletie met een omvang van 5 miljoen m³ op de buitendelta van het Amelanders Zeegat heeft geresulteerd in een beperkt

effect op de onderzochte natuurwaarden. Effecten op vogels en zeehonden worden gezien de gunstige suppletie locatie (pionierssoorten) niet verwacht;

- De benthische soortensamenstelling als geheel laat beperkt verandering zien tussen de T0, T1 en T2. In beide periodes zijn grotendeels dezelfde soorten bemonsterd en het zijn veelal dezelfde soorten die in de hoogste dichtheden voorkomen;
- De samenstelling van benthosgemeenschappen op de buitendelta wordt sterk beïnvloed door de aanwezige golven en stroming in combinatie met diepte en sedimentsamenstelling. In de hoog dynamische ondiepe buitendelta van het Amelanders Zeegat is de biodiversiteit laag, met de kenmerkende kortlevende en oppervlakte feeders, hoog mobiele en ingravende bodemdieren.

Doelbereik pilotsuppletie

Op basis van bovenstaande conclusie kan worden vastgesteld dat de vooraf gestelde doelstellingen (zie paragraaf 1.2) ruimschoots zijn behaald. De pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat heeft:

1. Zowel de morfologische als de ecologische systeemkennis over zeegatsystemen vergroot;
2. Inzicht gegeven in zowel het ontwerp als de haalbaarheid (draagvlak, vergunbaarheid en uitvoerbaarheid) van buitendeltasuppleties;
3. Bijdragen aan het versterken van het kustfundament conform beleid uit de derde kustnota.

8.3

Aanbevelingen

Tijdens het uitwerken van deze eindevaluatie is een groot aantal aanbevelingen naar voren gekomen. De belangrijkste aanbevelingen zijn:

- Houd blijvend aandacht voor de pilotsuppletie. Door de jaarlijkse vaklodingen van het Amelanders Zeegat te continueren, kan het verdere gedrag van de pilotsuppletie goed gevolgd worden;
- Doe onderzoek naar de nog openstaande leemten in kennis binnen lopende onderzoeksprogramma's als Zandige Kust en KPP B&O Kust. De belangrijkste kennislücken zijn:
 - o De relatie tussen de resultaten van de ecologische monitoring met de autonoom morfologische optredende processen;
 - o Het verrichten van referentiemetingen in een dynamische niet stationaire omgeving;
 - o De invloed van meteorologische ontwikkelingen zoals stormen op de indeling van zeegaten in golf- en getij gedreven gebieden;
 - o Het doorvertalen van effecten op benthos naar de gehele voedselketen.
- Om ook voor andere zeegaten vast te kunnen stellen welke locaties op de buitendelta geschikt zijn om zand aan te brengen dienen de morfologisch en ecologische modellen aan elkaar verbonden te worden. Hiermee kan de hydrodynamiek toegevoegd worden aan het bestaande fysiotopen model;
- Actualiseer het uitvoeringskader suppletieprogramma op basis van de uitkomsten van de pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat en het beleidsadvies Kustgenese 2.0.;
- Maak werk van het ontwikkelen van het "instrument" buitendeltasuppletie voor de kustlijn zorg door de gemaakte aanbevelingen met betrekking tot

- kennisontwikkeling, beslissingskader, vergunbaarheid en uitvoerbaarheid nader uit te werken;
- Blijf werken aan de ontwikkeling van een modelinstrumentarium (Delft3D Brute Force, SedTRAILS) om de effecten van "systeem-veranderende" en "systeem-volgende" suppleties te kunnen voorspellen en daarmee ook de bijdrage van buitendeltasuppleties in het sediment bypassing proces en de aanvoer van zand naar (eroderende) eilandkusten.

9 Literatuurverwijzingen eindevaluatie

Botman, B. en Koolstra, B., 2022. Verwachte uitvoerbaarheid buitendeltasuppleties conform Wet natuurbescherming. Concept Memo, versie 1 december 2022.

Ebbens, E., 2019. Tussenrapportage pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat. Rijkswaterstaat. RWS Bedrijfsinformatie, 90 p.

Elias, E.P.L., 2017. Stroming en sedimenttransport langs de Boschplaat op Terschelling. Rapport 11200878-000, Deltares, Delft, 60p.

Elias, E.P.L., 2021. Morfologische analyse buitendelta Ameland en de rol van de pilotsuppletie. Deltares 11206794-004-ZKS-0006, 31 december 2021. 84 pag.

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Pearson, S., 2020. Technisch advies Rol en Mogelijkheden Buitendelta's voor het Kustbeheer. Ten behoeve van beleidsadvies Kustgenese 2.0. Rapport 1220339-009-ZKS-0006, Deltares Delft, 32 p.

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.

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., de Ronde, J.G., 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. Neth. J. Geosci. 91, 293–310.

Escaravage, V., 2022. Effecten van de zandsuppletie in het Amelanders Zeegat op de bodemdieren-gemeenschappen 2 en 4 jaar na aanleg. Wageningen Marine Research C050/21, december 2022. 61 pag.

Gawehn, M., 2021. Ontwikkeling en toepassing X-Band radar voor morfologische analyse van het Amelanders Zeegat. Eindrapportage ten behoeve van Kustgenese 2.0. Deltares report 1220339-007-ZKS-005, Deltares, Delft, 25 p

Gawehn, M., van Dongeren, A., de Vries, S., Swinkels, C., Hoekstra, R., Aarninkhof, S., & Friedman, J., 2020. The application of a radar-based depth inversion method to monitor near-shore nourishments on an open sandy coast and an ebb-tidal delta. Coastal Engineering, 159.

Harlequin, D., 2021. Morphodynamic Modelling of the Ameland Ebb-Tidal Delta. An Assessment of the 2019 Pilot Nourishment. Delft University of Technology.

Holzhauser, H., Borsje, B.W., Herman, P.M.J., Schipper, C.A., Wijnberg, K.M., 2021. The geomorphology of an ebb-tidal-delta linked to benthic species distribution and functionality. Ocean Coast Manag., 216 (2021), Article 105938, 10.1016/j.ocecoaman.2021.105938. ISSN 0964-5691.

Lambregts, P., 2021. Sediment bypassing at Ameland inlet. And the role of an ebb-tidal delta nourishment. Delft University of Technology.

Leopold, M.F. en Baptist, M.J., 2016. De buitengewone biologie van de buitendelta's van de Nederlandse Waddenzee. Den Helder, IMARES Wageningen UR (University & Research centre), IMARES rapport C076/16. 28 p.

Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat en Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS, WVL), 2022. Uitvoeringskader suppletieprogramma. 24 pag.

Rijkswaterstaat, 2016. Projectplan Pilotsuppletie Buitendelta Amelanders Zeegat;

Rijkswaterstaat, 2020. Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust, Tech. rep., Rijkswaterstaat.

Schellekens, T. en Verduin E., 2020. T-1 monitoring Amelanders Zeegat, Rapportage Benthos boxcorer. Eurofins AquaSense. 86 pp.

Schellekens, T., 2022. T-2 monitoring Amelanders Zeegat, Rapportage Benthos boxcorer, Versie 03_definitief, Eurofins Omegam B.V., 32 p.

Van den Bogaart, L., R. van Hal, M. van der Meijden, S. M. J. M. Brasseur, M. J. Baptist en J. Wijsman., 2019. De ecologie van het Amelanders Zeegat; Een inventarisatie naar kennis over het ecologisch functioneren van het Amelanders Zeegat Wageningen Marine Research, C032/19, 61 pagina's.

Van der Werf, J.J., 2019. Data report Kustgenese 2.0 measurements, Rapport 1220339-015-ZKS-0004, Deltares, Delt, 85 p.

Van Hal R., Volwater J., Aarts G., Brasseur S., Glorius S., 2021. Ecologische effecten van een pilotsuppletie in het Amelanders Zeegat. Wageningen Marine Research, C004/21, 108.

Van Hal, R. en J. Volwater, 2019. Zandspiering in het Amelanders Zeegat : T1-meting voorjaar 2019. Wageningen Marine Research, Wageningen Marine Research rapport C105/19, 33 pagina's.

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.

Verduin, E. en Leewis L. (2018) T-nulmeting Benthos buitendelta Amelanders Zeegat 2017. Rapportage Benthos boxcorer. Eurofins AquaSense, 49 pp.

Bijlage A Opgestelde hypothesen en onderzoeksvragen

Bij de voorbereiding van de pilotsuppletie is in 2017 een aantal hypothesen opgesteld ter ondersteuning van de opzet van het monitoringsprogramma. De belangrijkste (hoofd) hypothesen zijn in onderstaand kader weergegeven.

Algemeen

- Het aanbrengen van een suppletie op de buitendelta is uitvoerbaar;
- Het uitvoeren van een buitendeltasuppletie is vergunbaar;
- Door middel van de juiste communicatie is het mogelijk om draagvlak te genereren voor een buitendeltasuppletie.

Morfologie

- Het zand van de pilotsuppletie zal zich vooral verspreiden door golfgedreven transport en in mindere mate door getijwerking;
- Ter hoogte van de locatie van de pilotsuppletie is voldoende dynamiek aanwezig om van de suppletie te kunnen leren;
- De vorming van de eb-geul (over eb-schild) wordt versterkt door de pilotsuppletie.

Ecologie

- Hoofdvraag: *“Wat zijn de kenmerken en natuurwaarden van het (eco)systeem van de buitendelta's van de waddenkust en wat zijn mogelijke effecten van suppleties op dit ecosysteem?”*
- Deelvraag Benthos: *“In hoeverre is de verspreiding van benthische habitats en de soortensamenstelling over het Amelanders Zeegat vergelijkbaar met het patroon dat is gevonden is voor de ondiepe kustzone van de Waddeneilanden, en is een suppletie daarop van invloed?”*
- Deelvraag Vissen: *“Wat is de samenstelling van de visgemeenschap in tijd en ruimte in het gebied van de buitendelta van het Amelanders Zeegat en is een suppletie van 5 tot 6 Mm³ hierop van invloed?”*
- Deelvraag Vogels: *“Zijn er vogelsoorten waarvoor de buitendelta van het Amelanders Zeegat een belangrijk rust- en of foerageergebied vormt en zo ja, is er een relatie tussen de verspreiding over en het gebruik door vogels van deze buitendelta en specifieke onderdelen van de buitendelta en is een suppletie van 5 tot 6 Mm³ hierop van invloed?”*
- Deelvraag Zeezoogdieren: *“Vormen de buitendelta's belangrijke foerageergebieden voor de grijze zeehond, de gewone zeehond en de bruinvis en zo ja, is er dan een relatie tussen het gebruik als foerageergebied en specifieke onderdelen van de buitendelta en is een suppletie van 5 tot 6 Mm³ hierop van invloed?”*

Bijlage B Literatuuroverzicht pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat

Deze bijlage bevat een overzicht van de publicaties die betrekking hebben op de pilotsuppletie. De publicaties worden gepresenteerd op basis van de aard van de publicatie: algemeen, meetprogramma, Kustgenese 2.0, KPP B&O Kust, SEAWAD en ecologie. Een aantal publicaties zijn zowel onder SEAWAD als onder ecologie te scharen. Deze zijn op beide plekken vermeld.

Algemeen

Ebbens, E., 2019. Tussenrapportage pilotsuppletie buitendelta Amelanders Zeegat. Rijkswaterstaat. RWS Bedrijfsinformatie, 90 p.

Rijkswaterstaat, 2020. Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust, Tech. rep., Rijkswaterstaat.

Rijkswaterstaat, 2016. Projectplan Pilotsuppletie Buitendelta Amelanders Zeegat.

Meetprogramma

Holzhauer, H., 2017. Meetlocaties benthos, bemonstering van de buitendelta van Ameland in september 2017 voorafgaand aan de proefsuppletie. versie 1.1, rapportage Universiteit Twente. 20pp.

Holzhauer, H., 2019. Habitatkaart 2019 Amelanders Zeegat in het kader van benthos-bemonstering september 2019. Deltares, 28pp.

Schipper, C.A. en Van Dalfsen J, 2017. Meetstrategie en Meetplan T-nulmetingen Amelanders Zeegat,. Rijkswaterstaat.

Schipper, C.A., Dekker, G.G.J., de Visser, B., Bolman, B., & Lodder, Q., 2021. Characterization of SDGs towards coastal management: Sustainability performance and crosslinking consequences. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031560>.

Van Dalfsen, J., 2016. Inventarisatie natuurwaarden Noordzeekustzone. Nature Based.

Van Hal, R., Wijsman, J., Van den Bogaart, L. en M. J. Baptist, 2018. Meetplan 2019 Amelanders Zeegat, T1 ecologie buitendelta. Wageningen Marine Research, C108/18, 39pp.

Van der Werf, J.J., 2019. Data report Kustgenese 2.0 measurements, Rapport 1220339-015-ZKS-0004, Deltares, Delt, 85 p.

Van Prooijen, B. C., Tissier, M. F. S., De Wit, F. P., Pearson, S. G., Brakenhoff, L.B., Van Maarseveen, M.C.G., Van der Vegt, M., Mol, J., Kok, F., Holzhauer, H., Van der Werf, J.J., Vermaas, T., Gawehn, M., Grasmeijer, B., Elias, E.P.L., Tonnon, P., Santinelli, G., Antolínez, J. A. A., De Vet, P. L. M., Reniers, A. J. H. M., Wang, Z. B., Den Heijer, C., Van Gelder-Maas, C., Wilmink, R. J. A., Schipper, C.A. en De Looft, H.

2020. Measurements of hydrodynamics, sediment, morphology and benthos on Ameland ebb-tidal delta and lower shoreface. Earth System Science Data. 12, 4, p. 2775-2786 12 p. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2775-2020>.

Verduin E., Olie, R., 2019, T-1 meting Benthos buitendelta Ameland Zeegat 2019, uitvoeringsplan voor veldwerkzaamheden, rapportage Eurofins AquaSense, 19 pp.

Verduin, E. C. en A. Engelberts, 2017. T-nulmeting Benthos buitendelta Ameland Zeegat 2017, Veldrapportage Benthos boxcorer. Eurofins AquaSense.

Kustgenese 2.0

Bak, J. (2017), Nourishment strategies for Ameland Inlet, Master's thesis, Delft University of Technology.

Elias, E.P.L., 2021. Morfologische analyse buitendelta Ameland en de rol van de pilotsuppletie. Deltares 11206794-004-ZKS-0006, 31 december 2021. 84 pag.

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Pearson, S., 2020b. Technisch advies Rol en Mogelijkheden Buitendelta's voor het Kustbeheer. Ten behoeve van beleidsadvies Kustgenese 2.0. Rapport 1220339-009-ZKS-0006, Deltares Delft, 32 p.

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., 2020a. Understanding the morphological processes at Ameland Inlet. Kustgenese 2.0 synthesis of the tidal inlet research, Report 1220339-008-ZKS-008, Deltares, Delft, 82 p.

Gawehn, M., 2020. Ontwikkeling en toepassing XBand radar voor morfologische analyses Ameland Zeegat, 1220339-007-ZKS-0005_v2.0- Deltares, Delft.

Gawehn, M., 2021. 11207653-002-ZKS -Verdere ontwikkeling X-Band radar voor morfologische analyses Ameland Zeegat 2020-21, Rapport Deltares 1220339-016-ZKS-0004, 31 pp.

Gawehn, M., 2021. Ontwikkeling en toepassing X-Band radar voor morfologische analyse van het Ameland Zeegat. Eindrapportage ten behoeve van Kustgenese 2.0. Deltares report 1220339-007-ZKS-005, Deltares, Delft, 25 pp.

Gawehn, M., van Dongeren, A., de Vries, S., Swinkels, C., Hoekstra, R., Aarninkhof, S., & Friedman, J., 2020. The application of a radar-based depth inversion method to monitor near-shore nourishments on an open sandy coast and an ebb-tidal delta. Coastal Engineering, 159.

Harlequin, D., 2021. Morphodynamic Modelling of the Ameland Ebb-Tidal Delta. An Assessment of the 2019 Pilot Nourishment. Delft University of Technology.

Lambregts P., 2021. Sediment bypassing at Ameland inlet. And the role of an ebb-tidal delta nourishment. Delft University of Technology.

Nederhoff, C.M., Schrijvershof, R., Tonnon, P.K., van der Werf, J.J., 2019. The Coastal Genesis II Terschelling - Ameland inlet (CGII-TA) model, Model setup, calibration and validation of a hydrodynamic-wave model. Rapport 1220339-008-ZKS-0004, Deltares, Delft, 88pp.

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.

Van Weerdenburg, R.J.A., Pearson, S., van Prooijen, B., Laan, S., Elias, E.P.L., Tonnon, P.K., Wang, Z.B., 2021. Field measurements and numerical modelling of wind-driven exchange flows in a tidal inlet system in the Dutch Wadden Sea. *Ocean & Coastal Management*, vol. 125, 10.1016/j.ocecoaman.2021.105941.

KPP B&O - Kust

Elias, E.P.L. & Tonnon, P.K., 2016. Beschrijving kennisbasis modellering van zeegaten t.b.v. Kustgenese 2. Report 1230381-000, Deltares, Delft. 66 pp.

Elias, E.P.L., 2017a. Stroming en sedimenttransport langs de Boschplaat op Terschelling. Rapport 11200878-000, Deltares, Delft, 60p.

Elias, E.P.L., 2017b Understanding the present day morphodynamics of Ameland inlet, Rapport 1220339-006-ZKS-0006, 46 p.

Elias, E.P.L., 2018. Understanding the present-day morphodynamics of Ameland Inlet – part 2. Kustgenese 2.0, product ZG-B04. Report 1220339-007-ZKS-0007, Deltares, Delft.

Elias, E. P. L., 2019. Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Deltares, 11203683-001-ZKS-0002, 83 pagina's.

Elias, E.P.L., 2020. De morfologische ontwikkeling van de Boschplaat – Terschelling, Rapport 11205236-003, Deltares, Delft., 49 p.

Elias, E.P.L., 2020. Systeemsuppleties op Eilandkoppen. Synthese, Rapport 11205236-005-ZKS-0009, Deltares Delft, 43p.

Elias, E.P.L., Pearson, S., Van der Spek, A.J.F., Pluis, S., 2022. Understanding meso-scale processes at a mixed-energy tidal inlet: Ameland Inlet, the Netherlands – implications for coastal maintenance. *Ocean & Coastal Zone Management* (accepted for publication)

Elias, E.P.L., Roelvink, F., Pearson, S., 2020. Systeemsuppleties op Eilandkoppen Modellering suppletievarianten Texel en Ameland, Rapport 11205236-005-ZKS-0006, Deltares, Delft, 202 p.

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.

SEAWAD onderzoek

Brakenhoff, L., G. Ruessink, and M. van der Vegt, 2019a. Characteristics of saw-tooth bars on the ebb-tidal deltas of the Wadden Islands, *Ocean Dynamics*, doi:10.1007/s10236-019-01315-w.

Brakenhoff, L., M. Kleinhans, G. Ruessink, and M. Vegt, 2019b. Spatio-temporal characteristics of small-scale wave-current ripples on the Ameland ebb-tidal delta, *Earth Surface Processes and Landforms*, doi:10.1002/esp.4802.

Brakenhoff, L., R. Schrijvershof, J. van der Werf, B. Grasmeijer, G. Ruessink, and M. van der Vegt, 2020a. From ripples to large-scale sand transport: The effects of bedform-related roughness on hydrodynamics and sediment transport patterns in delft3d, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 1–25, doi:10.3390/jmse8110892.

Brakenhoff, L. B., 2021. Bedforms and their effect on sediment transport on ebb-tidal deltas, Phd, Universiteit Utrecht.

De Wit, F. P., M. F. S. Tissier, S. G. Pearson, M. Radermacher, M. J. P. V. D. Ven, and A. P. V. Langevelde, 2018. Measuring the Spatial and Temporal Variability of Currents on Ameland Ebb-Tidal Delta, in *NCK Days 2018*, Haarlem.

De Wit, F. P., Tissier, M. and A. J. Reniers, 2019. Characterizing wave shape evolution on an ebb-tidal shoal, *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 1–20, doi: 10.3390/jmse7100367.

De Wit, F. P., M. Tissier, and A. Reniers, 2020. The relationship between sea-swell bound wave height and wave shape, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9), doi: 10.3390/JMSE8090643.

Holzhauser, H., Borsje, B.W., Herman, P.M.J., Schipper, C.A., Wijnberg, K.M., 2021. The geomorphology of an ebb-tidal-delta linked to benthic species distribution and functionality. *Ocean Coast Manag.*, 216 (2021), Article 105938, 10.1016/j.ocecoaman.2021.105938. ISSN 0964-5691.

Holzhauser, H., Borsje, B.W., Van Dalfsen, J. A., Wijnberg, K.M., Hulscher, S. J. en P. M. Herman, 2020. Benthic species distribution linked to morphological features of a barred coast. *Journal of marine science and engineering* 8: 16.

Pearson, S. G., Van Prooijen, B. C., De Wit, F. P., Meijer-Holzhauser, H., De Looft, H, and Z. B. Wang, 2019. Observations of Suspended Particle Size Distribution on an Energetic Ebb-Tidal Delta, *Coastal Sediments 2019*, pp. 1991–2003, doi: 10.1142 / 9789811204487_0172.

Pearson, S. G., Van Prooijen, B. C., Elias, E. P. L., Vitousek, S. and Z. B. Wang, 2020., *Sediment Connectivity: A Framework for Analyzing Coastal Sediment Transport Pathways*, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(10), doi:10.1029/2020JF005595.

Pearson, S. G., Van Prooijen, B. C., Poleykett, J., Wright, M., Black, K., and Z. B. Wang, 2021a. Tracking fluorescent and ferrimagnetic sediment tracers on an

energetic ebb-tidal delta to monitor grain size-selective dispersal, *Ocean & Coastal Management*, 212, 105,835, doi:10.1016/j.ocecoaman.2021.105835.

Pearson, S. G., Verney, R., Van Prooijen, B. C., Tran, D., Hendriks, E., Jacquet, M. and Z. B. Wang, 2021b. Characterizing Mixed Sand and Mud Suspensions using Combined Optical and Acoustic Measurements in Estuarine Environments, *Earth and Space Science Open Archive*, p. 36, doi:10.1002/essoar.10506576.1.

Pearson, S.G., Elias, E.P.L., Van Prooijen, B.C., Van der Vegt, H., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., 2022. A Novel Approach to Mapping Ebb-Tidal Delta Morphodynamics and Stratigraphy. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3943525> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3943525>

Ecologische rapportages

Botman, B. en Koolstra, B., 2022. Verwachte uitvoerbaarheid buitendeltasuppleties conform Wet natuurbescherming. Concept Memo, 1 december 2022.

Escaravage, V., 2022. Effecten van de zandsuppletie in het Amelanders Zeegat op de bodemdieren-gemeenschappen 2 en 4 jaar na aanleg. Wageningen Marine Research C050/21, december 2022. 61 pag.

Holzhauer, H., Borsje, B.W., Herman, P.M.J., Schipper, C.A., Wijnberg, K.M., 2021. The geomorphology of an ebb-tidal-delta linked to benthic species distribution and functionality. *Ocean Coast Manag.*, 216 (2021), Article 105938, 10.1016/j.ocecoaman.2021.105938. ISSN 0964-5691.

Holzhauer, H., Borsje, B.W., Van Dalen, J. A., Wijnberg, K.M., Hulscher, S. J. en P. M. Herman, 2020. Benthic species distribution linked to morphological features of a barred coast. *Journal of marine science and engineering* 8: 16.

Holzhauer, H., T. Vanagt, K. Lock, M. van Oeveren, K. de Backer, K. Hostens, J. Van Dalen en J. Reinders, 2014. Ecologische effecten suppletie Ameland 2009-2012. Interim rapportage ihkv KPP B&O Kust Ecologie. Deltares rapport: 211.

Leopold, M.F. en Baptist, M.J., 2016. De buitengewone biologie van de buitendelta's van de Nederlandse Waddenzee. Den Helder, IMARES Wageningen UR (University & Research centre), IMARES rapport C076/16. 28 p.

Röell K., 2021. Mapping the spatial and temporal variations in the hydrodynamics for ecological analysis on the Ameland ebb-tidal delta, the Netherlands. Utrecht Universiteit. 81pp.

Schellekens, T. en Verduin E., 2020. T-1 monitoring Amelanders Zeegat, Rapportage Benthos boxcorer. Eurofins AquaSense. 86 pp.

Schellekens, T., 2022. T-2 monitoring Amelanders Zeegat, Rapportage Benthos boxcorer, Versie 03_definitief, Eurofins Omegam B.V., 32 p.

Van den Bogaart, L., R. van Hal, M. van der Meijden, S. M. J. M. Brasseur, M. J. Baptist en J. Wijsman., 2019. De ecologie van het Amelanders Zeegat; Een inventarisatie naar

kennis over het ecologisch functioneren van het Amelanders Zeegat Wageningen Marine Research, C032/19, 61 pagina's.

Van Hal, R., 2017. Zandspiering in het Amelanders Zeegat. Wageningen Marine Research, rapport C102.17.

Van Hal, R., 2018. Zandspiering in het Amelanders Zeegat T0-meting voorjaar 2018 Wageningen Marine Research, rapport C091/18.

Van Hal, R. en J. Volwater, 2019. Zandspiering in het Amelanders Zeegat : T1-meting voorjaar 2019. Wageningen Marine Research, Wageningen Marine Research rapport C105/19, 33 pagina's.

Van Hal R., Volwater J., Aarts G., Brasseur S., Glorius S., 2021. Ecologische effecten van een pilotsuppletie in het Amelanders Zeegat: Synthese van onderzoeksresultaten en literatuur. Wageningen Marine Research, C004/21, 108.

Verduin, E. en Leewis L., 2018. T-nulmeting Benthos buitendelta Amelanders Zeegat 2017. Rapportage Benthos boxcorer. Eurofins AquaSense, 49 pp.

Wijnhoven, S., 2021. Korte-termijn-effecten pilotsuppletie Amelanders Zeegat. Analyse ontwikkeling benthische habitats met behulp van de BISI. Ecoauthor Report Series 2021 - 01, Heinkenszand, the Netherlands.