

Kustfundamentsuppleties op eilandkoppen

Een inventarisatie van 4 mogelijke locaties.



Kustfundamentsuppleties op eilandkoppen

Een inventarisatie van 4 mogelijke locaties.

Auteur(s)

Edwin Elias

Kustfundamentsuppleties op eilandkoppen

Een inventarisatie van 4 mogelijke locaties.


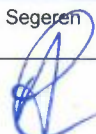
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Ir. S. Pluis
Referenties	
Trefwoorden	Morfodynamica, Kustfundamentsuppleties, Beheer & Onderhoud kust

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	04-02-2020
Projectnummer	11205236-005
Document ID	-
Pagina's	43
Status	Definitief

Auteurs(s)

	Edwin Elias	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Edwin Elias	Bart Grasmeyer	Toon Segeren	
				

Samenvatting

Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor het landelijke programma Kustlijn­zorg. Op eilandkoppen waar door geulwerking de BasisKustLijn (BKL) onderhouden dient te worden, wordt op dit moment gekozen de erosie toe te staan of te beperken door regelmatige, kleinschalige, strandsuppleties. Ten behoeve van een duurzame manier van het handhaven van de BKL wil Rijkswaterstaat een nieuwe variant onderzoeken, namelijk geulbeïnvloeding. Ter afweging en voorbereiding van een eventuele pilotsuppletie, wil Rijkswaterstaat daarom samen met Deltares kennis opbouwen op het onderwerp geulbeïnvloeding. Na een eerste inventarisatie zijn vier potentiële locaties geïdentificeerd waar geulbeïnvloeding mogelijk toegepast kan worden. Deze locaties zijn (1) Bollen van de Ooster (Goeree), (2) het Molengat (Texel), (3) Oostgat (Ameland noordwest) en (4) Plaatgat bij Schiermonnikoog. Op basis van een literatuurstudie geeft deze rapportage inzicht in de morfologische ontwikkelingen, de onderliggende processen en eventuele overeenkomsten en verschillen in deze processen tussen de 4 locaties.

Ieder van deze 4 deelgebieden heeft unieke kenmerken en uitdagingen. De Bollen van de Ooster wijkt af van de andere 3 deelgebieden omdat we hier kijken naar het opruimen van een voormalige buitendelta. Het kustdwarse getij, door de in- en uitstroming van het getij het bekken in, ontbreekt. De erosieproblematiek is hier dan ook gerelateerd aan de lokale beïnvloeding van de stroming en transporten.

De kustlijnen van ZW Texel, NW Ameland en NW Schiermonnikoog hebben overeenkomstig dat ze onderdeel vormen van een actief zeegat systeem. De processen onderliggend aan de erosie van ZW Texel zijn wel wezenlijk anders dan die van de andere 2 zeegaten. Het Molengat bij Texel is een vloedgeul die rechtstreeks aantakt op de circulatie van het Zeegat. De stromingen in deze geul worden dan ook gedreven door zowel het getij door het zeegat alsmede het noordzeegetij. Hierdoor ontstaan zeer diepe geulen, die veel dieper zijn dan de kustzone. Het Oostgat bij Ameland en Plaatgat bij Schiermonnikoog zijn geen duidelijke stroomvoerende geulen. Deze geulen vormen eigenlijk door vorming van banken en geven geen verdieping ten opzichte van het kustprofiel.

In het verleden was het gedrag van de kop van Texel misschien wel beter te vergelijken met dat van Ameland. Ook bij Texel vonden er wel grootschalige plaataanlandingen plaats die dan de eilandkop voeden. Dit gedrag heeft zich echter sinds de vorming van het Molengat (na afsluiting van de Zuiderzee) niet meer vertoont. De ontwikkeling van de kop van Ameland en de kop van Schiermonnikoog vertonen in essentie een gelijkwaardig beeld. Toevoer van zand is periodiek door het aanlanden van grote hoeveelheden zand aan vanaf de buitendelta. Afhankelijk van de balans tussen plaataanlanding en erosieprocessen kan de eilandkop groeien of krimpen. In een volledig natuurlijk systeem kunnen de eilanden zich zo handhaven. Dit handhaven gaat dan wel vaak gepaard met migraties en grootschalige heroriëntaties van geulen en platen in het zeegat. Deze grootschalige veranderingen zijn in de Waddenzee eigenlijk maar beperkt mogelijk. De processen onderliggend aan de erosie kunnen hier dan ook niet makkelijk worden weggenomen. Wel kan de erosie worden gemitigeerd. Dit kan direct door het aanbrengen van reguliere (of vergrote) strandvooroever­suppleties op de locatie van de erosie. Ook kan hier worden nagedacht over het toepassen van slim gekozen systeem­suppleties op de buitendelta waardoor een “semi-natuurlijk” proces van plaataanlandingen kan worden gestimuleerd.

Over Deltares

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme innovaties, oplossingen en toepassingen voor mens, milieu en maatschappij. We richten ons voornamelijk op delta's, kustregio's en riviergebieden. Omdat het beheer van deze dichtbevolkte en kwetsbare gebieden complex is, werken we nauw samen met overheden, ondernemingen, kennisinstellingen en universiteiten in binnen- en buitenland. Ons motto is 'Enabling Delta Life'.

Als toegepast kennisinstituut zijn we succesvol wanneer onze kennis wordt verzilverd in en voor de samenleving. We stellen hoge eisen aan de kwaliteit van onze kennis en adviezen, rekening houdend met nieuwe wetenschappelijke inzichten, maar ook met de gevolgen die onze adviezen hebben voor milieu en samenleving.

Al onze opdrachten en projecten leveren een bijdrage aan het verstevigen van de kennisbasis. We kijken vanuit een lange termijn perspectief, naar bijdragen voor de oplossingen voor nu. Wij hechten zeer aan openheid en transparantie. Die houding is onder meer terug te zien in het vrij toegankelijk maken van de door Deltares ontwikkelde software en modellen. Open source werkt, is onze vaste overtuiging. Deltares heeft ruim 800 medewerkers en is gevestigd in Delft en Utrecht.

www.deltares.nl

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Opzet van de studie	8
1.3	Leeswijzer	8
2	Bollen van de Ooster (Goeree)	9
2.1	Beschrijving van het studiegebied en de grootschalige morfologische veranderingen	9
2.2	Conceptuele beschrijving van de dominante processen	10
3	Molengat (Zeegat van Texel).	12
3.1	Beschrijving van het studiegebied en de grootschalige morfologische veranderingen	12
3.2	Conceptuele beschrijving van de dominante processen	13
4	Oostgat (Ameland Noordwest)	16
4.1	Beschrijving van het studiegebied en de grootschalige morfologische veranderingen	16
4.2	Conceptuele beschrijving van de dominante processen	17
5	Plaatgat (Schiermonnikoog)	19
5.1	Beschrijving van het studiegebied en de grootschalige morfologische veranderingen	19
5.2	Conceptuele beschrijving van de dominante processen	20
6	Samenvatting en synthese	22
7	Referenties	24
A	Bollen van de Ooster	25
A.1	Grootschalige morfologische ontwikkeling	25
A.2	Analyse van de morfologische veranderingen van de kustlijn	26
B	Molengat	28
B.1	Grootschalige morfologische ontwikkelingen	28
B.2	Analyse van de morfologische veranderingen van de kustlijn	29
C	Oostgat	32
C.1	Grootschalige morfologische ontwikkelingen	32
C.2	Analyse van de morfologische veranderingen van de kustlijn	33
D	Plaatgat	40
D.1	Grootschalige ontwikkeling	40
D.2	Analyse van de morfologische veranderingen van de kustlijn	41

1 Introductie

1.1 Aanleiding

Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor het landelijke programma Kustlijn­zorg. Kustlijn­zorg heeft tot doel: de duurzame instandhouding van het areaal en de functies aanwezig langs de kust. Dit wordt gedaan door middel van het suppleren van de (Noordzee)kust met zand om zo structurele kusterosie tegen te gaan. Op eilandkoppen waar door geulwerking de BasisKustLijn (BKL) onderhouden dient te worden, wordt op dit moment gekozen de erosie toe te staan of te beperken door regelmatige, kleinschalige, strandsuppleties. Ten behoeve van een duurzamere manier van het handhaven van de BKL wil Rijkswaterstaat een nieuwe variant onderzoeken, namelijk geulbeïnvloeding. Na een eerste inventarisatie zijn vier potentiële locaties geïdentificeerd waar geulbeïnvloeding mogelijk toegepast kan worden. Deze locaties zijn (1) Bollen van de Ooster (Goeree), (2) het Molengat (Texel), (3) Oostgat (Ameland noordwest) en (4) Plaatgat bij Schiermonnikoog (zie ook Figuur 1.1). Op deze locaties vindt structurele erosie plaats en wordt er regelmatig gesuppleerd (op Schiermonnikoog na) om de BKL in stand te houden.



Figuur A.1 Een overzicht van de vier onderzoekslocaties waar geulbeïnvloeding mogelijk zou kunnen zijn.

Rijkswaterstaat heeft behoefte aan meer kennis om een alternatieve suppletie methode zoals geulbeïnvloeding te kunnen ontwerpen en uitvoeren. Ter afweging en voorbereiding van een eventuele pilotsuppletie, wil Rijkswaterstaat daarom samen met Deltares kennis opbouwen op het onderwerp geulbeïnvloeding. Het onderzoek weergegeven in dit rapport moet leiden tot:

1. Identificatie van 1 a 2 kansrijke locaties en komen tot gedragen oplossingsrichtingen (suppletieontwerpen) voor de toepassing van geulbeïnvloeding t.b.v. BKL-onderhoud.
2. Inzicht in de hydraulische en morfologische effecten van geulbeïnvloeding met een doorvertaling naar de impact op (grootschalige) morfologie, de relevante kustindicators en de bijbehorende risico's van ingrepen in en rondom geulen.

1.2 Opzet van de studie

Het onderzoek waarvan deze studie deel uitmaakt bestaat uit 4 stappen. In de eerste twee stappen worden de meest geschikte suppletie locatie(s) als volgt geïdentificeerd:

Stap 1; Analyse van de processen (bestaande literatuur) van de 4 projectlocaties.

Deze analyse geeft inzicht in de onderliggende processen en eventuele overeenkomsten en verschillen in deze processen tussen de 4 locaties.

Stap 2; Expertsessie met experts van Rijkswaterstaat en Deltares.

Deze sessie heeft als doel te komen tot een gezamenlijke onderbouwing en keuze voor:

- a. Indicatieve suppletieontwerpen per kustfundamentlocatie (inclusief indicatieve suppletievolumes) t.b.v. BKL-onderhoud.
- b. Opstellen van te toetsen hypothesen per kustfundamentlocatie.

In **Stap 3 en 4** worden één of twee geschikte locaties verder uitgewerkt. Hiervoor zal Rijkswaterstaat een keuze maken in welke locatie(s) nader worden uitgewerkt en hier ook suppletieontwerpen voor aanleveren (Stap 3). Deze dienen als basis voor een verdere analyse van de effecten op de processen (Stap 4). Deze analyses worden uitgevoerd op basis van expert-judgement (data) en op basis van morfostatische modelsimulaties (Delft3D model).

De evaluatie van de morfologische effecten van de suppletie omvatten analyses van:

- a. Ontwikkeling grootschalige morfologie
 - i. Rol van golven / golfwerking
 - ii. Hydraulische en morfologische effecten van geulbeïnvloeding op een termijn van 1 – 10 jaar per kustfundamentlocatie.
 1. Morfologisch optimaal ontwerp (zo lang mogelijk levensduur)
 2. Risico's en neveneffecten per suppletieontwerp en locatie
- b. Kustindicatoren, middels:
 - i. Dwarsprofielen / kustprofielen (Jarkus)
 - ii. Erosietrends langs de kust [in m/j] (resultatentabellen uit MorphAn)
 - iii. Bathymetrie
 - iv. Kustlijnen (MKL)
 - v. Strandbreedte droog en nat (per raai en kustvak)

1.3 Leeswijzer

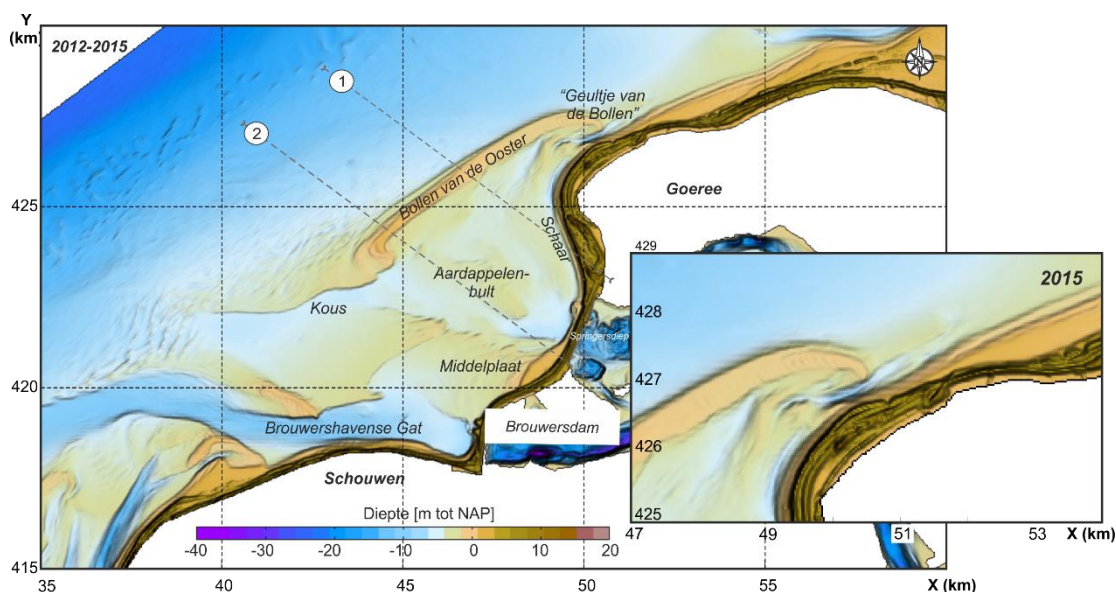
Het voorliggende rapport beschrijft de resultaten van stap 1. In vier hoofdstukken (H2 – H5) worden de deelgebieden nader uitgewerkt (H2. Bollen van de Ooster / Goeree, H3. Molengat / ZW Texel, H4. Oostgat / Ameland NW en H5. Plaatgat / Schiermonnikoog. Ieder hoofdstuk bestaat uit (1) een algemene grootschalige beschrijving van het systeem aan de hand van de meest recente dieptemeting en een beknopte beschrijving van de vorming van deze bodem, en (2) een conceptuele beschrijving of samenvatting van het huidige gedrag en waar mogelijk onderliggende processen. Voor ieder deelgebied is er in de Appendix een gedetailleerde beschrijving van de kustlijnligging toegevoegd. Deze beschrijving in combinatie met de resultaten van een literatuurstudie geven de achtergrond bij de conceptuele modellen. In het afsluitende Hoofdstuk 6 vatten we de inzichten van deze studie samen.

2 Bollen van de Ooster (Goeree)

Een uitgebreide analyse van de processen rond de Bollen van de Ooster is al gemaakt in de studie van Elias (2015). In deze studie zijn morfologische analyses van de bodem data uitgevoerd en zijn er morfostatische modelsimulaties gemaakt met Delft3D. De resultaten hiervan hebben voor een beter begrip van de onderliggende processen gezorgd. Onderstaande beschrijving is grotendeels gebaseerd op deze analyse en waar nodig aangevuld met recente inzichten. De figuren zijn waar mogelijk geactualiseerd met de meest recente data. Vaklodgingen recenter dan 2015 zijn hier helaas niet beschikbaar.

2.1 Beschrijving van het studiegebied en de grootschalige morfologische veranderingen

De Bollen van de Ooster is een zandbank in de Grevelingenmondning (Figuur A.1). De Grevelingenmondning ligt ingeklemd tussen de eilandkoppen van Goeree en Schouwen. De ontwikkeling van de Grevelingenmondning vertoont grote overeenkomsten met de naastliggende Haringvlietmondning. Beide gebieden zijn veranderd van een actieve naar een passieve buitendelta; een ondiep platen-geulen gebied waar sediment (landwaarts) wordt herverdeeld (Elias, 2015; Elias et. al., 2017).



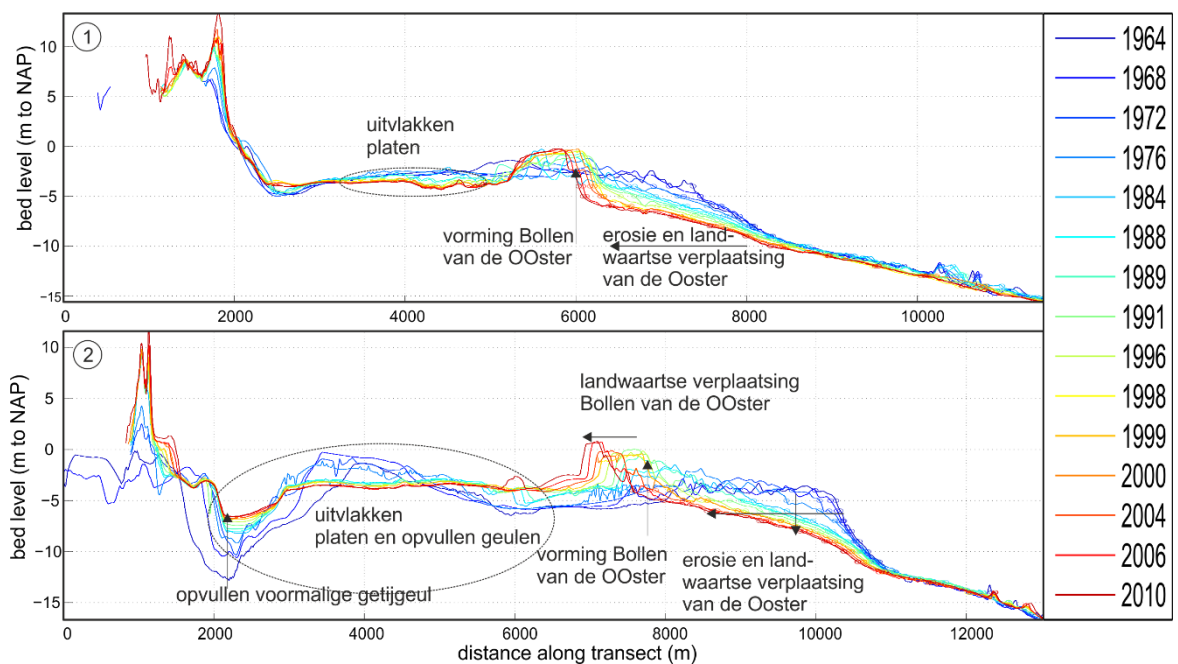
Figuur A.1 (links) Een overzicht van de geulen en platen in de Grevelingenmondning op basis van de samengestelde 2012/2015 dieptemetingen en een detailweergave (2015) van de kop van de Bollen van de Ooster (rechts).

De Bollen van de Ooster heeft zich na afsluiting van het Grevelingen estuarium (in 1971) ontwikkeld tot een hoge, langgerekte plaat (of spit) met een zuidwest-noordoost oriëntatie (zie Appendix A, Figuur A.1). Ingeklemd tussen deze plaat en de kust van Goeree ligt een kleine geul Schaar. Ook vinden we hier de ondiepe plaatgebieden Middelplaat en Aardappelenbult. De voormalige hoofdgeul Kous/Springersdiep is vrijwel geheel opgevuld met sediment. Alleen in het zuiden, langs de kust van Schouwen, is er nog een diepere getijgeul: het Brouwershavense Gat. Eigenlijk is Schaar geen doorgaande geul. Rond de kop van de Bollen van de Ooster is er een overgangsgedebied tussen het zeewaartse en landwaartse deel van Schaar. Hier bevinden zich meerdere kleinere geulen gescheiden door ondiepe ruggen. Met name het geultje dat zich rond de kop van de Bollen van de

Ooster heeft gevormd ("Geultje van de Bollen") zorgt lokaal voor veel erosie van de achterliggende kust van Goeree.

Vorming en groei van de Bollen van de Ooster.

De vorming en groei van de Bollen van de Ooster wordt in detail weergegeven in de studie van Elias et. al. (2017). Uit deze studie volgt dat na de voltooiing van de Brouwersdam in 1971 grootschalige veranderingen hebben plaatsgevonden. Vooral de voormalige plaat Ooster erodeert sterk aan de noordwestzijde door golfwerking en het verlies van getij gedreven sedimentaanvoer. Het sediment wordt landwaarts verplaatst waardoor de Bollen van de Ooster met ZW-NO oriëntatie vormt. De vorming van deze bank is duidelijk te volgen in Figuur A.2 aan de hand van 2 representatieve profielen. In profiel 1 verplaatst de -5 m contour bijna 1.5 km landwaarts in de periode 1964-2010. De bollen van de Ooster nemen daarbij in hoogte toe tot ongeveer 0 m NAP. In doorsnede 2 zijn de verschillen nog groter. De -5 m contour verschuift 2.5 km landwaarts en de Bollen van de Ooster hebben hier een hoogte van 0.8 m. Het heeft tot 1999 geduurd voor een rechte, vrijwel continue ononderbroken bank werd gevormd (Appendix A, Figuur A.1). Deze bank was in 1999 nog breed (zo'n 500 m). Sindsdien is de hoogte verder toegenomen, maar is de breedte afgenomen. Elias en van Der Spek (2016) laten zien dat het zandvolume aan de zeezijde van de plaat Ooster met -63 miljoen m³ in sediment is afgenomen.



Figuur A.2 Vorming van de Bollen van de Ooster (zie Figuur 2.1 voor locatie van de profielen).

2.2 Conceptuele beschrijving van de dominante processen

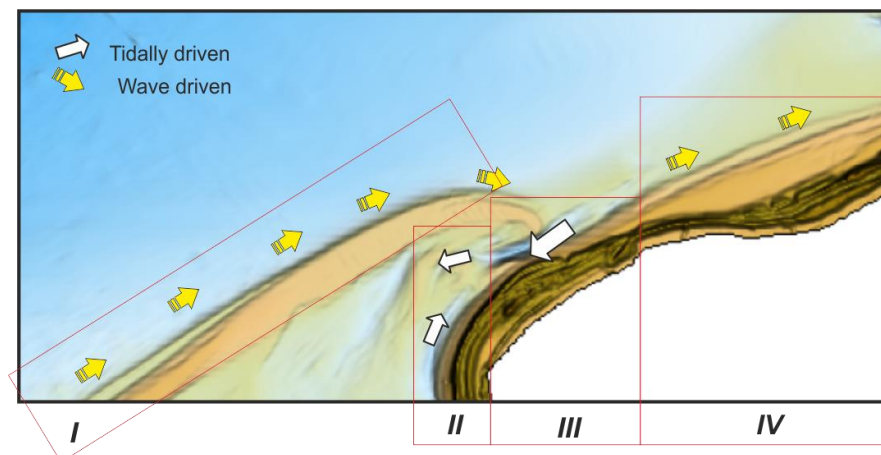
Een conceptuele beschrijving van de processen wordt weergegeven in Figuur A.1. Dit conceptuele model is gebaseerd op inzichten verkregen vanuit de literatuur en aangevuld met een beknopte analyse van het huidige gedrag. Deze analyse is gegeven in Appendix A.2.

Het conceptuele model verdeelt het gebied in 4 deelgebieden ingedeeld op basis van de onderliggende processen. **(I)** De Bollen van de Ooster. Hier overheerst een noordoostelijk (golfgedreven) transport langs de rand van deze plaat. Deze transporten zorgen voor een noordoostelijke uitbouw van de Bollen van de Ooster. Ter plaatse van de kop van de Bollen is er dan een discontinuïteit **(III)**. Hier overheersen de getijstromingen die tussen de kop van de Bollen en de kust worden geperst. Hierdoor nemen de stromingen sterk toe en ontstaat er een geultje. De stromingen in dit geultje zijn sterk genoeg om het NW landwaartse verplaatsing van de bollen te

reduceren en het sediment kustlangs af te voeren. Dit geeft een aanzanding van de kust ten noorden van de Bollen (IV).

Deelgebieden II en III zijn getij-gedomineerd. De Bollen van de Ooster scherm deze kustzone af van grote golfaanval, waardoor de golven langs de kust beperkt zijn. Deze kleine golven spelen echter nog steeds een belangrijke rol voor de kusterosie. Door deze golfjes wordt sediment omgewoeld, dat efficiënt door de voorliggende geul (Schaar) kan worden afgevoerd (II). De voormalige geulen op de buitendelta zijn effectieve putten voor sediment dus kan er relatief veel zandverlies optreden. Er is wel veel afvoer, maar weinig toevoer. De stromingen in deze geul zijn getij gedomineerd. In deelgebied (III) zijn getijstromingen ook dominant maar het proces verschilt van dat in deelgebied (II). Door het landwaarts verplaatsen van de Bollen van de Ooster worden de getijstromingen tussen de Bollen en de kust gedrukt. De modelresultaten gepresenteerd in Elias (2015) laten zien dat juist tijdens afgaand getij op zee, hoge zuidwaarts gerichte stroomsnelheden langs de kust van Goeree ontstaan. Deze stromingen worden samengeknepen en versnellen tussen de Bollen van de Ooster en de kust. Deze stromingen verklaren de aanwezigheid van de geul die zich aan de kop van de Bollen van de Ooster heeft gevormd. Dit geultje heeft eigenlijk geen samenhang met de Schaar, maar ontstaat vooral door contractie van de getijstrooming vanaf de Noordzee. Het gedrag van het geultje wordt bepaald door de aanvoer van zand door golven en de afvoer door getij. Zolang er voldoende getijstrooming door het geultje gevoerd kan worden zal het geultje in stand gehouden worden. Het Geultje van de Bollen beweegt mee met de verplaatsing van de kop van de Bollen van de Ooster. De relatief hoge stroomsnelheden dragen ook bij tot het zeewaarts houden van de Bollen. Zonder deze stroming zouden de Bollen van de Ooster wel al tegen de kust zijn gedrukt. Het erosiegebied dat samenhangt met de geul en stromingen verplaatst zich dus ook langzaam noordwaarts.

Deze noordwaartse verplaatsing heeft er inmiddels voor gezorgd dat er geen doorgaande geul met Schaar gevormd wordt, maar er een ondiep gebied ontstaat in de luwte van de bollen. In dit gebied ontstaan kleinere elkaar ontwijkende eb- en vloedgeultjes. De vorming van zo'n geultje dicht langs de kust veroorzaakt ook hier erosie van de kustlijn. In de meest recente bodem lijkt de spit te zijn doorgebroken ongeveer ter hoogte van het blok II. Hoe dit precies de Kop van de Bollen beïnvloedt is verder niet onderzocht.

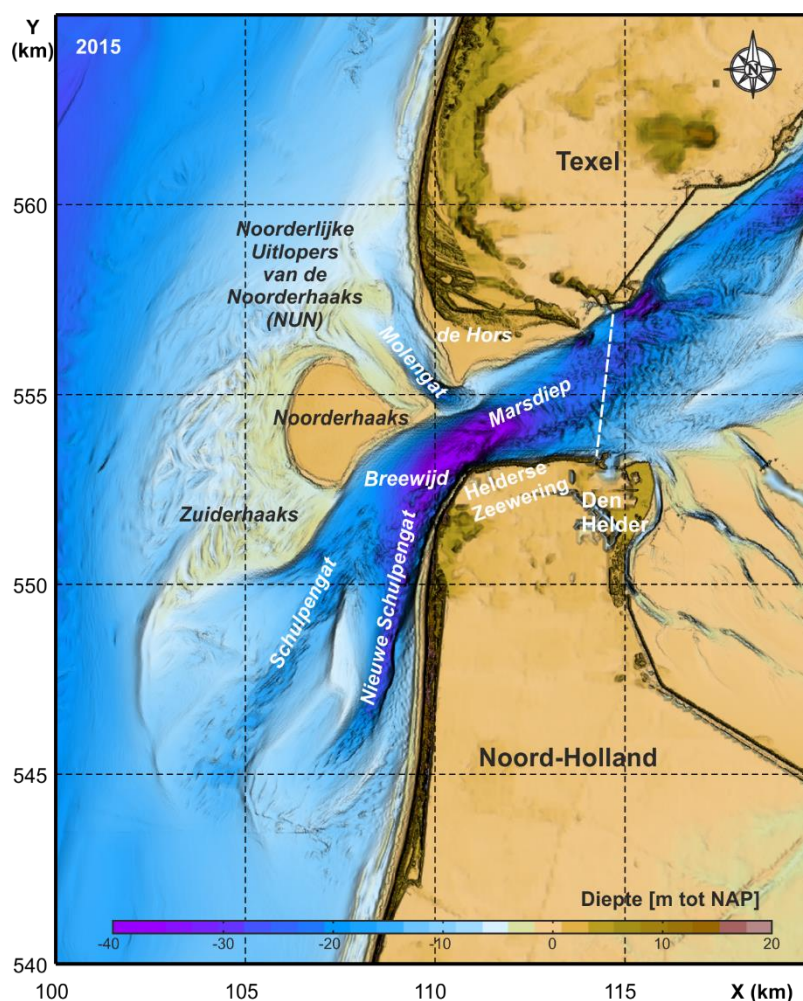


Figuur A.1 Conceptuele weergave van de processen rond de Bollen van de Ooster.

3 Molengat (Zeegat van Texel).

In het kader van het Kust*2000 programma is er veel onderzoek uitgevoerd naar de problematiek van de zuidwestkust van Texel. Het werk van Cleveringa (2001) "Zand voor zuidwest Texel" vat de resultaten van deze studies samen en vertaalt deze in een advies voor het toekomstig beheer. In dit advies geeft Cleveringa een viertal beheeralternatieven voor een duurzame bestrijding van de erosieproblematiek van de zuidwestkust van Texel, afgezet tegen het huidige beheer van zand suppleren. Hierbij is grootschalige geulbeïnvloeding al uitvoerig bekeken. Recentelijk heeft Elias (2016) een verkenning uitgevoerd van de morfologische effecten van een suppletie rond paal 10. Deze studie vormt de basis voor onderstaande beschouwing.

3.1 Beschrijving van het studiegebied en de grootschalige morfologische veranderingen



Figuur A.1 Een overzicht van de geulen en platen op de buitendelta van het Zeegat van Texel.

Figuur 3.1 geeft een beeld van de buitendelta en de keel van het Zeegat van Texel. In de keel van het zeegat ligt de geul Marsdiep. Een belangrijk element is hier ook de Helderse Zeewering. Deze zeewering stabiliseert de zuidelijke oever van het zeegat, de kop van Noord-Holland. Versnelling van de stroming om de noordwestelijke punt van deze Zeewering heeft de geul lokaal uitgeschuurd

tot dieptes van meer dan 50 m. De putop het diepste punt wordt de Helsdeur genoemd. Ten zuiden van de Helderse zeevering wordt de kust verder beschermd door strandhoofden.

Het Marsdiep verbindt de hoofdgeulen in het bekken via het Breewijd met de hoofdgeulen op de buitendelta: Schulpengat en Nieuwe Schulpengat. Aan de noordzijde, tussen de Noorderhaaks en het eiland Texel, bevindt zich de vloedgedomineerde geul Molengat. De buitendelta strekt zich ongeveer 10 km zeewaarts en 25 km kustlangs uit. De ongeveer 4 km² grootte ondiepte Noorderhaaks vormt het middelpunt van de buitendelta, waarvan de oostzijde zich tijdens normale omstandigheden boven water bevindt (de Razende Bol). Aan de noordkant bevindt zich een langgerekte spit: de Noorderlijke Uitlopers van de Noorderhaaks (*NUN*). Tussen de *NUN* en de kust van Texel ligt de vloedgedomineerde geul Molengat. In het verleden was het opdringen (landwaarts verplaatsen) van het Molengat een belangrijke reden waarom er grote zandverliezen in dit kustvak plaatsvonden (Cleveringa, 2001; Elias, 2006).

De grootschalige morfologische ontwikkelingen in het zeegat van Texel zijn in detail beschreven in Elias en van der Spek (2006, 2017). Na afsluiting van de Zuiderzee in 1932 hebben de geulen zich in een periode van ca. 40 jaar geheroriënteerd en in een periode van ca. 60 jaar werd een maximale geullengte bereikt. Sindsdien is er eigenlijk een hele stabiele configuratie van geulen en platen aanwezig (zie Appendix B, Figuur B.1 en B.2). Desalniettemin vinden er nog wel grootschalige volumeveranderingen plaats en treden er langs de aanliggende kusten significante zandverlies op. Samenvattend zijn de belangrijkste kenmerken van de huidige buitendelta-veranderingen:

1. Sedimentverlies van de westzijde van de Noorderhaaks en aangroei landwaarts.
2. Uitbouw van de Zuiderhaaks.
3. Erosie van de kust door aanwezigheid van diepe geulen.
4. Landwaartse verplaatsing banken en geulen in de uitloop van het Nieuwe Schulpengat.
5. Grootschalige (vorm) verandering aan de noord(oost) zijde van de Noorderhaaks, het aangrenzende Molengat en op de Hors.

De effecten van de buitendelta-veranderingen op de kustlijn worden beschreven in Appendix B.2 aan de hand van de Jarkus-metingen over de periode 1965 – 2019.

3.2 Conceptuele beschrijving van de dominante processen

De beschrijving van het conceptuele model van de *NUN* bestaat uit 2 delen. Ten eerste introduceren we het conceptuele model van Cleveringa (2001). Dit is weergegeven in Figuur 3.2 deelfiguur (a). In het model van Cleveringa (2001) worden een viertal gebieden met verschillend gedrag en onderliggende processen. Het model van Cleveringa beschrijft de processen zoals die optreden voor 2000, maar op hoofdlijnen zal dit model ook voor de huidige situatie wel geldig zijn. Voor de volledigheid wordt het model hier kort beschreven.

(1). Druk op de kust door het Molengat

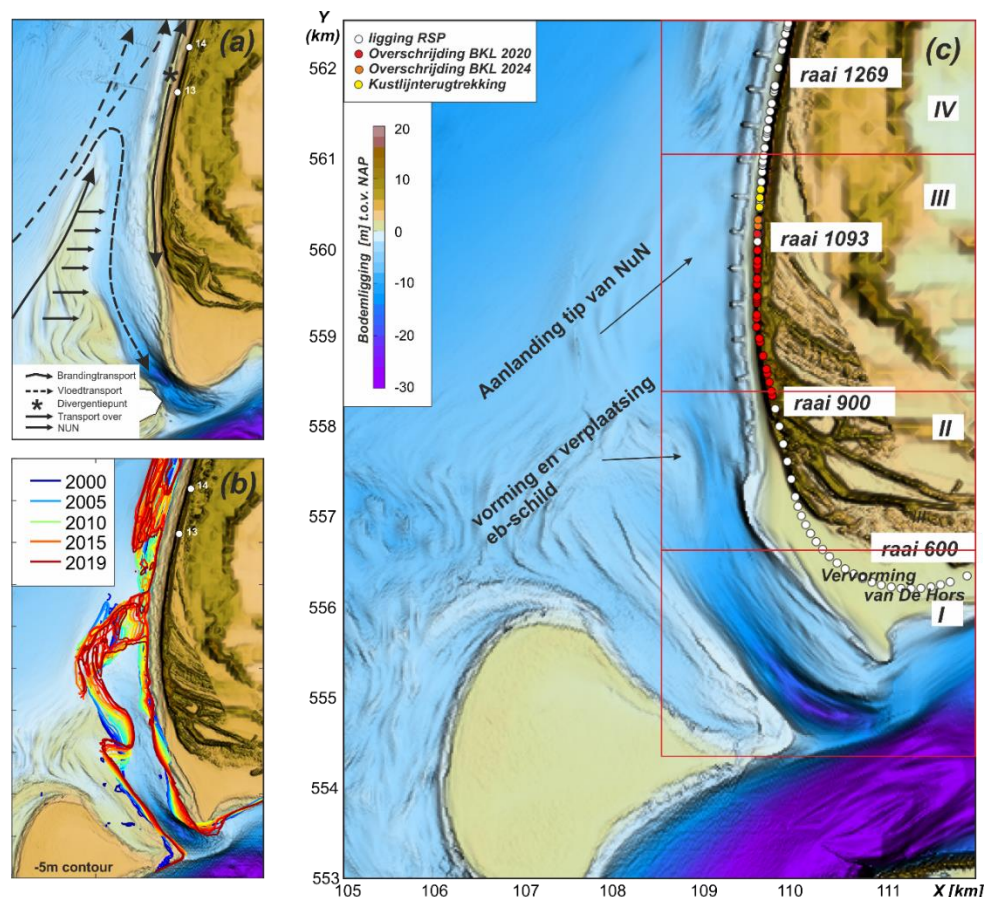
In eerdere onderzoeken naar de oorzaken van de erosieproblemen bij zuidwest Texel is er altijd vanuit gegaan dat de druk van het Molengat op de kust een zeer belangrijke rol speelt. Deze druk is niet het gevolg is van de doorgaande zandtransporten door het getij maar wordt veroorzaakt door zandtransport door golven en de vloedstroom die de gehele geul vanaf de Noordelijke uitlopers naar de kust van Texel doet verplaatsen.

(2). Golfgedreven zandtransport naar het noorden én het zuiden.

Langs de kust van zuidwest Texel vindt golfgedreven zandtransport plaats. De richting van dit transport wordt bepaald door de richting van de golven ten opzichte van de kustlijn die op zijn beurt wordt bepaald door de golfrichting op de Noordzee en de afbuiging van golven als ze zich voortplanten over de ondieptes zoals de Noordelijke uitlopers van de Noorderhaaks. De kustlijn van zuidwest Texel is bol. De combinatie van afbuiging van golven over de buitendelta met de bolle

kustlijn van zuidwest Texel levert gemiddeld over het jaar zandtransport naar het noorden ten noorden van strandpaal 13 tot 14 en naar het zuiden ten zuiden van strandpaal 13 tot 14 (Steijn en Jeuken, 2000). Van strandpaal 13 tot 14 ligt dus een splitsingspunt of divergentiepunt in het brandingstransport. De consequentie van een dergelijk divergentiepunt is dat er rond dit gebied alleen zand verdwijnt met het brandingstransport en er niets wordt aangevoerd. Met andere woorden, er vindt bij het divergentiepunt erosie plaats. De ligging van het divergentiepunt is mede afhankelijk van de afbuiging van de golven over de Noordelijke uitlopers. Met de uitbouw van de Noordelijke uitlopers naar het noorden is ook het divergentiepunt naar het noorden opgeschoven.

Zeewaarts van zuidwest Texel vindt langs de Noordelijke uitlopers van de Noorderhaaks brandingstransport naar het noorden plaats. Ook vindt over de Noordelijke uitlopers zandtransport plaats door de getijdestromingen. Het netto resultaat van het brandings- en getijdetransport over de Noordelijke uitlopers is zandtransport naar het noorden. Dit noordwaartse zandtransport leidt tot doorgaande uitbouw in noordelijke richting, langs de kust van Texel. Hoewel dit zandtransport naar de kust van zuidwest Texel is gericht, komt het zand niet ten goede aan de eilandkust. Het Molengat scheidt de noordelijke uitlopers van de kustlijn en voorkomt transport van zand naar de kust.



Figuur A.1 Conceptueel sedimenttransport model van de kust van zuidwest Texel. (a) “Historische ontwikkeling” gebaseerd op Cleveringa (2001). (b). Samenvatting van de huidige ontwikkelingen op basis van de -5m contour over de periode 2000-2019 en (c) Conceptuele beschrijving van de veranderingen voor het huidige gedrag. Let op: Figuur a heeft de 2001 bodem als achtergrond. Deze bodem is nog representatief voor het model van Cleveringa. Figuren b en c hebben de meest recente (2015 bodem als achtergrond).

(3). Zandtransport naar het noorden en het zuiden door een stuwpunt in de vloedstroom.

In het Molengat loopt de stroming met vloed naar het zuidoosten in de richting van de Waddenzee. Langs de buitendelta en langs de eilandkust is de vloedstroom naar het noorden gericht. Ter hoogte van strandpaal 11 verdwijnt een deel van de vloedstroom het Molengat in en stroomt de rest door

langs de eilandkust. Rond strandpaal 11 ligt dus een splitsingspunt in de vloedstroom (Steijn en Jeuken, 2000). Ten zuiden van dit splitsingspunt, of "stuwpunt" wordt zand door de getijdestromingen naar het zuidoosten getransporteerd en ten noorden wordt zand langs de kust naar het noorden getransporteerd. Rond strandpaal 11 wordt dus alleen zand afgevoerd door de vloedstroom, er vindt geen aanvoer plaats. Er vindt bij strandpaal 11 dus erosie plaats door de vloedstroom. Dit stuwpunt in de vloedstroom ligt iets ten zuiden van het divergentiepunt in het brandingstransport. Overigens gebeurt tijdens eb het omgekeerde, er bevindt zich dan een punt waar de ebstroom naar het noorden uit het Molengat de ebstroom naar het zuiden langs de eilandkust tegenkomt, ter hoogte van strandpaal 12. Bij dit convergentiepunt wordt door de ebstroom zand aangevoerd en dit leidt waarschijnlijk tot sedimentatie. Er vindt in het gebied van strandpaal 11 tot 14 dus erosie plaats door het brandingstransport en is ook een mogelijke erosie door de vloedstroom, hoewel niet duidelijk hoe die zich verhoudt tot de sedimentatie door de ebstroom.

Een aanvullend begrip van het systeem kan worden verkregen uit het werk van Elias (2006, Hoofdstuk 5 en 6). In deze studie wordt een uitgebreide beschrijving gegeven van de vorming van het Molengat en de NUN en de onderliggende maatgevende processen. Sedimenten worden zowel vanaf de zeezijde alsmede door de geul Molengat naar de NUN gevoerd. In de geul zijn deze transporten vooral getijgedreven. Langs de kust overheersen de vloed (naar het zeegat toe) gedomineerde transporten, terwijl langs de NUN de ebdominante (zee- en noordwaarts gerichte) transporten overheersen. Het is waarschijnlijk dat deze ebdominante transporten een belangrijke rol spelen in de stabiliteit van de NUN en het Molengat. Deze transporten verhinderen landwaartse verplaatsing van de spit onder invloed van golven, door het noordwaarts verplaatsen van het opgewoelde sediment. De stabiliteit van geul en spit geven aan dat hier een balans tussen landwaarts en noordwaarts transport bestaat. Modelsimulaties laten zien dat tijdens stormen de landwaartse transporten overheersen over de getijgedreven langstransporten, terwijl gedurende kalme omstandigheden dit omgedraaid is. De getijgedreven transporten geven dan een zeewaartse uitbouw van de spit.

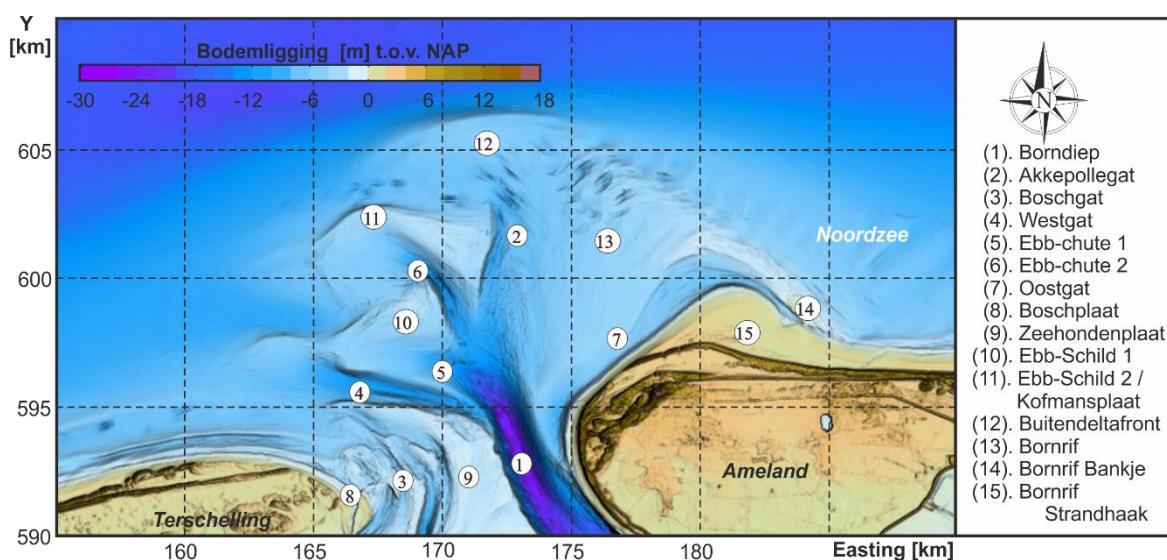
De studie van Elias en Van der Spek (2017) geeft een verdere beschouwing van het recente gedrag. Dit is samengevat in Appendix B.2 en weergegeven in Figuur 3.2c. Het model van Cleveringa (2001) is in de basis ook op de huidige situatie toepasbaar. Wel zien we een paar duidelijke verschillen, waardoor lokaal de kustlijn zich anders vervormt dan vroeger. Zo zien we dat de druk op de kust door het Molengat nu niet meer plaatsvindt. Het diepe deel van Molengat is juist sterk aan het invullen. De afgenomen dominantie van Molengat zorgt er vervolgens voor dat de steile geulwand niet gehandhaafd kan worden en de aanliggende (ondiepe) kustzone trekt vervolgens snel terug door verflauwing van de geulwand (Figuur 3.2c, **gebied I**). Dit geeft een grootschalige vervorming van De Hors. Aangrenzend aan dit gebied van erosie, vinden we lokaal een sterke kustvoortuitgang (**gebied II**). Het voorliggende eb-schild bouwt hier sterk uit. Lokaal ontstaat hier een vernauwing waardoor er een geul met steile geulwanden ontstaat. Deze verstelling is in de kustzone te zien als een voortuitgang van de kustlijn. **Gebied III** beschrijft het aanlandingsgebied van de NUN. De aanlanding van de NUN gaat tot nu toe niet gepaard met het direct verhelen van banken (zoals bijv. de Bornrif strandhaak). De NUN neemt eigenlijk langzaam af in diepte en verheelt op een diepte van ongeveer -5 m met de kustlijn. Dit zorgt er voor dat er een ondiepe zone / platform ontstaat en er waarschijnlijk een doorgaande brandingsstroom vanaf de NUN richting de kust van Texel ontstaat. Deze transporten zijn niet voldoende om de grootschalige erosie te compenseren. **Gebied IV** beschrijft het gebied ten noorden van de buitendelta waar structurele erosie van de kust optreedt. Hier heeft zich weer een bank gevormd.

4 Oostgat (Ameland Noordwest)

Ameland Noordwest kent een lange historie van aanlanden en verspreiden van grote zandvolumes vanuit de buitendelta (Elias et al., 2019). In principe is er hier een overvloed aan sediment in het systeem, maar toch vertonen gedeelten van de achterliggende kustlijn van Ameland Noordwest structurele erosie en zijn er frequent zandsuppleties nodig.

4.1 Beschrijving van het studiegebied en de grootschalige morfologische veranderingen

Figuur A.1 geeft een overzicht van de belangrijkste geulen en platen op de buitendelta van het Amelander Zeegat aan de hand van de 2017 bodem. Deze bodem vertoont een duidelijke hoofdgeul aan de oostzijde, langs de westkust van Ameland (het Borndiep [1]). Het Borndiep gaat op de buitendelta over in het Akkepollegat [2]. Aan de westzijde, langs de Boschplaat, bevindt zich een kleinere geul Westgat [4]. De eilandstaart van Terschelling wordt Boschplaat [8] genoemd. Tussen de Boschplaat en het Borndiep bevindt zich een ondiep gebied waarin diverse kleinere geulen zichtbaar zijn. De omvang van deze geulen varieert door de tijd. Als er een duidelijke geul vormt dan ontstaat er een verbinding tussen de geulen in het bekken en het Westgat. Deze verbinding is in het verleden vaak Boschgat [3] genoemd. Richting het bekken bevindt zich nog een wat hoger plaatoppervlakte (de zeehondenplaat [9]).



Figuur A.1 Een overzicht van de geulen en platen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland (boven) en een beschrijving van de dominante morfologische kenmerken (2016 bodem).

Op de buitendelta bevinden zich 3 duidelijke platen. De grootste plaat, Bornrif [13], ligt oostelijk van het Akkepollegat. Als onderdeel van de “sediment-bypassing cycle” vormen er zich periodiek kleinere platen op het Bornrif. Een voorbeeld hiervan is het Bornrif Bankje [14] dat in 2016 al bijna een verbinding heeft gevormd met de kust van Ameland. Deze verbinding bevindt zich iets ten oosten van de vorige plaat-aanlanding, de Bornrif Strandhaak [15], die rond 1986 verbinding vond met de kust. Aan de westzijde van de buitendelta op de Kofmansbult hebben zich recent verschillende eb-schild en eb-chute (“geultje”) systemen gevormd [5,10; 6,11].

De grootschalige morfologische ontwikkelingen in het Amelander zeegat zijn in detail beschreven in Elias et al. (2019). Deze studie laat zien dat het model van “Cyclische Morfologische Ontwikkeling” zoals neergezet door Israël en Dunsbergen (1999) niet geheel lijkt te kloppen. Kijken we naar de

morfologie over de afgelopen 10 jaar (Appendix C, Figuur C.1), dan zien we grootschalig een zelfde beeld met een enkele hoofdgeul aan de oostzijde (Borndiep) en een dominant plaatoppervlak aan de oostzijde van deze geul. Op kleinere schaal zijn er wel grote veranderingen in geulen en vooral platen te observeren.

Periodiek is er door het aanlanden van zandbanken sprake van (veel) zanduitwisseling met de kust van Ameland. Een voorbeeld hiervan is de vorming en aanlanding van het 'oude' Bornrif (de Bornrif Strandhaak). De uitstulping van de kust waar de Bornrif strandhaak is aangeland is nog duidelijk te zien langs de kust van Ameland [15]. Dit aanlanden van banken vindt periodiek plaats. Initieel geeft de aanlanding een grote, bijna instantane, zeewaartse sprong van de kustlijn Deze uitgebouwde kust trekt zich vervolgens weer snel terug, zoals duidelijk te zien is in de periode 1989-1995 (zie Appendix C, Figuur C.2). De strandhaak zelf ontwikkelt zich als een halve cirkel. Op een tijdschaal van decennia zorgt de aanlanding van platen voor een netto uitbouw van dit kustvak. Vlak voor de punt van de strandhaak ontwikkelt zich wel een geultje dat hier lokaal zeer grote erosie van de kust veroorzaakt. Tussen de aangelande 'strandhaak Bornrif' en het huidige Bornrif is een verdieping te zien. Deze verdieping wordt ook wel het Oostgat [7] genoemd. Tussen de strandhaak en het Borndiep ligt het Oostgat dicht op de kust en vertoont het ondiepe kustprofiel een structurele terugtrekking.

Een uitwerking van het recente gedrag van de kustlijn van noordwest Ameland wordt gegeven in Appendix C.2 en vormt de basis van het conceptuele model dat in volgende paragraaf verder is uitgewerkt.

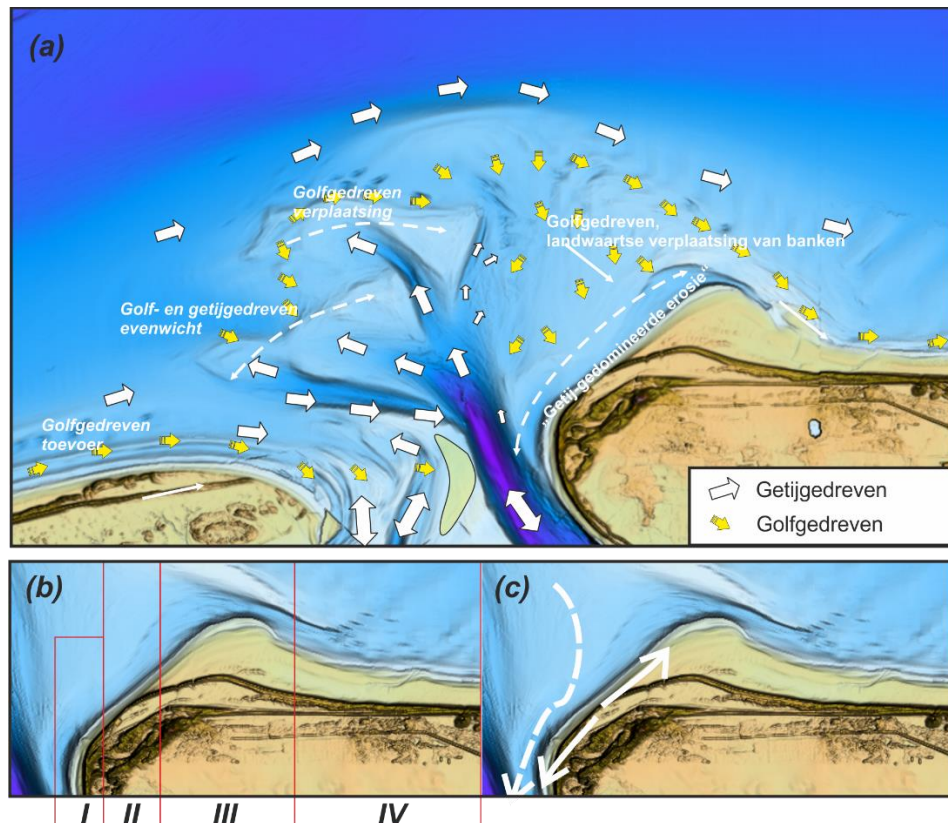
4.2 Conceptuele beschrijving van de dominante processen

Een conceptuele beschrijving van de processen wordt weergegeven in Figuur A.1. Deelfiguur (a) geeft hier een beschrijving van de processen op de gehele buitendelta (gebaseerd op Elias, 2018). Van direct belang voor NW Ameland zijn de processen op het Bornrif en de interactie hiervan met de kustlijn. Grootschalig worden de zandtransporten op het Bornrif landwaarts gedreven door golven. Hierdoor wordt de landwaartse zijde van het Bornrif, voorliggend aan de kust ondieper. Direct langs de kust overheersen de "getijgedomineerde" sediment verliezen. Getijgedomineerd staat hier tussen aanhalingstekens, omdat juist de combinatie van getij en golven belangrijk is. Golven zorgen voor de aanvoer en opwoeling van het sediment, maar het getij zorgt ervoor dat deze efficiënt worden afgevoerd.

Kijken we in detail naar de eilandkop van Ameland NW (deelfiguren b en c), dan kunnen we ook hier onderscheid maken in 4 deelgebieden: (I eilandkop, II centrale kust en het III westelijke en IV oostelijke deel van het aanlandingsgebied Bornrif). Deelgebieden III en IV beschrijven het aanlandingsgebied waar banken vanaf de buitendelta verhelen met de kust. Tijdens verheling vindt hier een zeewaartse sprong van de kustlijn plaats. Na verheling wordt dit zand voornamelijk oostwaarts verspreid. Dit heeft tot gevolg dat er in **deelgebied III** grote erosie optreedt en in **deelgebied IV** aanzanding plaatsvindt. Contractie van de getijstrooming rond de kop van de strandhaak veroorzaakt hier grote snelheden. Deze grote snelheden zorgen er ook voor dat het Bornrif Bankje oostwaarts geduwd wordt en aan de westelijke zijde van de Bornrif Strandhaak verheelt. Dit patroon verplaatst zich met de vervorming van de aangelande bank oostwaarts.

Voor Ameland NW (**gebied I en II**) is deze aanlanding minder van belang. Sinds aanlanding van het Bornrif (rond 1985) wordt dit gebied gekenmerkt door een structureel smalle kustzone die gevoelig is voor erosie. De erosiesnelheden zijn hier veel kleiner dan op de kop van de Bornrif Strandhaak, maar doordat de kustzone small is, geeft dit wel direct terugtrekking van de kustlijn. Het voorliggende Bornrif is vrij diep waardoor golven nog steeds een belangrijke rol spelen in de sedimenttransportprocessen. De buitendelta beschermt de kust wel tegen de grote golven, die breken op het front van de buitendelta, maar kleinere golven zorgen hier nog steeds voor kustlijnerosie. Door de voorliggende ondiepte ontstaan er dan complexe golfpatronen langs de kust

met lokale convergentie en divergentiepunten. Een divergentiepunt in de brandingstransporten kan de erosie lokaal nog versterken (zie Nederhoff et al., 2016).



Figuur A.1 (a) Conceptuele weergave van de processen (onderliggende bodem is van 2019) waarbij witte pijlen de richting van de getijgedreven transporten illustreren en de gele pijlen de golfgedomineerde bijdragen. (b) Indeling van Ameland NW in 4 gebieden met verschillend morfologisch gedrag en (c) weergave van de processen die Ameland NW beïnvloeden. Golven veroorzaken een convergentie punt in de sedimenttransporten (getrokken pijlen). Over het Bornrif platform staat een netto landwaarts gericht transport (gearcheerde pijl) richting de kust en uiteindelijk naar het Borndiep.

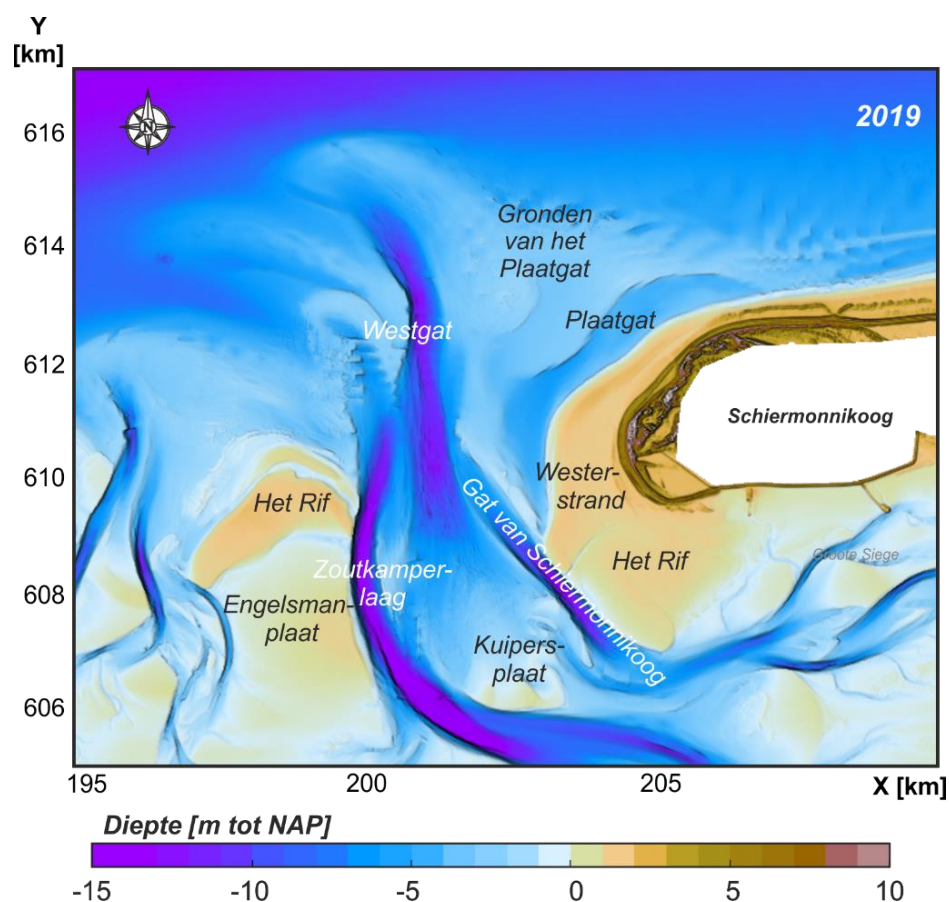
Zowel langs de kop van Ameland (overgang Borndiep – Oostgat) als rond de Bornrif Strandhaak vindt contractie van de stroming plaats waardoor de getijstrooming hier lokaal sterk toeneemt en er een verdieping ontstaat. Deze twee verdiepingen vormen eigenlijk de basis van het Oostgat. In het centrale gedeelte (gebied II) is er eigenlijk geen duidelijke geul te onderscheiden. Ook modelsimulaties van de stroming laten hier geen kenmerken van een stroomvoerende geul zien. De stroming gebruikt eigenlijk het gehele Bornrif platform. Tijdens vloed concentreert de stroming wel rond de punt van Ameland waardoor er grote transporten optreden richting het Borndiep. Tijdens eb vindt er slechts een beperkt transport plaats vanuit het Borndiep naar Ameland NW. Het meeste sediment wordt via het Akkepollegat, Westgat en de eb-chutes op het westelijke deel van de buitendelta getransporteerd. Voor Ameland NW geeft dit een netto verlies en structurele kustlijnerosie; de verliezen richting het zeegat worden niet gecompenseerd door voeding vanaf het zeegat, terwijl de aanvoer vanaf de buitendelta oostelijk plaatsvindt (gebied III en IV). Deze structurele verliezen zullen plaatsvinden tot de configuratie van het Bornrif zich weer gunstiger ontwikkelt. Als voorbeeld hiervan zou de bodem van 1989 kunnen dienen (Appendix C, Figuur C.1). Toen lag er juist een ondiepte voor de gehele kustzone (incl. Ameland NW). Deze ondiepte beschermt tegen golfaanval en kan bij gunstige aanlanding de kust weer sterk uitbouwen. Op korte termijn zal dit niet optreden, wel is er al een duidelijke opbouw van het voorliggende Bornrif zichtbaar (zie Appendix C, Figuur C.4, profiel 220 en 280), waardoor het wat verder in de toekomst wel weer zou kunnen plaatsvinden.

5 Plaatgat (Schiermonnikoog)

Tot een jaar of 10 geleden vond er veel sedimentaanwas op de kust van Schiermonnikoog plaats. Tussen 1982 en 1991 zijn er grote zandvolumes aangeland. Dit laatste was waarschijnlijk een respons op de afsluiting van de Lauwerszee, waardoor er grote veranderingen in het bekken optraden. Echter, over de laatste 10 jaar is er veel erosie aan de NW zijde van het eiland opgetreden.

5.1 Beschrijving van het studiegebied en de grootschalige morfologische veranderingen

Figuur 5.1 geeft een overzicht van de belangrijkste geulen en platen op de buitendelta van het Friesche Zeegat. De Engelsmanplaat, waarvan het zeewaartse deel Het Rif wordt genoemd, vormt een scheiding tussen het westelijke geulenstelsel Pinkegat en de oostelijk gelegen Zoutkamperlaag. Op de buitendelta van de Zoutkamperlaag, bevinden zich de geul Westgat en Plaatgat gescheiden door het bankengebied Gronden van het Plaatgat. In het bekken maakt de Zoutkamperlaag een bocht naar het oosten toe en gaat dan over in Oort en splitst vervolgens in de geulen Groningerbalg en Vierhuizengat. Direct langs de kust van Schiermonnikoog bevindt zich het geulenstelsel Gat van Schiermonnikoog en Groote Siege. Aan de westzijde van het eiland Schiermonnikoog bevindt zich een grote strandvlakte het Westerstrand met aan de zuidzijde hiervan Het Rif (van Schiermonnikoog).

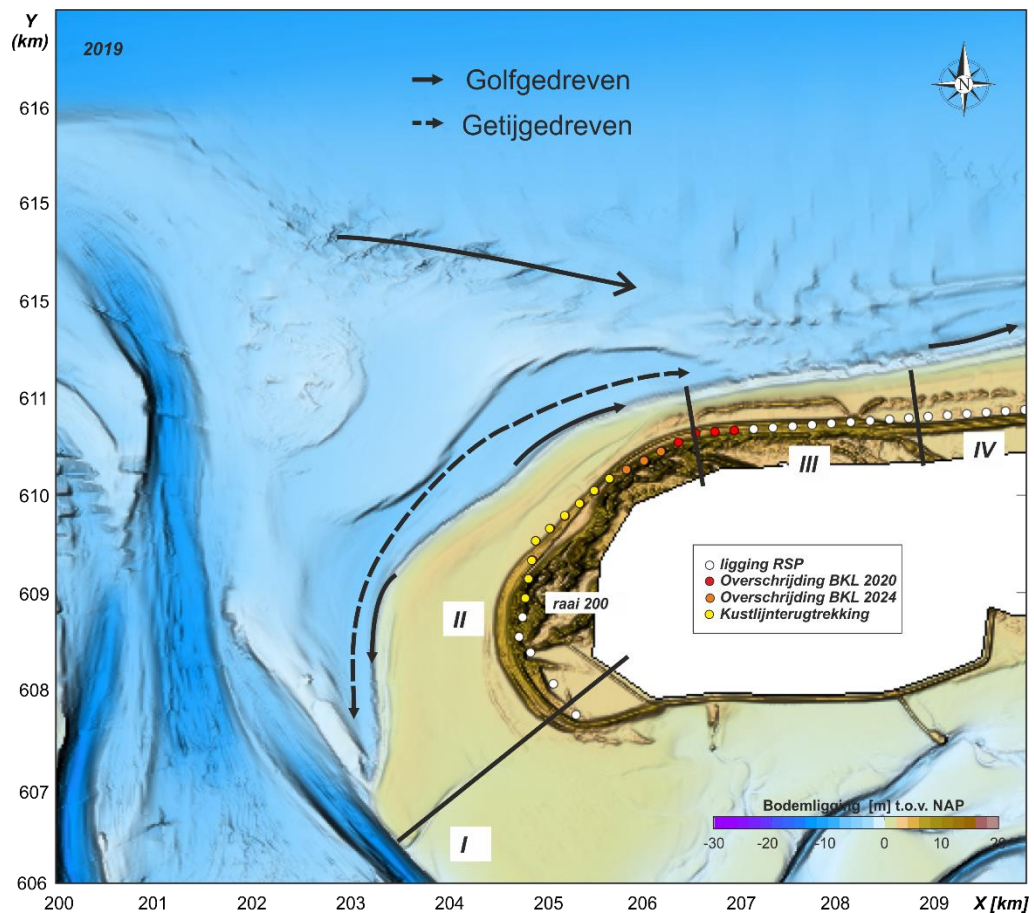


Figuur A.1 Een overzicht van de geulen en platen van de Zoutkamperlaag. Onderliggende bodem is gebaseerd op de 2019 dieptemeting.

Voor een goed begrip van de morfologische ontwikkelingen en dominante processen is het belangrijk te vermelden dat de afsluiting van de Lauwerzee (nu Lauwersmeer) in 1969 een grote invloed heeft gehad op het bekken en op de buitendelta (zie o.a. Oost, 1995). De afsluiting verkleinde de bekkenoppervlakte met ongeveer 30%, waardoor het getijprisma reduceerde van 306 miljoen m³ naar 200 miljoen m³. Deze grote afname in getijprisma was mede verantwoordelijk voor de morfologische veranderingen; het zeegat tracht een nieuw morfologisch evenwicht te vormen met het verkleinde prisma. Door de gereduceerde getijstromingen kon de omvang en de vorm van de oorspronkelijke buitendelta niet worden behouden. Door de afname van de zeewaarts gerichte getij-gedreven transporten overheerst nu de landwaarts gerichte component door de golven. Het sediment aan de buitenkant van de buitendelta wordt hierdoor landwaarts herverdeeld en een grote, haakvormige, bank wordt gevormd (1971-1981). Een soortgelijke vorming van hoge, smalle banken ten gevolge van plotselinge veranderingen in forcering is ook waargenomen na afsluiting van de Grevelingen en het Haringvliet. Het haakvormige bankencomplex blijft lange tijd aanwezig (1987 - 1991), maar uiteindelijk land de bank aan op Schiermonnikoog en word dan snel opgenomen in het kuststelsel (1994-2005). Na 2005 is de bank vrijwel niet meer terug te zien in de bodemkaarten (zie Appendix D, Figuur D.1 en D.2).

5.2 Conceptuele beschrijving van de dominante processen

Een conceptuele beschrijving van de processen wordt weergegeven in Figuur A.1. Op basis van de kustlijnontwikkeling (zie Appendix D.3) kunnen we ook hier 4 verschillende gebieden met uniek gedrag onderscheiden.



Figuur A.1 Conceptuele weergave van de processen rond de kop van Schiermonnikoog (met onderliggende 2019 bodem).

Zone I; landwaarts van de eilandkop. In dit gebied overheerst de groei en verlenging van de geul Gat van Schiermonnikoog. Dit gaat gepaard met toenemende diepte. De migratie van de geul bepaalt dan ook het gedrag van de aanliggende kust/plaat.

Zone II; de eilandkop. Dit is een gebied waar een grote plaataanlanding heeft plaatsgevonden. Rond 1990 als gevolg van het oprollen van het eb-schild na afsluiting van de Lauwerszee. Na aanlanding volgt nu een periode van herverdeling van zand. De getijstroming door het voorliggende Plaatgat kan effectief zand verspreiden tijdens eb en vloed. Maar toevoer op het "bolle gedeelte" van de kust is beperkt.

Zone III; overgangsgebied van eilandkop naar eilandkust.

Tussen de kop van het eiland en de ongestoorde eilandkust bevindt zich nog een relatief recht stuk kust waar nog wel invloed van de buitendelta te zien is. De buitendelta vormt hier nog een langgerekte bank zeewaarts van de kust. Tussen deze bank en de kust bevindt zich het Plaatgat. Golfbreking op het zeewaartse bankje van de Gronden van het Plaatgat geeft een landwaarts en oostwaarts transport. Het bankje migreert landwaarts en verkleint daarmee het tussenliggende geultje. Dit geultje vernauwt maar verplaatst ook landwaarts, wat hier een erosieve druk op de aanliggende kust geeft. Het opdringen van de geul zorgt dus voor een erosie van de kust, maar beperkt ook de toevoer van zand. De golfgedreven transporten domineren het bankje maar kunnen door de geul de kust niet bereiken. De transporten worden kustlangs afgevoerd, waardoor het bankje in oostelijke richting verlengt. Hierdoor is het transport van zand richting de kust van Schiermonnikoog beperkt en is er geen opbouwend mechanisme voor de kust, waardoor de kusterosie groot is.

Zone IV; eilandkust.

Oostelijk van de buitendelta breken de golven wel rechtstreeks op de kust. Hier dragen deze golven dus wel bij aan de opbouw van de kust. Bij continue forcering en processen zal de kust een evenwicht bereiken tussen de toevoer en afvoer van het sediment.

6 Samenvatting en synthese

In deze studie zijn 4 gebieden in detail geanalyseerd. Ieder van deze gebieden heeft unieke kenmerken en uitdagingen. De Bollen van de Ooster wijkt af van de andere 3 deelgebieden omdat we hier kijken naar het opruimen van een buitendelta. Het kustdwarse getij, door de in- en uitstroming van het getij het bekken in, ontbreekt. De erosieproblematiek is hier dan ook gerelateerd aan de lokale beïnvloeding van de stroming en transporten. De Bollen van de Ooster speelt hierin een tweeledige rol. Ten eerste breken de golven op de bank. Hierdoor ontstaat een brandingsstroom en -transport langs de bank richting de kust. Deze transporten verlengen de bank in noordoostelijke richting en dragen vooral bij aan de voeding van de kust ten noorden van de bank. Ter plaatse van de kop van de Bollen van de Ooster is er een lokale erosie 'hotspot' door contractie van de eb- en vloedstroming in de voormalige Grevelingenmonding tussen de kop van de Bollen van de Ooster en de kust van Goeree door het Geultje van de Bollen. Hier kan worden gekeken naar lokale maatregelen om deze erosiedruk weg te nemen.

De kustlijnen van ZW Texel, NW Ameland en NW Schiermonnikoog hebben overeenkomstig dat ze onderdeel vormen van een actief zeegat systeem. De processen onderliggend aan de erosie van ZW Texel zijn wel wezenlijk anders dan die van de andere 2 zeegaten. Een echt verschil is hierin de oriëntatie van de aanliggende eilandkust. Het eiland Texel heeft van zichzelf een bolle vorm. Door deze bolle vorm zal er altijd een erosieve trend langs het eiland blijven optreden. Gedeeltelijk is deze erosiedruk gecompenseerd door het aanbrengen van strandhoofden. Een tweede verschil is de karakteristiek van de tussenliggende geul. Het Molengat bij Texel is een vloedgeul die rechtstreeks aantakt op de circulatie van het Zeegat. De stromingen in deze geul worden dan ook gedreven door zowel het getij door het zeegat alsmede het noordzeegetij. Hierdoor ontstaan zeer diepe geulen, die veel dieper zijn dan de kustzone. Het Oostgat bij Ameland en Plaatgat bij Schiermonnikoog zijn geen duidelijke stroomvoerende geulen. Deze geulen vormen eigenlijk door vorming van banken en geven geen verdieping ten opzichte van het kustprofiel.

In het verleden was het gedrag van de kop van Texel misschien wel beter te vergelijken met dat van Ameland. Ook bij Texel vonden er wel grootschalige plaataanlandingen plaats die dan de eilandkop voeden (zie bijv. Elias 2006, H2, voor een detailbeschrijving van de aanlanding van de plaat Onrust). Hierdoor kon de zandvoorraad van het eiland behouden blijven. Deze plaataanlandingen zijn niet meer opgetreden na afsluiting van de Zuiderzee (1932). Sinds 1932 vindt er juist veel zandverlies richting het bekken plaats (Elias et al., 2012). Op de eilandkop spelen naast de structureel erosieve trend nog een aantal lokale, aanvullende beïnvloedingen plaats die de erosie hier versterken. Deze lokale erosie wordt direct of indirect gestuurd door het voorliggende Molengat en de NUN. In het verleden was het landwaarts verplaatsen van de NUN en het Molengat een directe oorzaak van de erosie van de kustlijn. Dit verplaatsen lijkt nu minder van belang. De getijvoerende functie van het Molengat lijkt te zijn afgenomen, waardoor de diepe geul met steile geulwanden niet kan worden gehandhaafd. Het opvullen van de geul en verflauwen van de geulwand geeft vooral veel erosie van de Hors. Daarnaast ontwikkelt zich iets noordelijker, op de NUN, een groot eb-schild. Deze bank beïnvloedt lokaal de stroming, waardoor er versterkte erosie kan plaatsvinden. Deze lokale erosie hotspots kunnen worden gemitigeerd of zelfs weggenomen door slim gekozen systeemsuppleties. Het oplossen van de structurele erosie van Texel vergt altijd een strategie waarbij er voldoende sedimentaanbod is. Dit kan worden gewaarborgd door een continuering van de huidige suppletiestrategie of door grootschalige systeemsuppleties.

De ontwikkeling van de kop van Ameland en de kop van Schiermonnikoog vertonen in essentie een gelijkwaardig beeld. Per definitie is een bolle eilandkop eroderend. Het getij zal, zowel tijdens eb als tijdens vloed, als een rasp, zand wegschuren en afvoeren om het bolle gedeelte af te vlakken. Toevoer van zand is periodiek door het aanlanden van grote hoeveelheden zand aan vanaf de

buitendelta (bijv. de aanlanding van de strandhaak van Ameland). Dan hebben we een relatief korte periode van grote groei. Het herverdelen van dit zand geeft dan op het aanlandingspunt een lange periode van erosie. Terwijl in de aanliggende gebieden er dan juist een toevloed van sediment is, waardoor gebieden van erosie en aanzanding elkaar afwisselen. Deze gebieden migreren met toenemende mate van verheling met de kust. Afhankelijk van de balans tussen plaataanlanding en erosieprocessen kan de eilandkop groeien of krimpen. Als de frequentie van aanlanden hoger is dan de erosie in de tussenliggende periode is er groei en omgedraaid bij een te lage aanlandingsfrequentie is er krimp. In een volledig natuurlijk systeem kunnen de eilanden zich zo handhaven. Dit handhaven gaat dan wel vaak gepaard met migraties en grootschalige heroriëntaties van geulen en platen in het zeegat. Deze grootschalige veranderingen zijn in de Waddenzee eigenlijk maar beperkt mogelijk. Zo is het Borndiep gestabiliseerd door de aanliggende zeewering. Hierdoor wordt dit natuurlijk handhavingsproces van de eilanden verstoord. De processen onderliggend aan de erosie kunnen hier dan ook niet makkelijk worden weggenomen. Wel kan de erosie worden gemitigeerd. Dit kan direct door het aanbrengen van reguliere (of vergrote) strand- vooroeversuppleties op de locatie van de erosie. Ook kan hier worden nagedacht over het toepassen van slim gekozen systeemsuppleties op de buitendelta waardoor een “semi-natuurlijk” proces van plaataanlandingen kan worden gestimuleerd.

Het gedrag van de buitendelta bij de Kop van Schiermonnikoog wijkt in één opzicht duidelijk af dan dat bij Ameland. Eenmalig vond hier juist een herverdeling van zand plaats na afsluiting van de Lauwerszee. Na afsluiting ontstond een zandoverschot op de buitendelta. De buitendelta bevatte teveel zand om in stand gehouden te worden door de gereduceerde getijstromingen. Het overtollige zand werd daarbij landwaarts getransporteerd en zorgde eenmalig voor een grote kustuitbouw. Eigenlijk is dit proces heel vergelijkbaar met de vorming van de Bollen van de Ooster. Na deze eenmalige herverdeling zijn de huidige processen dan wel vergelijkbaar met die van Ameland.

7 Referenties

Cleveringa, J., 2001. Zand voor zuidwest Texel. Technisch advies RIKZ over vier mogelijke ingrepen in het Zeegat van Texel. Report RIKZ/OS/2001/031 (in Dutch). RWS RIKZ, (The Hague): 59 pp.

Elias (2006). Morphodynamics of Texel Inlet. Proefschrift TU Delft.

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F. (2006). Long-term morphodynamic evolution of Texel Inlet and its ebb-tidal delta (The Netherlands). *Marine Geology*, 225, 5-21.

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Wang Z.B. and de Ronde, J. (2012). Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences, Geologie en Mijnbouw*, 91–3: 293-310.

Elias, E.P.L. (2015). Verkenning morfologische effecten (geulwand)suppletie Bollen van de Ooster. Rapport 122049-006, Deltares, Delft.

Elias, E.P.L. (2016). Verkenning morfologische effecten suppletie Paal10 (Texel). Rapport 1220040-006, Deltares, Delft.

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F. (2017). Dynamic preservation of Texel Inlet, the Netherlands: understanding the interaction of an ebb-tidal delta with its adjacent coast. *Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw*, 96-4, pp: 293-317.

Elias, E., Van der Spek, A., & Lazar, M. (2017). The 'Voordelta', the contiguous ebb-tidal deltas in the SW Netherlands: Large-scale morphological changes and sediment budget 1965–2013; impacts of large-scale engineering. *Netherlands Journal of Geosciences*, 96(3), 233-259.

Elias, E.P.L. (2018). Understanding the present-day morphodynamics of Ameland Inlet. A Kustgenese 2.0 project. Rapport 1220339-004-ZKS-0004, Deltares, Delft.

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S.G., Cleveringa, J., (2019). Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology*, 415; DOI:[10.1016/j.margeo.2019.06.001](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.06.001).

Israël, C.G., Dunsbergen, D.W., 1999. Cyclic morphological development of the Ameland Inlet. The Netherlands. *Proc. of Symp. on River, Coastal and Est. Morphodynamics*, Genova, 2, 705–714.

Van der Lugt, M., Vermaas, T., van der Spek, (2018). Regionaal advies Schiermonnikoog Noordwest, Powerpoint presentatie, Deltares, Delft.

Nederhoff, K., Elias, E.P.L., Vermaas, T (2016). Erosie op Ameland Noordwest. Modelstudie: simulaties met Delft3D en XBeach. Rapport 1503-0080, Deltares, Delft.

Oost, A.P. (1995). Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet; a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas and drainage basins. PhD-Thesis, Utrecht, *Geologica Ultraiectina*, 126. 518 pp.

Steijn, R.C., Jeuken, C. (2000). Vier mogelijke beheersingrepen in het Zeegat van Texel - morfodynamische modelberekeningen (in Dutch), Report A514/Z2742. Alkyon / WL-Delft Hydraulics, Emmeloord

A Bollen van de Ooster

A.1 Grootschalige morfologische ontwikkeling

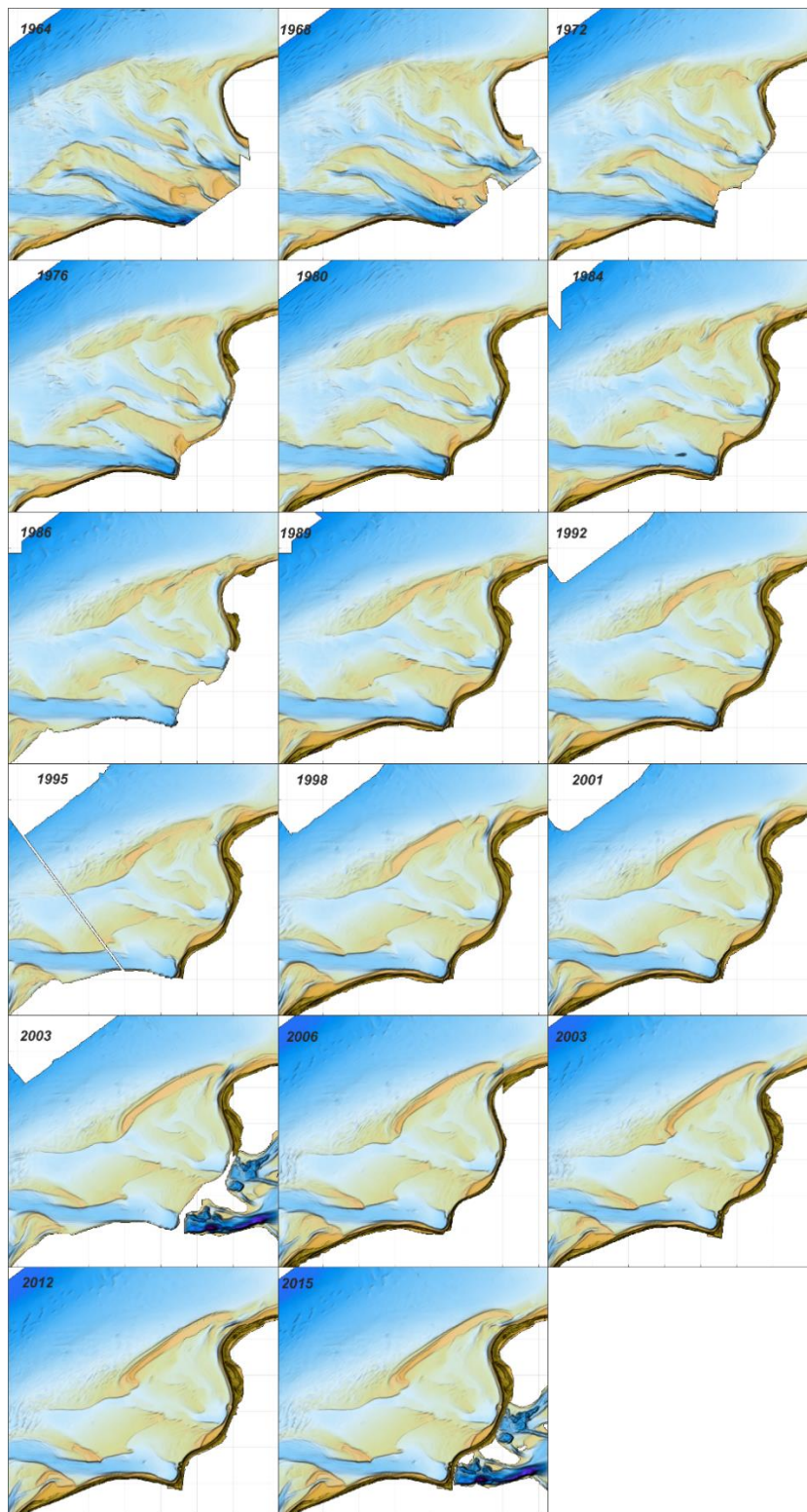


Figure A.1 Lange-termijn ontwikkeling van de Bollen van de Ooster op basis van de samengestelde bodems verkregen uit de Vaklodingen (Elias, 2015).

A.2 Analyse van de morfologische veranderingen van de kustlijn

Als we op de grote schaal kijken (zie Figuur A.1), dan kan worden geconcludeerd dat de ontwikkelingen aan de noordwestkust van Goeree sterk samen hangen met de voorliggende geul Schaar, de Bollen van de Ooster en tegenwoordig het “geultje van de Bollen”. De kustlijn vertoont hierbij, zowel in de tijd als in de ruimte, een grote variatie in gedrag (Figuur A.2).

In de periode 1964-1972 was Schaar nog een geul die zich langs de kust van Goeree uitstrekte en rechtstreeks in verbinding stond met het achterliggende Grevelingen bekken (Figuur A.1). Aan de zeewaartse uitstroom had zich een eb-schild gevormd. Tussen km. 13 en km. 15 sloot dit eb-schild aan op de kust. Rond 1972 beginnen kleinere geultjes en platen zichtbaar te worden op dit eb-schild. Deze platen en geulen landen periodiek aan op de kust. De vele suppleties die in de periode 1966-1985 zijn uitgevoerd, zijn waarschijnlijk gerelateerd aan de kusterosie ten gevolgen van de geulen die periodiek kusterosie veroorzaken. Rond 1996 is er een duidelijke verandering van het morfologische gedrag opgetreden. Rond de kop van de Bollen van de Ooster is dan een grote en diepe (kortsluit)geul gevormd en deze geul blijft dan onafgebroken aanwezig. Deze geul verhindert de aanlanding van de Bollen van de Ooster, waardoor de kust nu structurele erosie vertoont. Tot 2000 blijft een grote geul zichtbaar. Vanaf 2003 zien we ook dat er geen echte hoofdgeul aanwezig is, maar meerdere kleine geultjes gescheiden door zandruggen ontwikkelen zich. Dit is eigenlijk het begin van de huidige configuratie van geulen gescheiden door kleine bankjes.

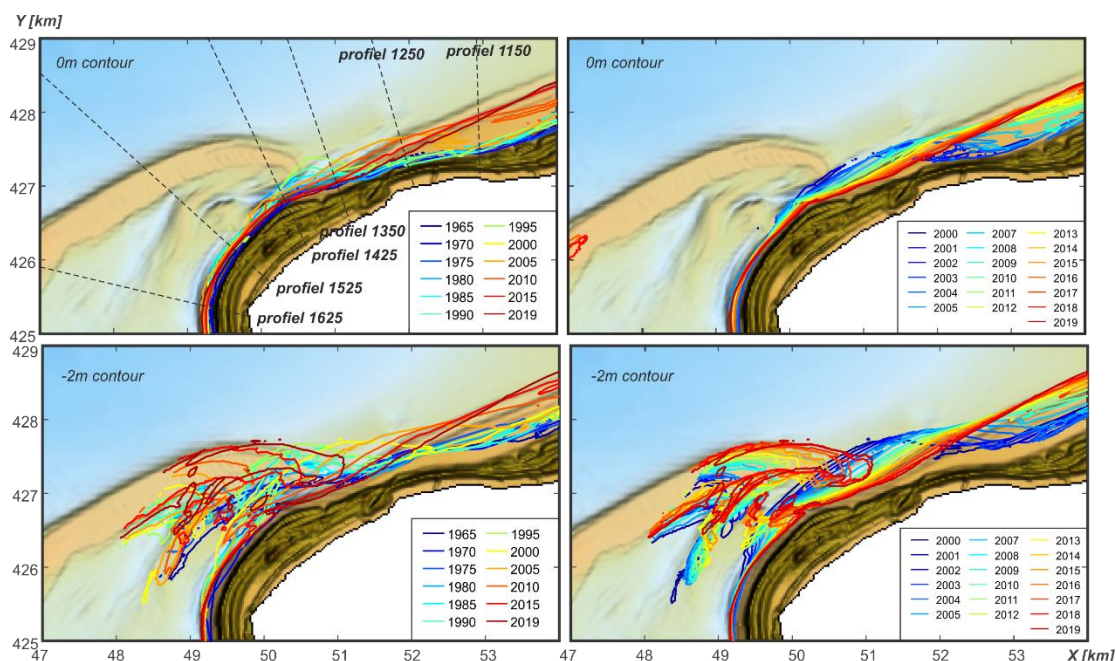


Figure A.2 Ontwikkeling van de kustlijn aan de hand van de 0m en -2m contourlijnen (boven en onder) voor de periode 1965-2019 (links) en sinds 2000 (rechts).

De Bollen van de Ooster strekt zich steeds verder noordwaarts (en landwaarts) uit (Figuur A.2, -2m contour). In 1999 beginnen eigenlijk de eerste tekenen van de invloed op de instroom duidelijk te worden. De Bollen van de Ooster duwen tijdens zuidgaand noordzeegetij de stromingen tussen de bank en de kust (instroom). Het instroomgeultje dat zo vormt noemen we “Geultje van de Bollen”. In de periode 2010-2014 zien we de kop van de Bollen van de Ooster zich nog verder ontwikkelen en een sterkere kromming naar de kust toe maken. De stroming wordt nu nog meer tussen de Bollen en de kust geperst. Dit resulteert in lokaal sterke kustlijnerosie en een grote variatie in kustgedrag langs de kust. Deze variatie wordt Figuur A.3 geïllustreerd aan de hand van 6 representatieve profielen. Ten noorden van raai 1250 bouwt de kust sterk uit (zie profiel 1150). De grote sprong in profielgigging zichtbaar in 2005 is gerelateerd aan de 2004 suppletie. Vanaf profiel 1250 zien vinden

we een eroderende trend. Met name in profielen 1350 en 1425 zien we de vorming van de Bollen van de Ooster en een ingeklemd geultje duidelijk terug (2000-2015). Ten zuiden van raai 1425 wordt het meer-geulensysteem duidelijk zichtbaar (Profiel 1525). Rond 2002 bereikt de instroomgeul hier zijn maximale diepte. Doordat de Bollen van de Oostwaarts zich in noordwestelijk richting verlengt schuift ook het geultje op en ontstaat er meer ruimte tussen de Bollen en de kust. Hierdoor neemt de geuldiepte af van -9 m in 2001 tot -4m in 2014. De geul migreert daarbij naar buiten. Landwaarts en zeewaarts ontwikkelen zich 2 uitstroomeulen. De ontwikkeling van een uitstroomegul vlak langs de kust zorgt hier voor een steil kustprofiel en zal daarbij sterk bijdragen aan de geobserveerde erosie. Ten zuiden van de kop van Goeree (profiel 1625) is er een stabiele ligging van het kustprofiel te zien. De kust heeft hier wel een steil profiel dat op een diepte van ongeveer -5m uitvlakt.

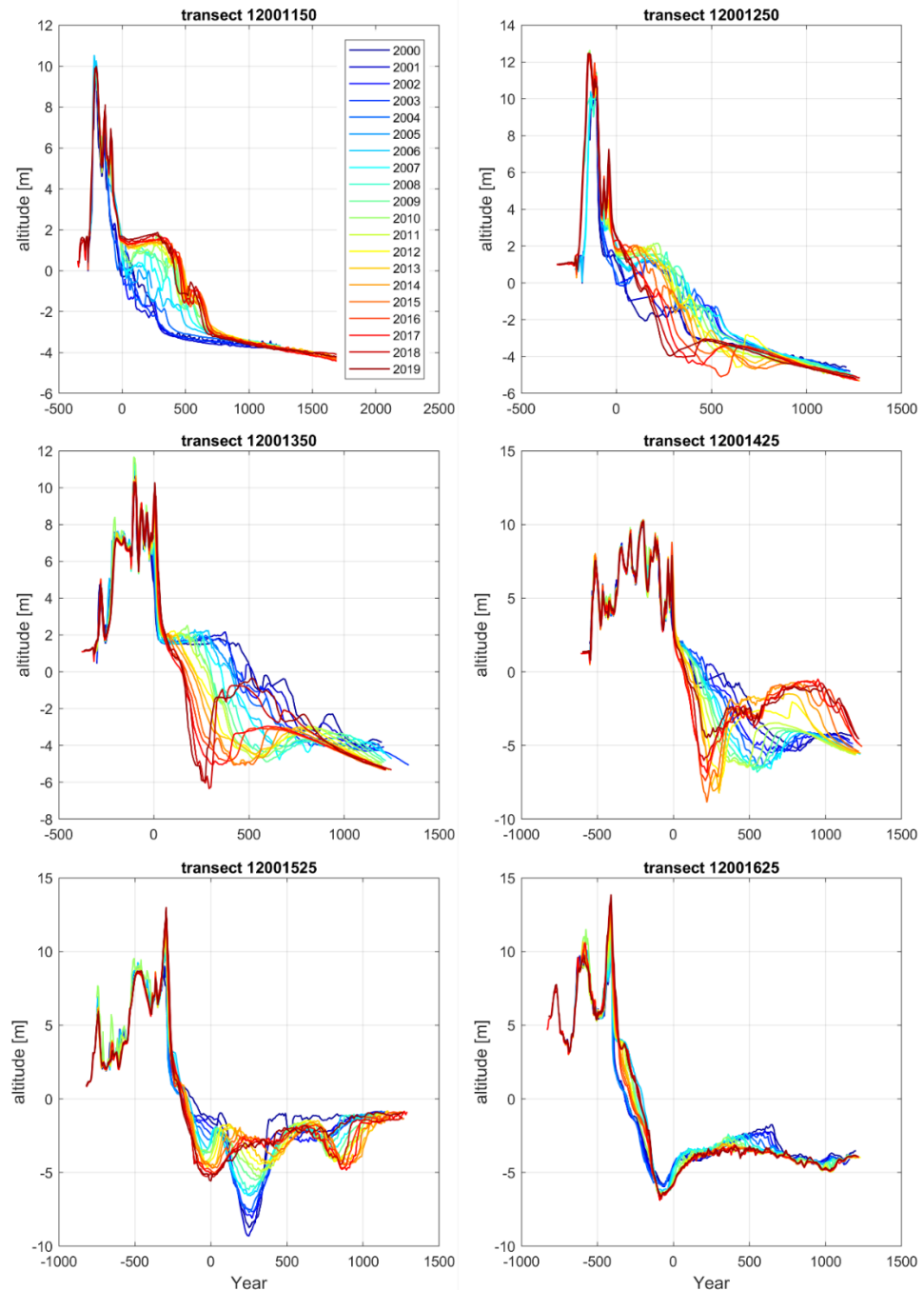
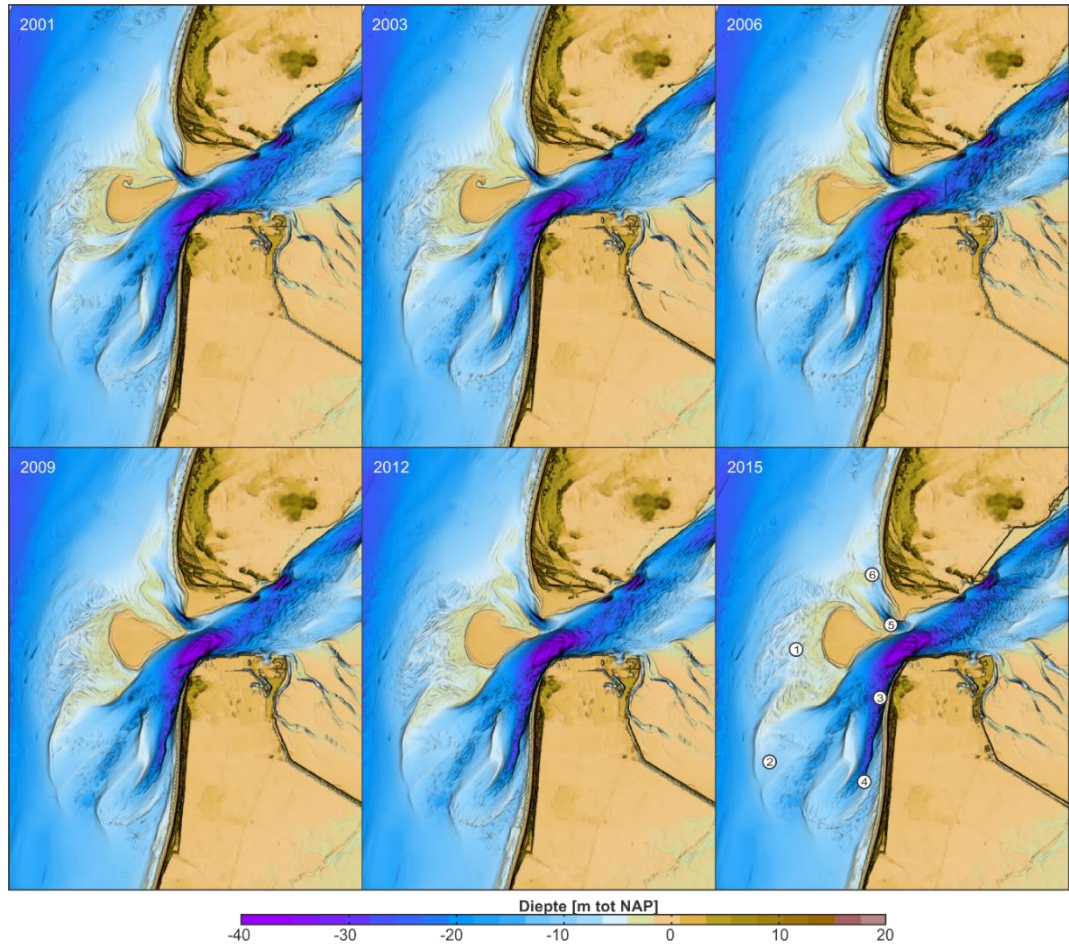


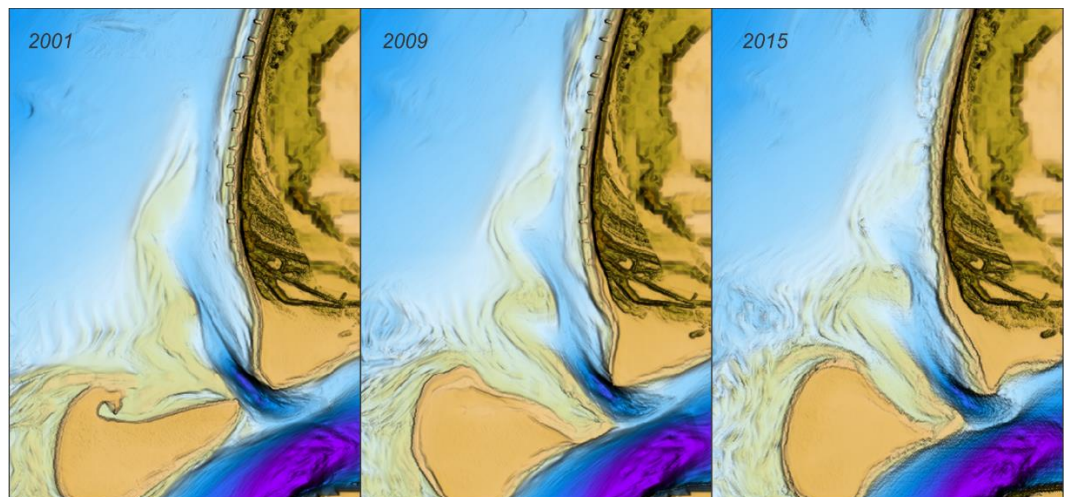
Figure A.3 Overzichtsfiguur ontwikkeling geselecteerde kustprofielen (zie Figuur A.2 voor locatie van de profielen).

B Molengat

B.1 Grootschalige morfologische ontwikkelingen



Figuur B.1 Ontwikkeling van de buitendelta van Texel over de periode 2001-2015.

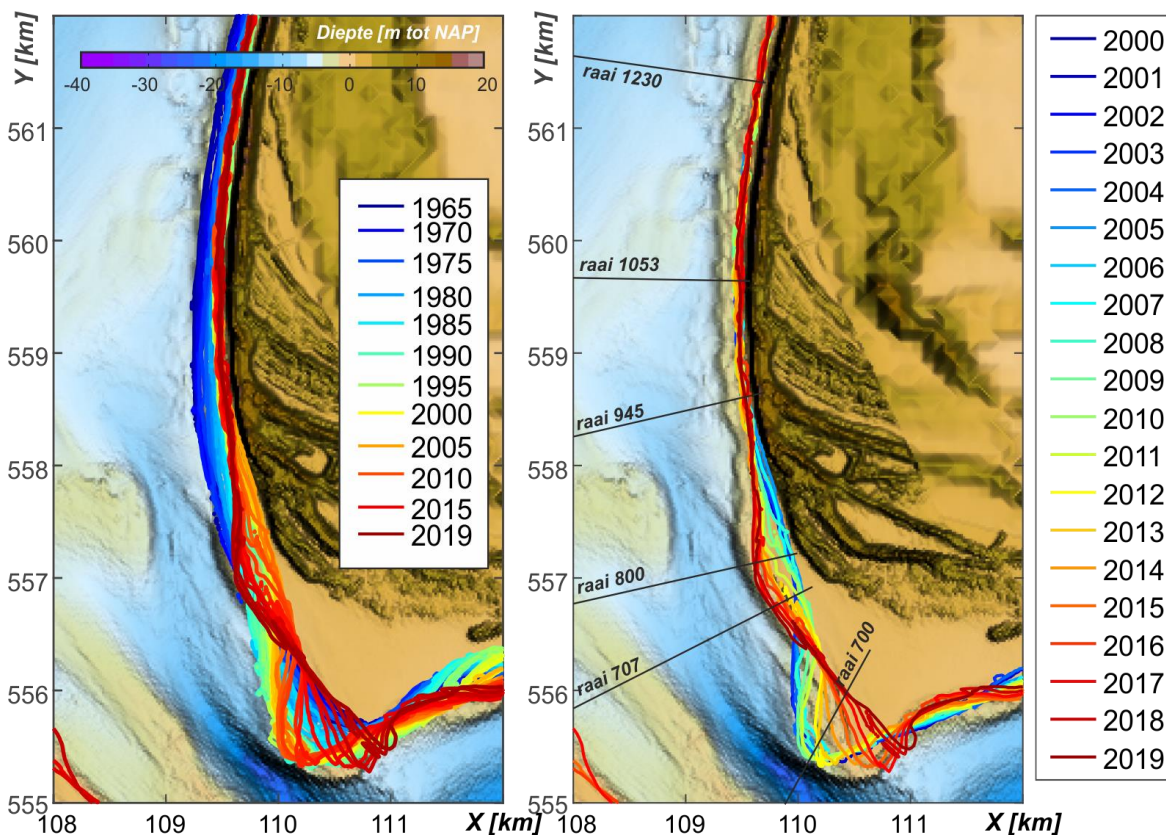


Figuur B.2 Detail ontwikkeling van de buitendelta van Texel over de periode 2001, 2009 en 2015.

B.2 Analyse van de morfologische veranderingen van de kustlijn

De zuidwestzijde van Texel vertoont een complexe opeenvolging van gebieden met erosie en sedimentatie (Figuur B.3). Een directe invloed van de buitendelta vinden we tot raai 1180. Langs de gehele kust vind er eigenlijk een structurele erosie plaats. De kustlijn wordt hier dan ook beschermt door strekdammen, die niet in staat zijn de erosie volledig te stoppen, en door frequent suppleren. Deze strandhoofden zijn in de periode 1959-1987 aangelegd. De kustlijn is tussen 1965 en 1990 nog zichtbaar teruggetrokken (Figuur B.3, links). Vanaf 2000 lijkt de terugtrekking beperkt (Figuur B.3, rechts). Wel zien we dat er dan richting de Vliehors grote veranderingen optreden met lokale gebieden van zowel sedimentatie en erosie. Tot 2010 is de Vliehors in zuidwestelijke richting uitgebouwd, maar sindsdien weer grotendeels terug geërodeerd. De geobserveerde kusterosie lijkt samen te hangen met veranderingen in de voorliggende geul en de NUN.

In de meer recente bodems (2006-2012) is een vervorming van de NUN te zien en ook neemt de maximale hoogte af (Figuur B.1 en B.2). Tot ruwweg 2012 lag er tussen de tip van de NUN nog een kleine geul aanwezig die de NUN scheidt van de kust van Texel. In 2012 is de tip van de NUN eigenlijk al vrijwel verheeld met de kust. Ook in de 2015 opname zien we een beeld van een verheiling van de NUN via een ondiep platform op de -5 m. Op de NUN heeft zich dan een groot eb-schild en eb-chute systeem gevormd. De oostwaartse begrenzing van dit eb-schild beïnvloedt lokaal het Molengat, waardoor er afwisselende gebieden van erosie en sedimentatie langs de kustlijn ontstaan. Tussen het eb-schild en de Noorderhaaks lijkt een vloed gedomineerd geultje te vormen, zeewaarts van het Molengat, waardoor de afstand tussen Noorderhaaks en de Hors juist toeneemt. Dit is een duidelijke trendbreuk met voorgaande observaties. De Noorderhaaks verschuift sinds zijn droogvallen in de jaren '50 al langzaam naar het oosten toe. In de periode 1991 – 2003 blijft dan de oostpunt opmerkelijk stabiel. Met het opdringen van de Noorderhaaks vervormde het Molengat van zeer breed en ondiep naar een smalle diepe geul. Sinds 2006 is de trend echter omgekeerd. De Noorderhaaks erodeert aan de oostzijde en het Molengat reduceert in diepte (zie Figuur B.4, profiel 700).

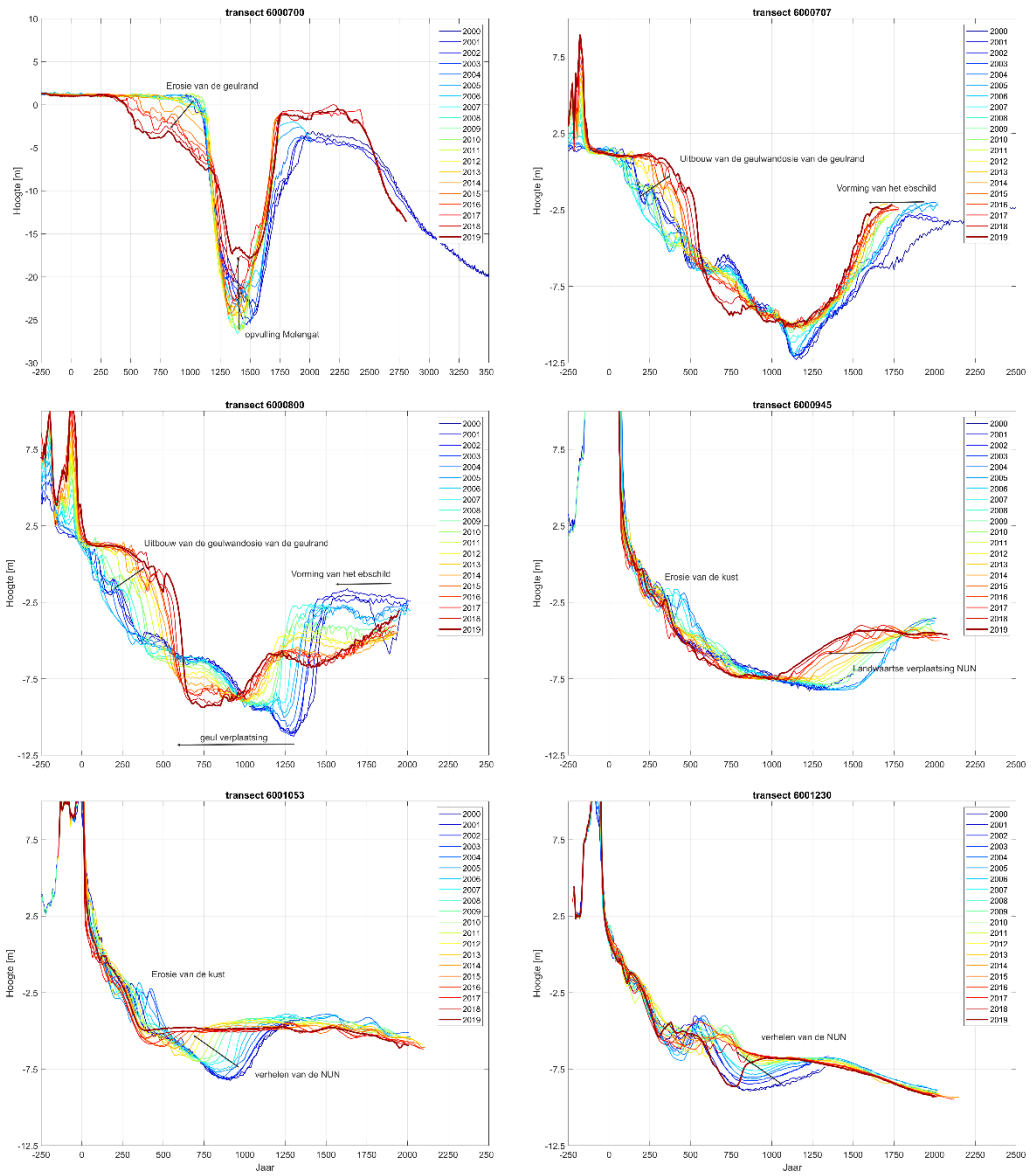


Figuur B.3 Ontwikkeling van kustlijn (0m contour) over de periode 1965-2019 (links) en 2000-2019 (rechts).

In Figuur B.4 worden de ontwikkelingen in meer detail weergegeven voor een aantal representatieve profielen. Raai 1053 en 1230 geven een beeld van de overgang van buitendelta naar ongestoorde eilandkust. Ter hoogte van deze raaien landt ook de NUN aan. In profiel 1053 zien we dat NUN eigenlijk al rond 2015 is aangeland. De kleine geul tussen de bank en de kust is dan al vrijwel verdwenen. Er heeft zich een doorgaand, ondiep platform op -5 m gevormd. De kustlijn blijft hier door de vele suppleties vrij stabiel in positie liggen, alhoewel de MKL sinds 2015 wel landwaarts van de BKL ligt. De aanlanding van de NUN heeft hier tot nu toe geen waarneembare reductie van de erosie gegeven.

Tussen raai 1053 en raai 707 wisselen erosie en sedimentatie van de kustlijn elkaar af. Dit heeft te maken met de lokale beïnvloeding van het Molengat en de ontwikkelingen op het centrale gedeelte van de NUN. Raai 945 geeft een beeld van sterke erosie. Op de voorliggende NUN ontwikkeld zich een ondiepte (eb-schild). Tussen dit eb-schild en de kust ligt dan een ondiep geultje dat landwaarts migreert, waardoor de kustlijn lokaal erodeert. Net ten zuiden hiervan (raai 800) zien we juist het tegenovergestelde. Het geulprofiel wordt groter (zeewaarts) en de kustlijn bouwt sterk uit. Een uitbouw van de kust vinden we ook in raai 707. In deze raai zien we ook dat het Molengat aan het vernauwen en aan het verondiepen is. Dit vernauwen komt door de opbouw van het eb-schild aangezien het diepe deel van Molengat eigenlijk al sinds 2010 sterk in diepte afneemt (raai 700). Ter hoogte van raai 700 is deze afname bijna 10 m.

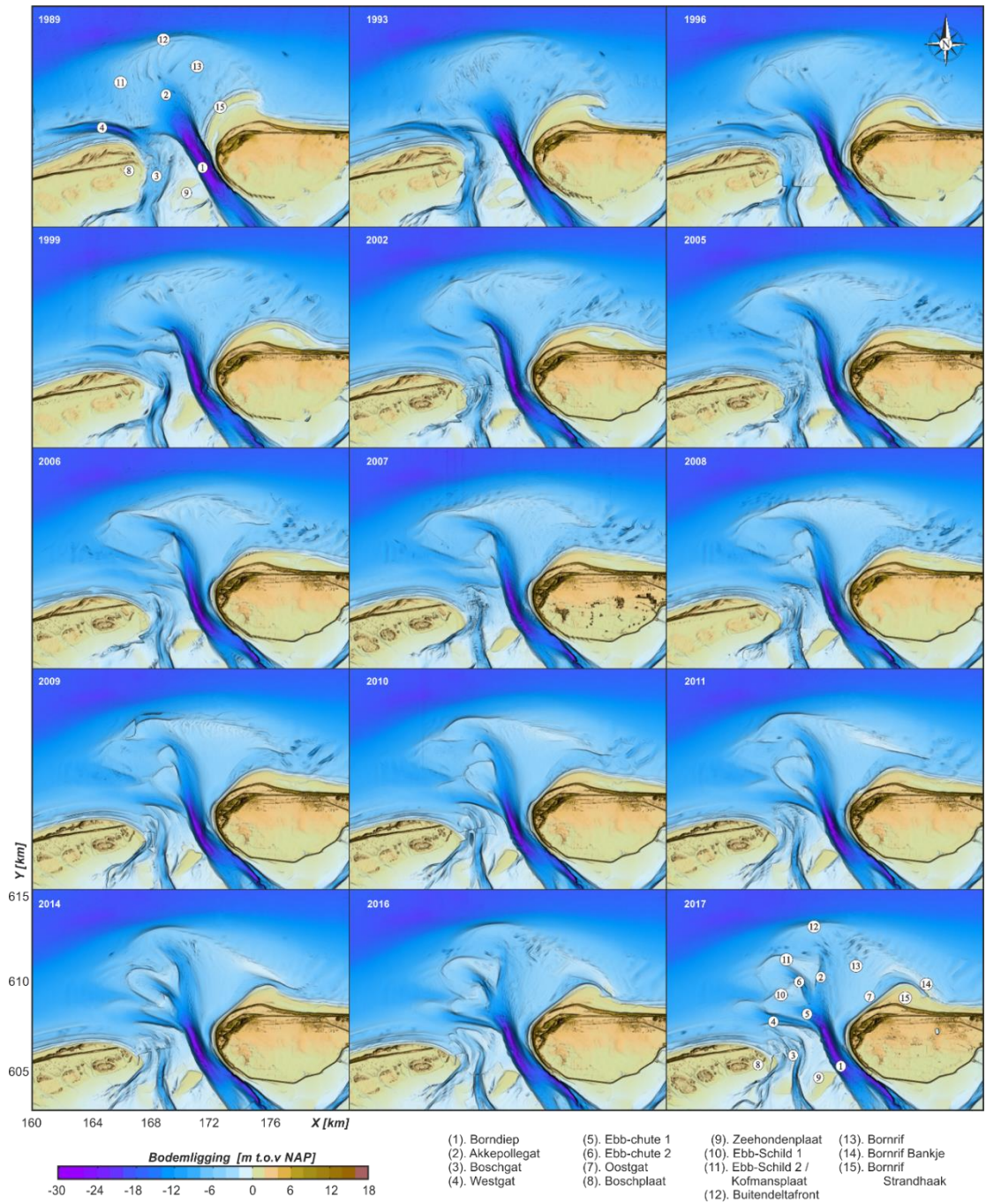
De zuidwestpunt van de Hors (raai 700) vertoont initieel een sterke uitbouw van de landwaartse geulwand. De geul ontwikkeld een zeer steil talud en is daarbij in diepte toegenomen van 8 tot 20m. In de periode 1992-2010 zien we dat de vrijwel de gehele geul landwaarts beweegt met uitzondering van de landwaartse geulwand boven de -7m. Dit gedeelte blijft opmerkelijk stabiel. Recent, 2012-2019 zien we een duidelijke verandering in het gedrag van het profiel. Aan de bovenkant van de geul, tot de -2m contour, is er tot 2011 nog opbouw, maar sindsdien trekt de kustlijn hier sterk terug.



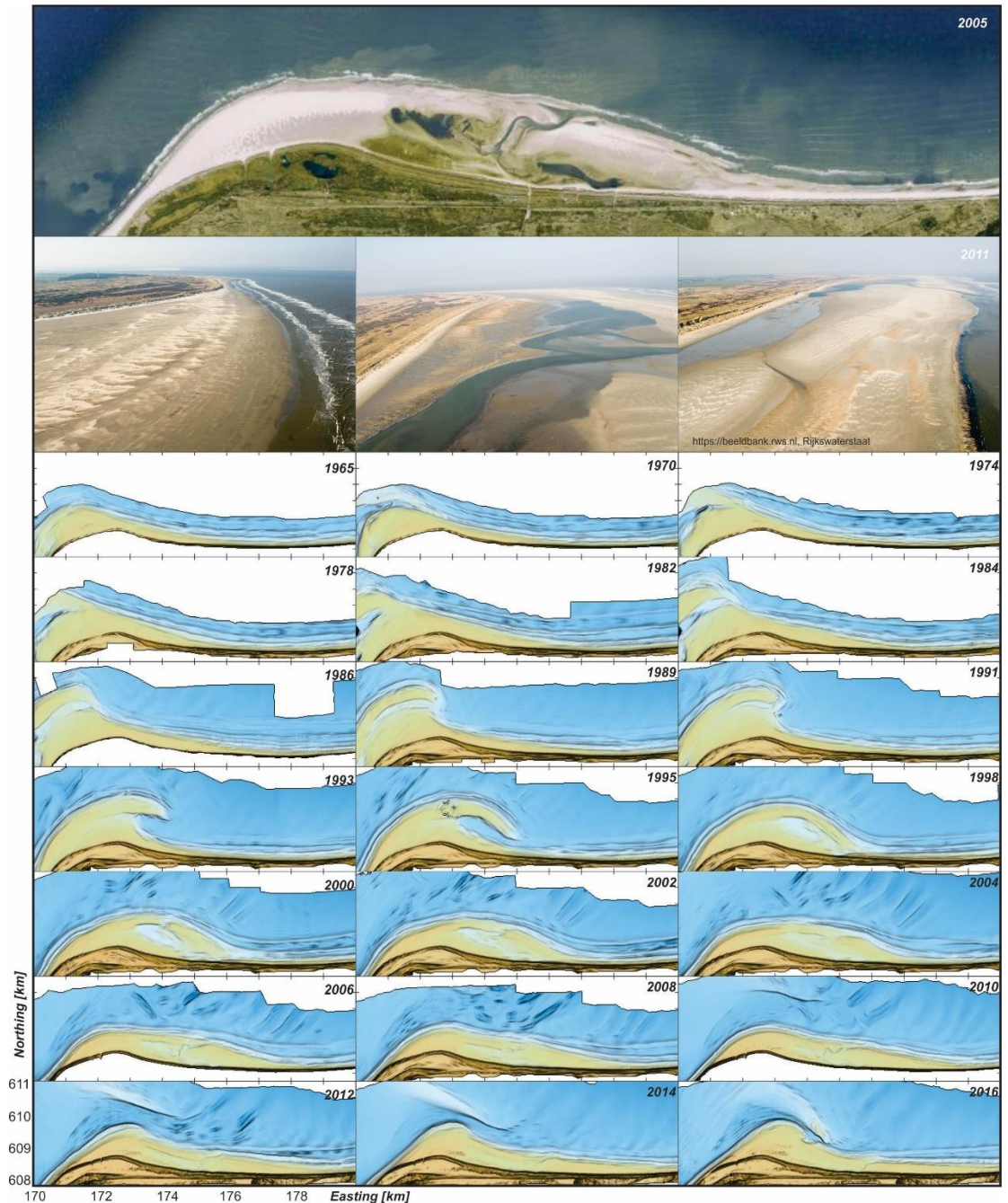
Figur B.4 Ontwikkeling van 6 representatieve kustprofielen over de periode 2000-2019.

C Oostgat

C.1 Grootschalige morfologische ontwikkelingen



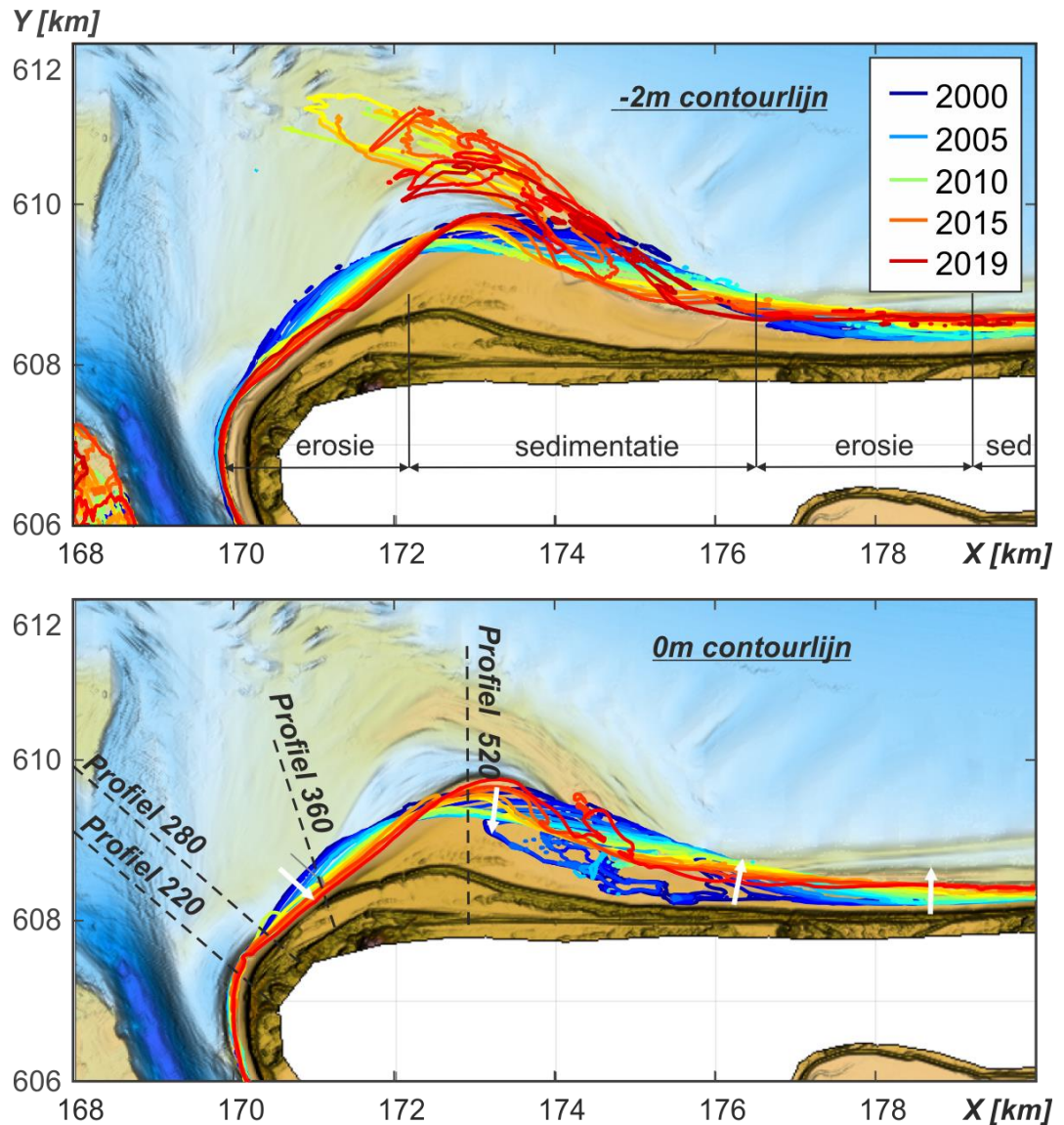
Figuur C.1 Ontwikkeling van de buitendelta van het Zeegat van Ameland over de periode 1989-2017.



Figuur C.2 Ontwikkeling van de Bornrif Strandhaak in detail (1965-2015). Uit: Elias et al. (2019).

C.2 Analyse van de morfologische veranderingen van de kustlijn

Figuur C.2 geeft de ontwikkeling van de kustzone in detail weer sinds 1965. In deze Figuur zijn afwisselende gebieden met erosie en aanzanding te onderscheiden. De eilandkop (ruwweg km-raai 47 – 2.5) wordt daarbij gedomineerd door erosie. Het stukje direct aanliggend aan het Borndiep ligt eigenlijk relatief vast. De ontwikkeling van de kustlijn wordt hier direct aangestuurd door de ontwikkelingen in het Zeegat van Ameland. Door het oostwaarts verplaatsen van het Borndiep wordt een gebied van zo'n 2 km al sinds 1850 gekenmerkt door kustafslag. De zuidwestelijke kustlijn is hier gestabiliseerd door het aanbrengen van oeverbestortingen met zinkstukken en een stortstenen dam. Het opdringen van het Bornrif en erosie ter plaatse van de bestortingen is wel een punt van zorg, maar niet het aandachtsgebied van deze studie. Aan de noordwestzijde wordt de aanhoudende kusterosie door middel van suppleties ondervangen. Dit vergt een forse inspanning. Sinds 1979 is hier al meer dan 6 miljoen m³ zand gesuppleerd.



Figuur C.3 Ontwikkeling van de kustlijn van Ameland NW en de het voorliggende Bornrif aan de hand van de -2m en 0m contour (2000-2019). Onderliggende bodem is representatief voor 2017.

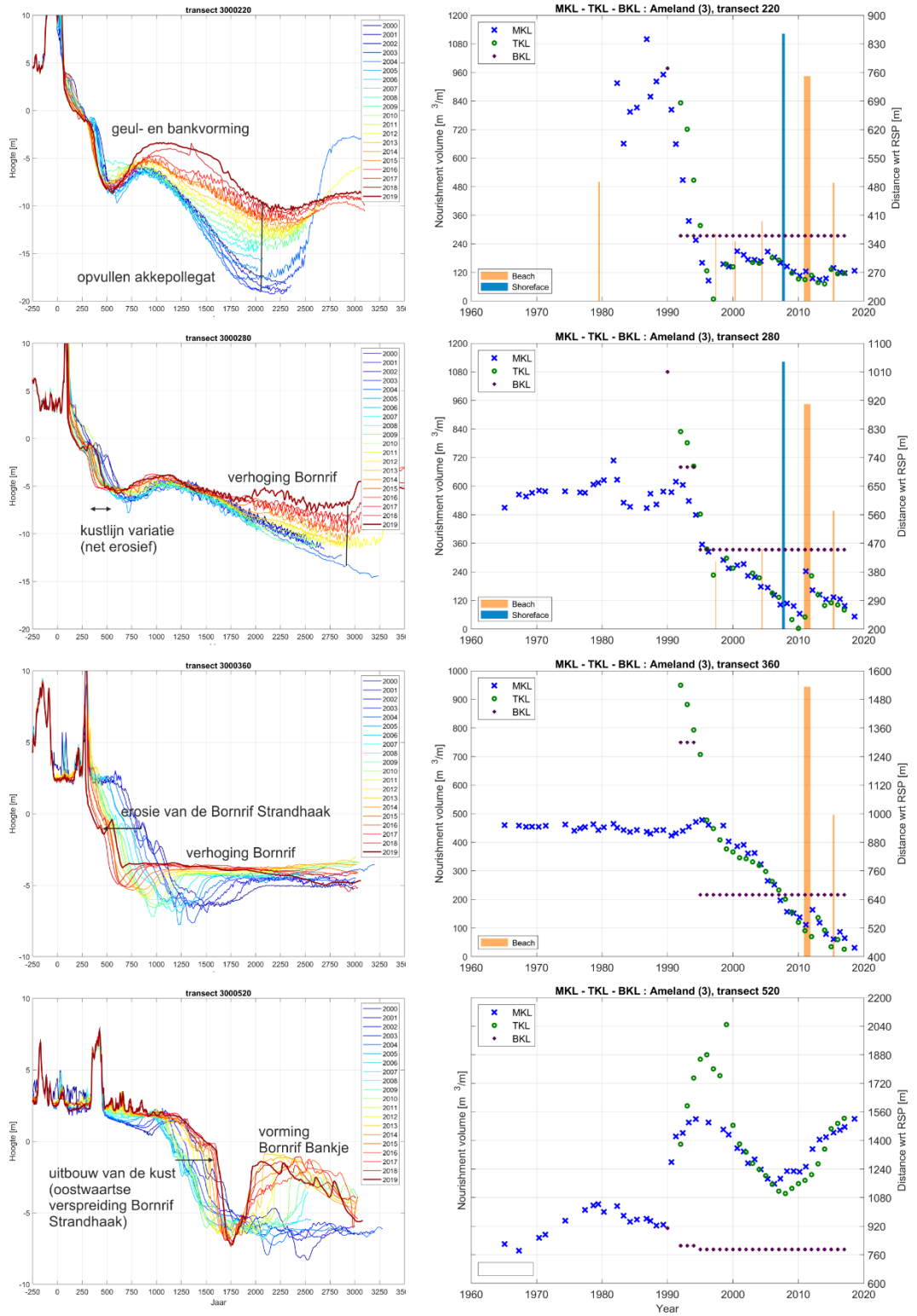
Het erosiegebied strekt zich uit tussen raaien 200 en 400. Ten oosten hiervan liggen de restanten van de Bornrif Strandhaak. Er vindt hier wel veel erosie plaats, maar het strand is nog zeer breed. De erosie van de strandhaak geeft een oostwaarts transport langs de kust van Ameland. In Figuur C.4 wordt de strandlijn ontwikkeling in detail weergegeven door de profielen 220, 280, 360 en 520.

Zowel tussen de profielen als in de tijd is er een grote variatie in gedrag te onderscheiden. Profiel 220 geeft de overgang weer van de buitendelta richting het Borndiep. In 2000 was het Akkepollegat hier nog zeer diep met een diepte van bijna 20m. De geul is snel opgevuld en heeft hier in 2019 een diepte van slechts 10m. Het voorliggende Bornrif heeft daarbij een ondiepe (-3m) uitloper gevormd die zich tussen het Akkepollegat en de kust uitstrekt. Tussen deze bank en de kust heeft zich dan een geultje gevormd. De diepte van deze geul is eigenlijk niet toegenomen maar het geultje vormt door de opbouw van het Bornrif. De uitloper van het Bornrif en ook het geultje verplaatsen landwaarts. Hierdoor treedt hier erosie van de kustlijn op en zijn herhaalde suppleties nodig om de kust hier te handhaven. De suppleties en daarop volgende erosie zijn in het volumeverloop van de MKL duidelijk terug te zien.

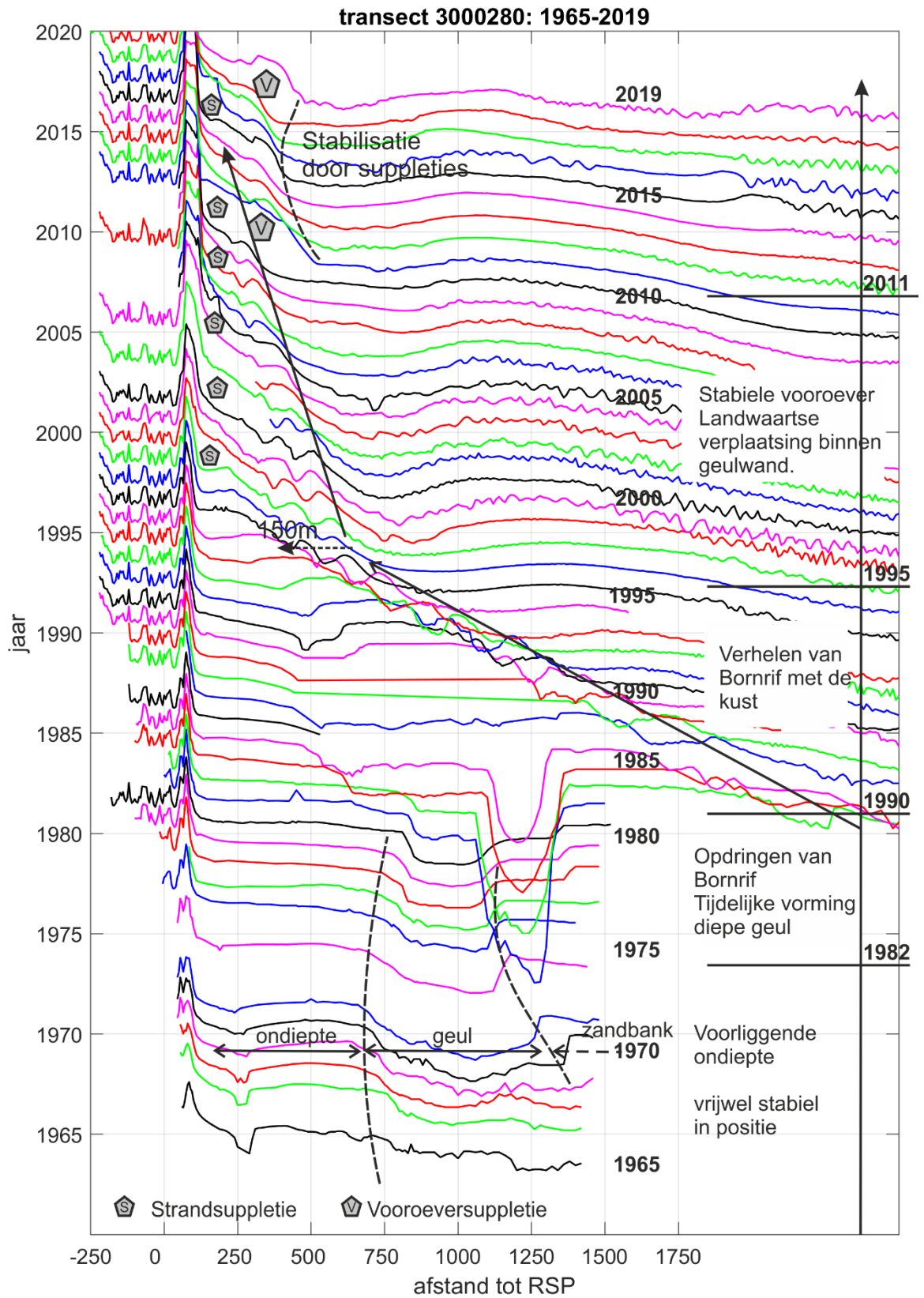
Raai 280 ligt maar iets ten oosten van raai 220, maar vertoont eigenlijk al een heel andere karakteristiek (zie details in Figuur C.5). Het Bornrif was hier relatief diep maar is gedurende de laatste 10 jaar duidelijk in hoogte toegenomen tot een vrij constant platform op een diepte van ongeveer -5m diep. Een duidelijke geul is hier in het profiel niet te onderscheiden. Wel is er een kleine verondieping zichtbaar op ongeveer 100m tot de RSP. Deze verondieping en het landwaartse kustprofiel vertonen een continue trend van landwaartse verplaatsing. In de MKL volumes zien we deze trend duidelijk terug. Het terugtrekken van de kust begon omstreeks 1990, en ging vrijwel continue door tot 2010. De grote strandsuppletie uitgevoerd in 2011 doorbreekt tijdelijk deze trend, maar na aanleg zet de erosie onverminderd door. Voor 1990 was het MKL volume hier eigenlijk heel stabiel. Dit komt waarschijnlijk door de aanwezigheid van het Bornrif dat als een grote zandbank toen nog voor de kust lag. Deze ondiepte beschermt dan de kust nog tegen golfaanval.

Raai 360 doorsnijdt de westelijke zijde van de Bornrif strandhaak en vertoont dan weer een ander gedrag. Ook hier is geen duidelijk geul in het profiel te onderscheiden. We kijken hier vooral naar de afbraak van de Bornrif strandhaak. De kustzone is in 2000 nog steeds uitgebouwd, maar trekt zich wel sterk terug. Deze terugtrekking zal ook in de toekomst onverminderd doorgaan. Raai 520 geeft een beeld van de kop van de strandhaak. Hier is de strandhaak tot 2015 nog duidelijk uitgebouwd en sindsdien gestabiliseerd. Zeewaarts hiervan zien we de vorming van het Bornrif Bankje en de geul die door deze insluiting ontstaat.

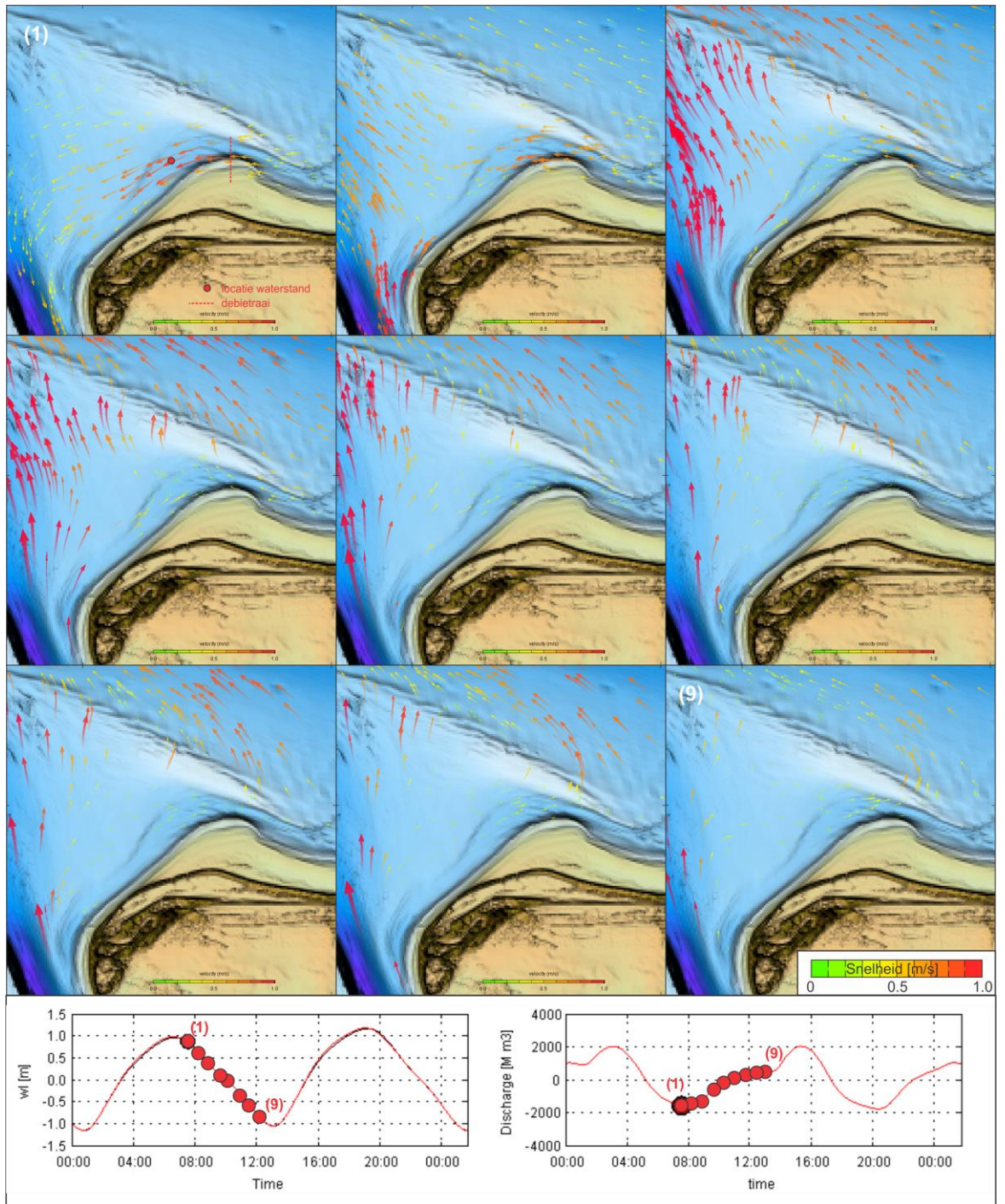
Uit bovenstaande analyses komt naar voren dat er vanuit de morfologie geen duidelijke doorgaande geul langs de eilandkop kan worden geïdentificeerd. Een soortgelijke conclusie kan ook worden getrokken op basis van de stromingspatronen. In de studie van Nederhoff et al. (2016) zijn de getijstromingen in het zeegat van Ameland berekend (voor de volledigheid worden de stromingsresultaten weergegeven in Appendix C, Figuur C.6 en C.7). In deze studie wordt geconcludeerd: Getijstroming door het Oostgat is klein. Op basis van de stromingspatronen lijkt het Oostgat geen 'klassieke' stroomvoerende geul te vormen waarbij een duidelijke vloed en ebstroming aanwezig is. Stroming in het Oostgat wordt vooral gedomineerd door de twee ophangpunten aan de west- en oostzijde (i.e. versnelling rondom de kop van Ameland). Aan de Oostzijde is het de versnelling van de stroming tussen de strandhaak Bornrif en het Bornrif Bankje dat lokaal de stromingen domineert. Richting het Borndiep is het juist de versnelling rond de kop van Ameland die lokaal de stroming laat toenemen. Een duidelijk doorgaande eb- of vloedstroming over het gehele Oostgat vindt slechts gedurende een klein gedeelte van het getij plaats. In deze periode vertoont dan niet alleen het Oostgat, maar eigenlijk de gehele naastliggende buitendelta een uniforme stroming.



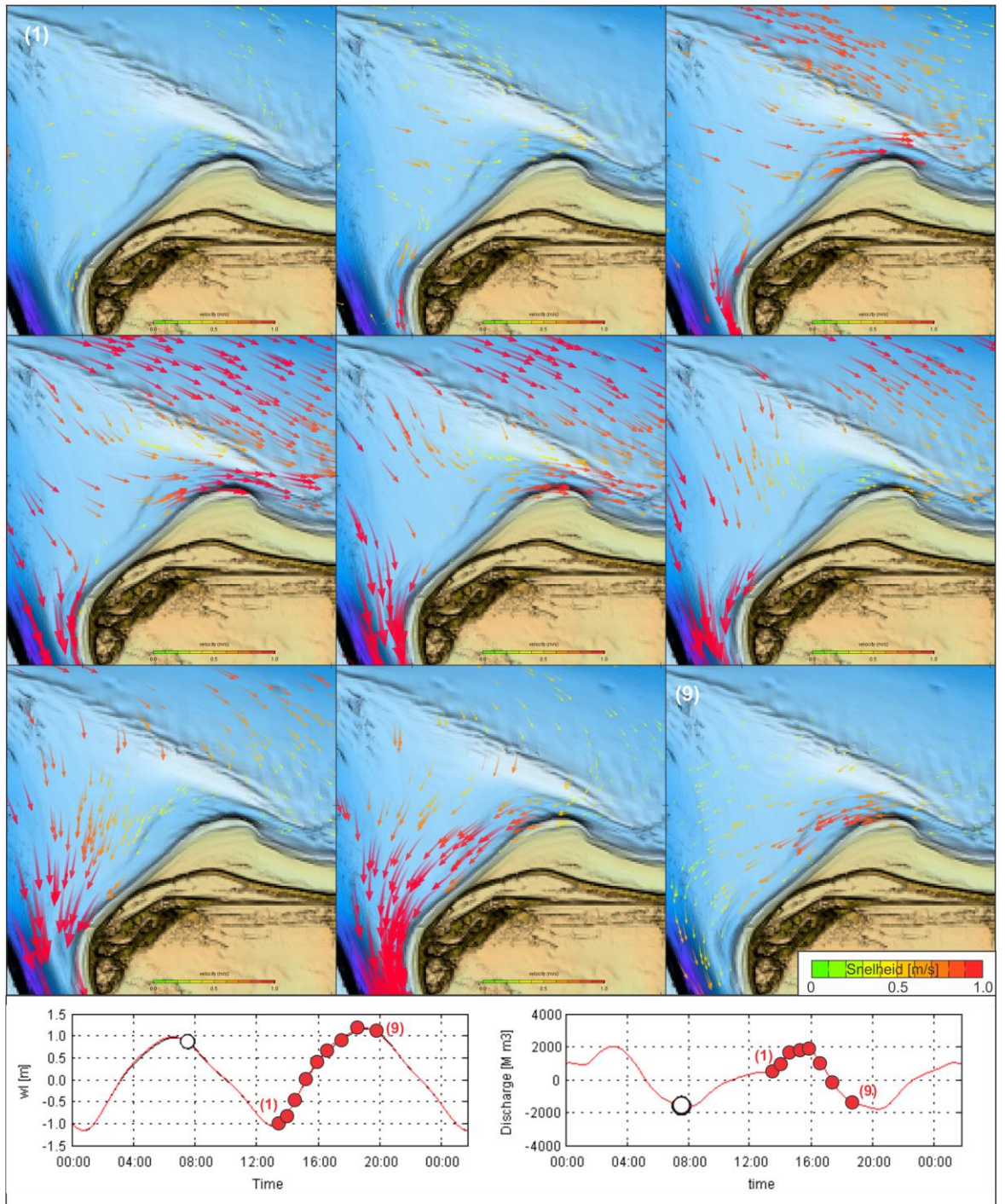
Figuur C.4 Ontwikkeling van de kustlijn en MKL posities voor raaien 220, 280, 360 en 520.



Figuur C.5 Timestack van profielontwikkelingen voor raai 280.



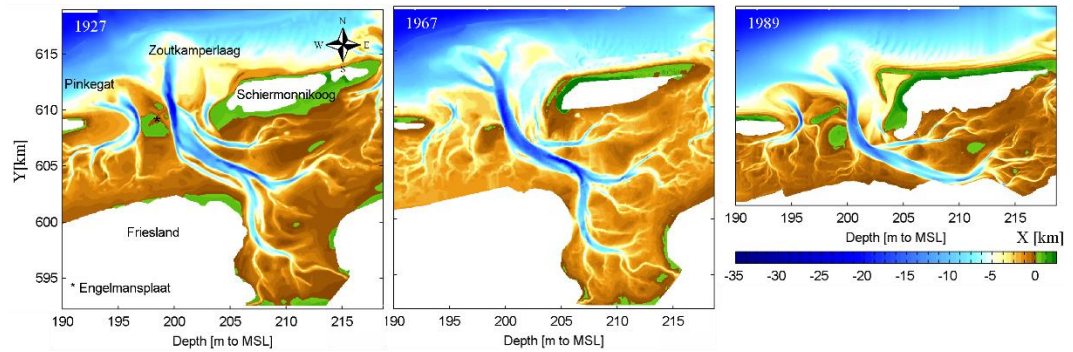
Figuur C.6 Berekende getijstromingen over het Bornrif, representatief voor uitstroming (eb) door het zeegat. Tijdsreeksen geven een indicatie van de waterstand en debiet in het Oostgat.



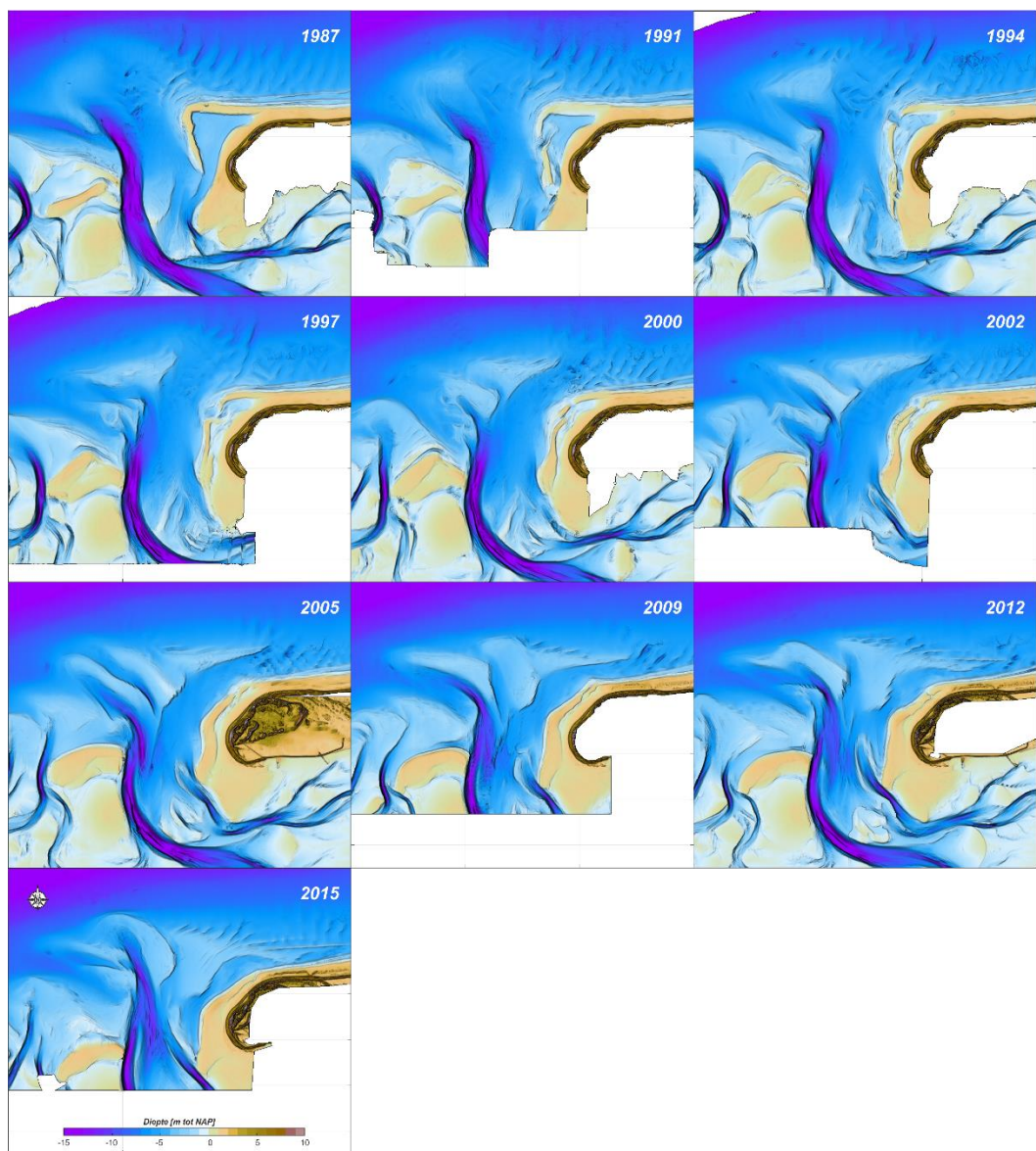
Figuur C.7 Berekende getijstromingen op het Bornrif, representatief voor instroming (vloed) door het zeegat. Tijdsreefs geven een indicatie van de waterstand en debiet in het Oostgat.

D Plaatgat

D.1 Grootschalige ontwikkeling



Figur D.1 Ontwikkeling van de buitendelta van het Friesche Zeegat (1927-1989). Bron: Elias et al. 2012.



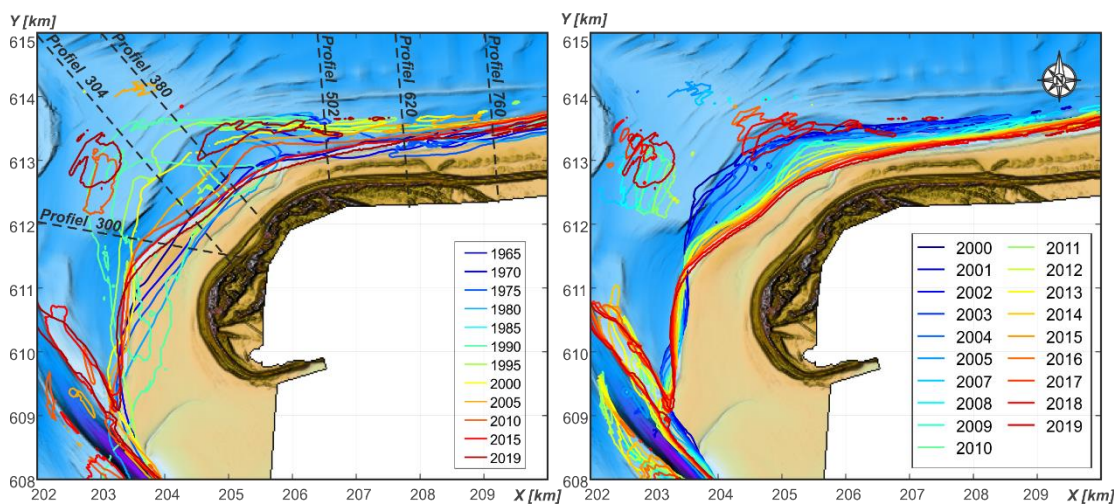
Figur D.2 Ontwikkeling van de buitendelta van de Zoutkamperlaag over de periode 1987-2015.

D.2 Analyse van de morfologische veranderingen van de kustlijn

Figuur D.3 geeft de ontwikkeling van de kustzone in meer detail weer. De contourlijnen geven de verplaatsing weer van de 0m contour op basis van de Jarkus grids voor (links) de gehele periode vanaf 1965 in 5-jaarlijks interval en (rechts) in jaarlijks interval voor de periode 2000-2019. Uit deze Figuur is goed af te leiden dat er een maximale kustuitbouw plaats vond rond 1990. De strandhaak was hier echter wel gescheiden van de kust door een soort lagune (zie Figuur D.2, 1991). De landwaartse begrenzing van deze lagune lag eigenlijk nog oostelijk van de huidige kustlijnligging. De strandhaak verheelt langzaam met de kust en dan ontstaat, rond 2000, een min of meer gesloten kust. Deze gesloten kust ligt aan de noordwest zijde ver zeewaarts, maar is sindsdien sterk geërodeerd. Dit proces is duidelijk te zien in profielen 300 tot 380 (Figuur D.4).

In deze profielen zien we de voorliggende strandhaak voor het eerst terug in de 1990 meting. De bank ligt op een afstand van ongeveer 2000 m tot de RSP in Profiel 304, migreert landwaarts in de periode 1990-1995, en geeft dan in 2000 een sterke vooruitgang van de kust. Sindsdien erodeert de kust. Deze erosie is vrijwel continue en nog steeds doorgaand. De 2019 ligging van het kustprofiel ligt in beide raaien nog steeds zeewaarts van de 1965 startwaarde,

Ten zuiden van profiel 300 blijft een gedeelte van de kust sinds 2000 eigenlijk vrijwel stabiel in positie. Hier ontstaat een grote spitvormige bank die zich in noordwestelijke richting uitstrekt vanaf het Westerstrand langs de rand van Gat van Schiermonnikoog (zie Figuur 5.1). Deze bank hangt samen met het ontwikkelen van Gat van Schiermonnikoog om de eilandkop heen. Zand dat toegevoerd wordt langs de eilandkop wordt opgepikt door de naastliggende geul en tijdens eb zeewaarts, langs de flanken van de geul, afgezet. Hierdoor ontstaat een langgerekte spit. Deze spit zou in de toekomst weer een bron van zand kunnen zijn voor de aanliggende eilandkust. Het verlengen en groeien van de geul zorgt wel voor extra erosie van het aanliggende Rif (van Schiermonnikoog).



Figuur D.3 Ontwikkeling kustlijn rond de noordwestzijde van Schiermonnikoog op basis van de 0m contour lijn voor de periode 1965-2019 (links) en 2000-2019 (rechts).

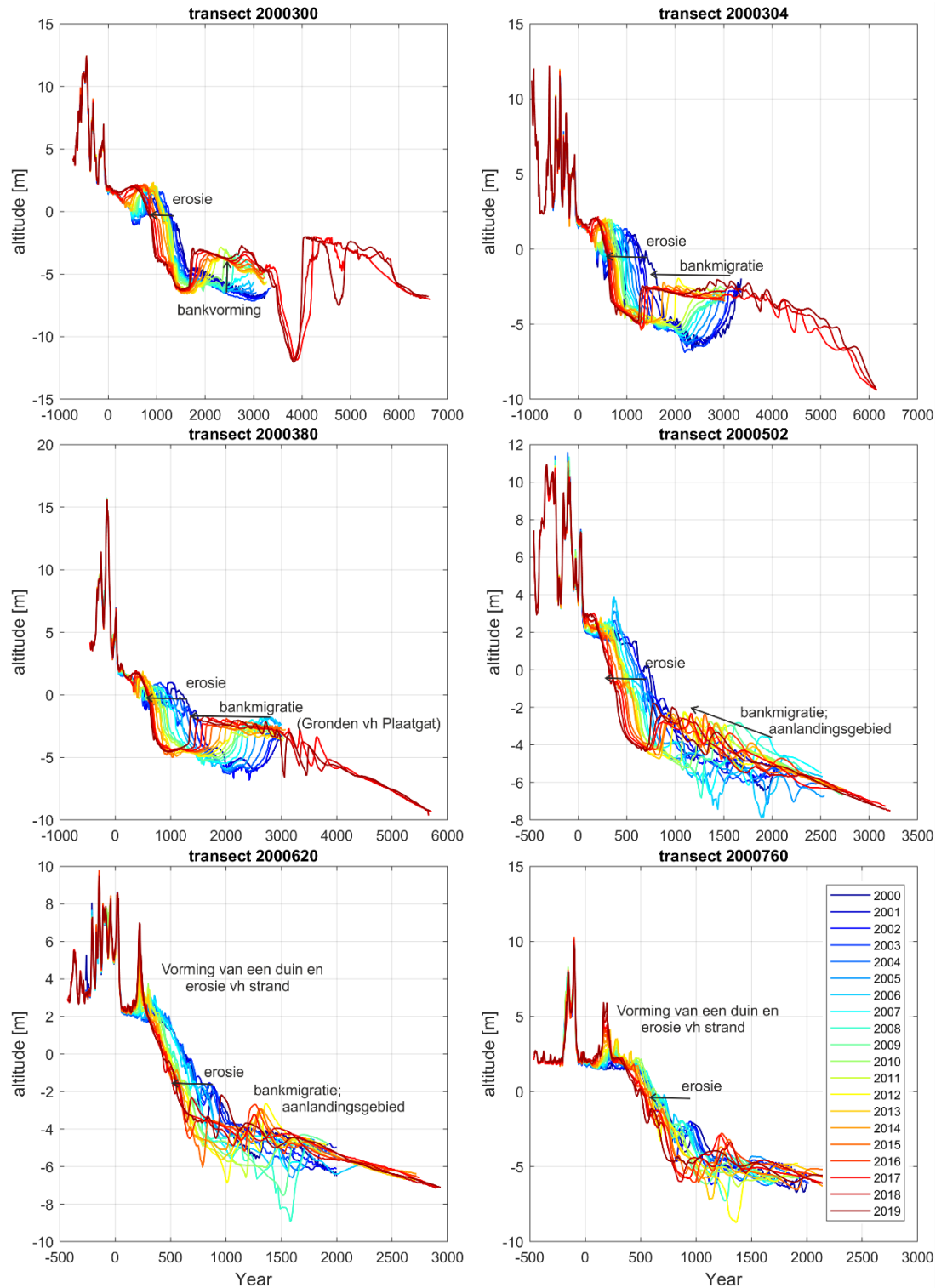
Ten oosten van profiel 300 overheerst erosie. Deze erosie is zeer groot tussen profielen 300 en 502. Oostelijk hiervan vindt ook erosie plaats maar deze reduceert in oostelijke richting. Tussen raai 502 en raai 760 vinden we het aanlandingsgebied van de banken die vanaf de buitendelta kustwaarts migreren.

De eilandkop (raaien 300-380) worden gedomineerd door het verheelen en daarna terug opruimen van de Strandhaak. Oostelijk hiervan (raaien 380-502) vinden we een iets ander gedrag. Dit gebied kan worden gezien als het aanlandingsgebied van de buitendelta.

In het dwarsprofiel (zie raai 380) zien we dat de kust eerst overgaat in een ondiepe geul Plaatgat die zeewaarts wordt geflankeerd door de buitendelta-bank Gronden van het Plaatgat. De Gronden verlengen in oostelijke richting door het overheersende golfklimaat. In profiel 308 zien we duidelijk een vrijwel continue groei (en landwaartse verplaatsing) van de bank sinds 2000. De tussenliggende geul Plaatgat neemt dan sterk in breedte af. De diepte verandert echter nauwelijks. Dit geeft aan dat het Plaatgat geen dominante stroomvoerende geul is. Er is in het profiel genoeg ruimte om de vernauwing van de geul op te vangen; het water zoekt de weg van de minste weerstand en zal meer over de platen stromen. Toch is het Plaatgat wel belangrijk voor de kustlijnontwikkeling. Met de landwaartse verplaatsing van het bankje (gronden van het Plaatgat), verplaatst Plaatgat zich ook landwaarts met sterke terugtrekking van de kust tot gevolg. Een soortgelijk proces vinden we ook terug in profiel 502, maar hier wordt de voorliggende bank pas duidelijk zichtbaar in de meer recente bodems (sinds 2012). Het kustprofiel trekt zich echter ook sterk terug.

Gaan we nog verder oostelijk (raaien 620 en 760), dan zitten we eigenlijk al oostelijk van de buitendelta. Het profiel is hier eerst sterk uitgebouwd tot een maximale ligging rond 1995. Sindsdien volgt ook hier een terugtrekking, deze terugtrekking is duidelijk zichtbaar in de recente profielen. In raai 760 zien we deze respons gedempt terug. Ook hier vindt een sterke zeewaartse uitbouw tot een maximale ligging rond 2005 plaats. Een nieuwe duinenrij wordt hier gevormd en lijkt nog steeds in volume/hogte toe te nemen. De erosie van het kustprofiel heeft deze duinenrij nog niet bereikt.

Uit de analyse van van der Lugt et al (2018) volgt de verwachting dat een verhelming van de Plaatgronden kust op termijn wel zal plaatsvinden. Hiervoor moet het Plaatgat eerst verzanden. In de aanlooperperiode zal nog meer erosie plaatsvinden. Op basis van de vertraging in plaatmigratiesnelheden, kan het verzanden van het Plaatgat misschien wel 10 jaar duren.



Figuur D.4 Ontwikkeling van de kustlijnprofielen aan de hand van representatieve raaien over de periode 2000-2019. Zie Figuur D.3 voor ligging van de raaien.