

Aanlandingsbanken Schiermonnikoog



Aanlandingsbanken Schiermonnikoog

Auteur(s)

Edwin Elias

Aanlandingsbanken Schiermonnikoog

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat - WVL
Contactpersoon	S. Pluis
Referenties	
Trefwoorden	Schiermonnikoog, morfologie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	8-8-2022
Projectnummer	11208035-004
Document ID	11208035-004-ZKS-0002
Pagina's	44
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Edwin Elias	

Samenvatting

In het kader van het onderzoeksprogramma KPP B&O Kust is een onderzoek uitgevoerd naar de sediment volumes van de aanlandingsbanken voorliggend aan de eilandkop van Schiermonnikoog. Deze eilandkop vertoont perioden van uitbouw en terugtrekking. Na verheling van de Strandhaak van het Friesche Zeegat met het eiland rond 1991 is een langdurige periode van terugtrekking van de kustlijn opgetreden. Vrijwel de gehele eilandkop, met uitzondering van het zuidwestelijk deel, vertoont een landwaarts gerichte trend. Aan de noordwestzijde wordt daarbij de BasisKustLijn (BKL) overschreden. Herstel van de kustlijn, zodat een ligging zeewaarts van de BKL wordt verkregen, kan worden bereikt door suppleren. Er bestaat echter ook de mogelijkheid dat er in de toekomst op natuurlijke wijze herstel optreedt. Zeewaarts van de probleemzone, op het buiten-deltaplatform de Plaatgronden bevinden zich meerdere banken die bij aanlanding het zandvolume van de kustlijn mogelijk kunnen herstellen tot zeewaarts van de BKL. De hoeveelheid zand die zich in de aanlandingsbanken bevindt is tot op heden echter nog niet gekwantificeerd.

Een nieuwe methodiek op basis van de 'actieve' bodemlaagdikte is toegepast om een inschatting te maken van de volumes van de aanlandingsbanken. Op basis van de uitgevoerde analyses wordt geconcludeerd dat 31 miljoen m³ aan sedimentvolume in de aanlandingsbanken aanwezig is. Dit volume is vergelijkbaar met die van de eerdergenoemde Strandhaak. Net voor aanlanding in 1987 bedroeg het geschatte volume hiervan 30 miljoen m³. Op basis van de landwaartse verplaatsing van de aanlandingsbank is het zeer waarschijnlijk dat er in de toekomst weer een grote bankaanlanding zal plaatsvinden. Aangezien het volume van de aanlandingsbanken vergelijkbaar is met die van de Strandhaak, lijkt het ook waarschijnlijk dat er bij aanlanding voldoende zandvolume aanwezig zal zijn om de kustlijn voor langere tijd zeewaarts van de BKL te positioneren. Een exacte voorspelling wanneer deze aanlanding zal optreden is op basis van de uitgevoerde analyses in dit onderzoek niet mogelijk. Het is daarom een aanbeveling de aanlandingsbanken frequent te monitoren. Een beter begrip van de vorming en verplaatsing van deze aanlandingsbanken is niet alleen van belang voor de lokale kustlijnontwikkeling van Schiermonnikoog, maar ook voor kennisontwikkeling van het kuststelsel in het algemeen.

Inhoud

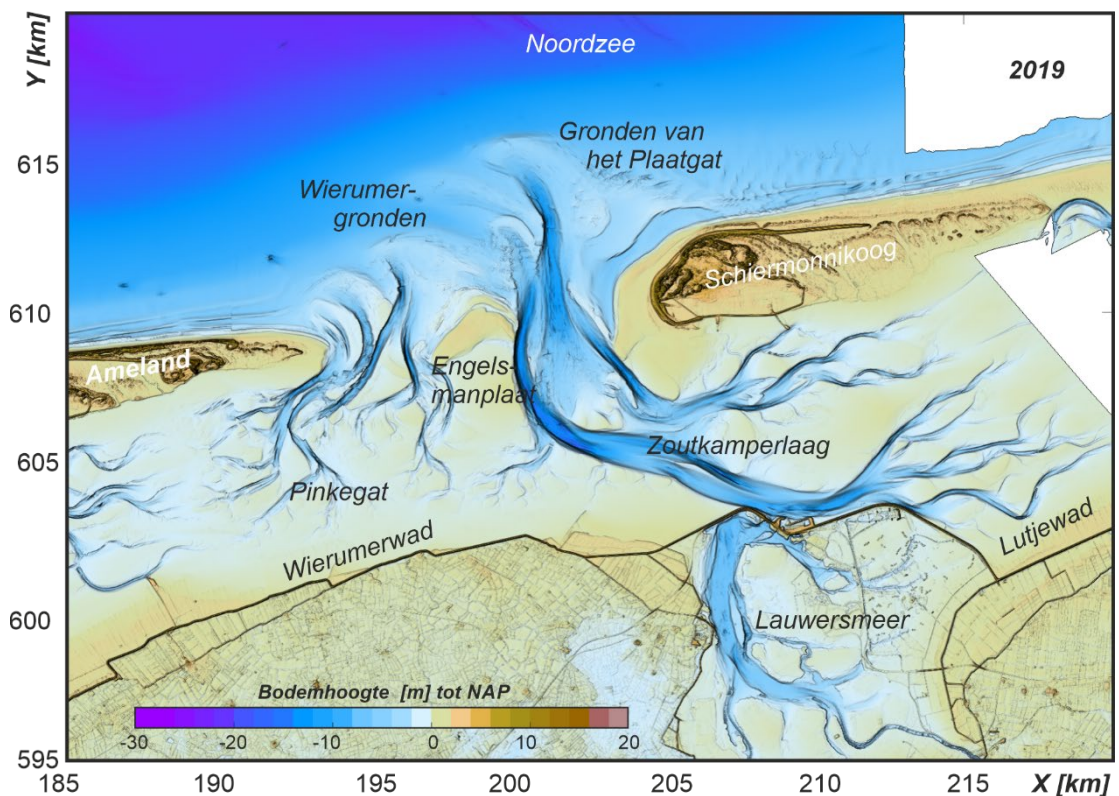
	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Achtergrond	6
1.2	Probleemstelling en Doelstelling	8
1.3	Opbouw van het onderzoek	9
2	Bodemdata en methode	10
2.1	Bodemdata	10
2.2	Methode	10
3	Volumebalansen	16
3.1	Ontwikkeling van de banken op de buitendelta van de Zoutkamperlaag over lange termijn	16
3.1.1	Ontwikkeling van de buitendelta vóór afsluiting (1926- 1967).	16
3.1.2	Ontwikkeling van de buitendelta ná afsluiting (1967-heden)	19
3.2	De recente ontwikkeling de buitendelta en aanlandingsbanken (2000-2019)	24
3.3	Volumeverandering van de eilandkop van Schiermonnikoog	27
4	Conclusies en Aanbevelingen	31
4.1	Conclusies	31
4.2	Aanbevelingen	32
5	Referenties	33
A	Beschikbare bodem data	35
B	Data en balansgebieden volumeberekeningen	37
B.1	Totale zeegat incl. bekken	37
B.2	Beknopte analyse Zoutkamperlaag buitendelta en bekken (1926-2019)	40
B.3	Overzicht bodemdata van de eilandkop	42

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In het onderzoeksprogramma KPP B&O Kust worden kennis en tools door Deltares ontwikkeld die de Rijkswaterstaat ondersteunen bij 1) verkrijgen van inzicht in de ontwikkeling van het zandig kuststelsel en 2) die ondersteunen in het beheer en onderhoud van het zandig kuststelsel. Het deelprogramma 'Systeemkennis Zeegaten' van het KPP B&O Kust programma focust op de kennisontwikkeling van de zeegatsystemen en de aangrenzende zandige eilandkusten.

Eén van de locaties langs de Nederlandse kust waar aanvullend inzicht benodigd is, is de eilandkop van Schiermonnikoog (Figuur 1-1). Deze eilandkop wordt gekenmerkt door structurele erosie sinds de aanlanding van de haakvormige zandbank in de jaren '90 van de vorige eeuw. Dit uit zich in een terugtrekkende kustlijn en een overschrijding van de kustlijn met de BasisKustLijn (BKL) als referentie in een aantal raaien. Op de voorliggende buitendelta liggen er diverse zandbanken die in de nabije toekomst kunnen aanlanden en daarmee de kop van Schiermonnikoog van zand kunnen voorzien. Om een afgewogen keuze tussen het wel of niet suppleren van het kustvak te komen, is aanvullend inzicht in de zandvolumes die zich in deze aanlandingsbanken bevinden benodigd.



Figuur 1-1: Overzicht van het Friesche Zeegat op basis van de 2019 bodemdata.

De buitendelta's beïnvloeden en bepalen voor een groot deel de (lokale) dynamiek van de naastliggende eilanden en de sedimenttransporten langs de eilandkusten. Een belangrijk onderdeel van deze dynamiek is sediment bypassing. Sediment bypassing beschrijft de verplaatsing van sediment over de buitendelta (Bruun en Gerritsen, 1959; Oertel, 1977, FitzGerald, 1996). Er kan onderscheid gemaakt worden in verschillende vormen van sediment bypassing. Sediment kan rechtstreeks via de geulen getransporteerd worden en zo

direct het zeegat passeren, of het sediment vormt banken op de buitendelta. Deze banken migreren dan over de buitendelta heen. Bij aanlanding van de banken kan de eilandkust uitbouwen. De meest recente voorbeelden van grote bankaanlandingen zijn de Borrif Strandhaak bij Ameland (Figuur 1-2a) en de aanlanding van een grote bank bij Schiermonnikoog, de strandhaak van het Friesche Zeegat (Figuur 1-2b). Bij beide zeegaten werd een soort strandhaak gevormd die lange tijd aanwezig blijft. Bij Ameland vond aanlanding plaats rond 1985 en is de kust ter plaatse van de aanlanding nog steeds ver zeewaarts uitgebouwd (Elias et al. 2019). Bij Schiermonnikoog vormde de strandhaak na afsluiting van de Lauwerszee (1967) en blijft dan nog lange tijd aanwezig (1987 - 1991), maar uiteindelijk landt de bank aan op Schiermonnikoog en wordt dan snel opgenomen in het kuststelsel (1994-2005). Na 2005 is de bank vrijwel niet meer terug te zien in de bodemkaarten. Een soortgelijke vorming van hoge, smalle banken ten gevolge van plotselinge veranderingen in het morfologische systeem, door bijvoorbeeld het gedeeltelijk of geheel wegvallen van het kustdwarse getij, is ook waargenomen na afsluiting van de Grevelingen en het Haringvliet (Van der Spek en Elias, 2021).

Naast deze grote, in het oog springende, bankaanlandingen hebben ook bij de andere zeegaten kleinere of minder zichtbare bankaanlandingen plaatsgevonden. Zo landden bij de noordwestkop van Terschelling periodiek, kleinere banken aan (Figuur 1-2c). Deze banken voeden de eilandkust van Terschelling. Ook de Hors, bij zuidwest Texel, is in het verleden ontstaan door het aanlanden van de plaat Onrust (Figuur 1-2d). Deze aanlanding vond plaats rond het jaar 1900 (Van Heteren et al, 2006, Elias en van der Spek, 2006). Het was lange tijd de verwachting dat de voorliggende bank Noorderhaaks ook met de kust van Texel zou verhelen (Figuur 1-2d). Een zichtbare bankaanlanding is echter tot op heden niet opgetreden, maar een langgerekte bank, de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks, die zich ver langs de kust van Zuidwest Texel uitstrekt is gevormd. Deze Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks verheelt zich via een ondiep platform, gelegen op een diepte van ongeveer -5 m, met de kust. Het zandvolume in het 'natte' kustprofiel op een diepte van -5 m neemt hier wel toe en de diepere kustzone van het eiland wordt gevoed, maar op het strand is er weinig effect terug te zien. Hier zijn nog steeds frequent terugkerende suppleties benodigd om de kustlijn te handhaven (Elias et al., 2021).

Een hypothese tussen het verschil in bankaanlanding tussen bijvoorbeeld Texel en Ameland is de hoogte van de aanlandingsbanken en de rol van de golfgedreven processen. Alleen als de banken hoog genoeg worden, kunnen deze door golfgedreven processen naar de kust toe migreren en verhelen. Als de banken te diep liggen dan vindt vooral een uitsmeren van het sediment plaats over het buiten-deltaplatform en geen bankverheling.

Herstel van de kustlijn, zodat een ligging zeewaarts van de BKL wordt verkregen, kan worden bereikt door suppleren. Er bestaat echter ook de mogelijkheid dat er in de toekomst op natuurlijke wijze herstel optreedt. Zeewaarts van de probleemzone, op het buitendeltaplatform (Plaatgronden) bevinden zich meerdere banken die bij aanlanding het zandvolume van de kustlijn mogelijk kunnen herstellen tot zeewaarts van de BKL. Dit herstel is echter alleen mogelijk als er ook voldoende zand in de banken aanwezig is. De doelstelling van deze rapportage is de volumes van de aanlandingsbanken te kwantificeren, om zo een beter begrip van de mogelijke toekomstige kustlijnontwikkeling te verkrijgen.

Om deze doelstelling te bereiken zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

1. Hoe kunnen de volumes van aanlandingsbanken worden gekwantificeerd?
2. Wat zijn de volumes in de huidige aanlandingsbanken van de Zoutkamperlaag?
3. Hoe verhouden de huidige volumes zich tot eerder opgetreden aanlandingen (zoals die van de Strandhaak)?
4. Wat was de respons van de eilandkop op de eerdere aanlanding?
5. Wat is de te verwachten respons van de eilandkop op een eventuele nieuwe aanlanding?

1.3 Opbouw van het onderzoek

In navolging van deze inleiding volgen drie inhoudelijke hoofdstukken. In Hoofdstuk 2 wordt een overzicht gepresenteerd van de bodemdata en de gehanteerde analysemethode. Hoofdstuk 3 geeft de kwantificering van de aanlandingsbanken over de langere termijn (1926-2019) en voor de huidige situatie (2000-2019). De verkregen inzichten vormen de basis voor de conclusies en aanbevelingen in Hoofdstuk 4.

2 Bodemdata en methode

2.1 Bodemdata

De basis van deze studie wordt gevormd door de Vaklodingen bodemdata. De Vaklodingen zijn gebiedsdekkende rasters die tot ongeveer de -20m NAP lijn zijn ingemeten. De metingen worden uitgevoerd met een single-beam echosounder, waarbij raaien met vast raster worden ingewonnen. De raaien liggen op ongeveer 200 m afstand en in iedere raai wordt in een bemonsteringsafstand van 5 meter geregistreerd. Na inwinning van de dieptelodingen worden complete kaarten opgebouwd door de lodingen aan te vullen met de waterpassingen en tegenwoordig LiDAR metingen van de droogvallende platen in de Waddenzee en de Jarkus metingen van de kust. De opgevulde datasets worden met behulp van het programma Digipol (Digipol, 1997) geïnterpoleerd naar de hoekpunten van een 20x20 m rooster en vervolgens opgeslagen als Vaklodingen kaartbladen. De Vaklodingen worden niet jaarlijks ingewonnen, maar worden gefaseerd uitgevoerd. In de Waddenzee wordt, van west naar oost, jaarlijks één bekken ingemeten. Elke zes jaar is er dan een volledige opname van de Waddenzee. In de kustzone is de dynamiek van de geulen en platen groter en daarom wordt deze in 3-jaarlijks interval opgenomen.

De bodemdata beschikbaar voor het Friesche zeegat kan nog onderverdeeld worden in twee delen. De data vóór 1991 is gedigitaliseerd van minuutbladen en aangevuld met bijvoorbeeld landaanwinningsgegevens, kustmetingen en detailkaarten waar nodig. Deze pré-1991 bodems zijn geconstrueerd in het kader van het eerste Kustgenese onderzoek, zie Oost en de Haas (1992, 1993) voor details. De uiteindelijke gegevensbestanden van de dieptemetingen zijn gerasterd in een rooster met een celgrootte van 90x90 meter. Sinds 1991 is de data in hogere resolutie (20x20 m) en frequentie beschikbaar. In totaal zijn er 20 bodemkaarten te maken over de periode 1926-2019 (zie Appendix A, Figuur A- 1 en Figuur A- 2). Met uitzondering van een deel van duinenrij, worden de eilanden niet ingewonnen. In de 1987 – 2019 bodemkaarten is het AHN (cyclus 3) gebruikt om de eilanden in te vullen. Deze invulling is alleen voor de visualisatie maar heeft verder geen waarde in de volumeberekening.

Alle bodemdata, contourlijnen en -klassen gehanteerd in deze studie zijn relatief ten opzichte van NAP.

2.2 Methode

Het kwantificeren van sedimentvolumes in (aanlandings)banken vereist een andere methode van analyse dan de in het verleden uitgevoerde sedimentbalansstudies. Sedimentbalansen worden over het algemeen op twee manieren berekend. In de studies zoals gerapporteerd in bijvoorbeeld Elias et al. (2012, 2016, 2018) en Oost en de Haas (1992, 1993) worden de sedimentbalansen opgelost door de verandering in hoogte tussen twee opeenvolgende metingen te bepalen en deze te vermenigvuldigen met het oppervlakte. Een alternatieve manier is het berekenen van de verandering in watervolume ten opzichte van een gekozen referentieniveau (bijvoorbeeld Elias et al. 2022; Schrijver, 2021). De verandering in nat oppervlakte kan ook worden gezien als een verschil in sedimentvolume; het natte oppervlakte wordt groter bij erosie en kleiner bij sedimentatie. Beide methoden geven wel een inzicht in de verandering in sedimentvolumes door de tijd, maar geven geen schatting van het aanwezige sediment volume. Met andere woorden, een volumeverandering van een aanlandingsbank kan wel worden berekend, maar niet hoeveel zand er nu echt in de bank bevindt. Hierdoor zijn deze methodes niet direct geschikt voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag in deze studie.

Bepaling van de beschikbare zandvolumes in de aanlandingsbanken vereist een andere methode van analyse. De sedimenthoeveelheid kan alleen berekend worden door een referentievlak te kiezen. Per bodemmeting kan dan de sedimenthoeveelheid ten opzichte van dit referentievlak worden bepaald. De keuze van het referentievlak bepaald in grote mate ook het aanwezige sedimentvolume. Het volume neemt toe naarmate het vak dieper gekozen wordt. Deze methode geeft wel een totaal volume maar geen inzicht in de sedimentvolumes van de aanlandingsbanken.

In de studie van Pearson et al. (2022) wordt een definitie gehanteerd op basis van de minimum bodemligging. Deze minimum is daarbij gedefinieerd als de onderkant van de morfologische enveloppe voor een bepaalde tijdperiode en geldt daarbij als referentieniveau. Het sediment dat zich onder deze minimum bodem bevindt is over de beschouwde periode niet veranderd en heeft dus niet deelgenomen aan de morfologische veranderingen (de passieve bodemlaag). Alleen het deel van de bodem dat zich boven de minimum bodemligging bevindt neemt deel aan de morfologische verandering (de actieve bodemlaag). Het is bij bepaling van de minimum bodemligging van belang dat de periode van analyse aansluit bij de morfologische processen die van belang zijn. De minimum bodem ligt over het algemeen lager naarmate de tijdperiode langer wordt. Dit wordt veroorzaakt doordat op langere tijdschalen steeds grotere morfologische veranderingen optreden, zoals de verplaatsing van de geulen.

Het verschil tussen de gemeten bodemligging en de minimum bodemligging geeft dan een schatting van de hoeveelheid sediment, de dikte van het sedimentpakket, die zich in de morfologisch actieve laag bevindt. Let hierbij op dat de sedimenthoeveelheid in de actieve zone dus niet de toekomstige sedimentvoorraad weergeeft. Bij een structureel eroderend gebied (bijvoorbeeld een terugtrekkende eilandkop) is de minimumbodem vrijwel gelijk aan de huidige bodem. Dit betekent dat het sedimentvolume van de huidige bodem dan nihil is.

In deze studie wordt de methode van actieve laagdikte toegepast. De uitwerking hiervan is weergegeven in Figuur 2-1. De analyse bestaat uit 5 stappen.

Stap 1 – Optimalisatie van de bodemdata (Figuur 2-1A)

De Vaklodingen zijn gebruikt als basis voor de bodemkaarten. Missende datapunten zijn daarbij zo veel mogelijk ingevuld door het gebruik van aanvullende datasets (bijvoorbeeld Jarkus of LiDAR) of door interpolatie. In de jaren 2000, 2006, 2012 en 2019 zijn zowel metingen van buitendelta als bekken beschikbaar. In de jaren 2003, 2009 en 2015 is alleen de buitendelta opgenomen (zie Appendix A, Figuur A-2). De totale tijdserie van alle kaarten en de tijdserie van de volledig gevulde kaarten worden apart opgeslagen.

Stap 2 – Bepaling van de referentiebodem (Figuur 2-1B)

Bij de bepaling van de minimum bodem wordt per rasterpunt van het bodembestand gekeken of er in alle jaren een bodemwaarde aanwezig is. Als een waarde ontbreekt in één van de jaren wordt het punt niet meegenomen in de analyse. Het is daarom belangrijk om de gebruikte bodemdata daarom zo volledig mogelijk te maken voor aanvang van de analyse (zie Hoofdstuk 2.1). In het voorbeeld weergegeven in Figuur 2-1B is de minimum bodem berekend over de periode 2000-2019 voor de volledig gevulde kaarten en in Figuur 2-1C voor de volledige dataset van de buitendelta en kust.

Stap 3 - Afbakening van het studiegebied (Figuur 2-1C)

Fouten in de volumebepaling door een wisselende dekking van bodemkaarten worden voorkomen in stap 1 door optimalisatie van de bodemkaarten en in stap 2 door het niet meenemen van de missende datapunten in de minimumbodem.

Naast het elimineren van de missende datapunten moet ook een ruimtelijk begrenzing van het studiegebied worden vastgesteld (Figuur 2-1D). Aan de zeezijde is ervoor gekozen de -10m contour te gebruiken als scheiding tussen vooroever en buitendelta. De diepe vooroever (dieper dan -10m) lijkt hier gevoelig te zijn voor meetfouten (Elias, 2018). Het niet meenemen van deze zone voorkomt dat de resultaten van de analyse hierdoor beïnvloed worden. De oostelijke en westelijke begrenzing is zodanig gekozen dat de buitendelta binnen het gebied ligt, maar de centrale eilandkust niet. In het bekken is de begrenzing gekozen op de 2019 wantijligging. Deze begrenzingen liggen vast voor alle uitgevoerde analyses. In de studie van de aanlandingsbanken is de keuze van deze begrenzing verder niet belangrijk. De grenzen liggen ver genoeg weg van het interessegebied. Afhankelijk van het doel van de studie kan het wel nodig zijn deze vaste begrenzing anders te kiezen. Zo is het bijvoorbeeld logisch om in een balansstudie van het bekken, de wantijligging voor iedere bodem te bepalen en deze als grens te gebruiken.

Een nadeel van de hier gekozen begrenzingen is dat een directe vergelijking van de grootschalige volumeveranderingen van de Zoutkamperlaag met eerder uitgevoerde studies niet mogelijk is.

Stap 4 – Berekening dikte sedimentpakket (Figuur 2-1D)

Voor iedere bodemkaart wordt het verschil met de minimum bodem uitgerekend. Dit verschil is de dikte van de actieve sedimentlaag in de beschouwde tijdsperiode (Figuur 2-1D). Voor verschillende deelpolygonen kan dan de sedimenthoeveelheid uitgerekend worden.

Stap 5 – Kwantificering van de volumes (Figuur 2-1E)

Kwantificering van de volumes is gebaseerd op het maken van representatieve polygonen. Een voorbeeld van deze polygonen op de schaal van het gehele zeegat is gegeven in Figuur 2-1E. De polygonen maken onderscheid in de twee deelsystemen Pinkegat (rood) en Zoutkamperlaag (groen) op basis van de -6 m contourlijn. De -6 m contour is de diepste contourlijn waarbij de buitendelta's nog duidelijk te scheiden zijn. In het bekken is deze -6m contourlijn gevolgd. Dit betekent dat de geulwand van de Zoutkamperlaag de scheiding vormt tussen de 2 deelsystemen. Naast de indeling in Pinkegat en Zoutkamperlaag is ook een onderverdeling gemaakt in diep en ondiep deel van het systeem (representatief voor geulen en platen in het bekken). Als begrenzing is daarbij de -1 m contourlijn gebruikt. Deze -1 m contourlijn geeft een continue begrenzing van geul en plaat en komt ruwweg overeen met de laagwaterlijn. Niet benodigd voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen in deze studie, maar door het volgen van zowel het plaatareaal als plaatvolume is het mogelijk veel betere schattingen van bijvoorbeeld het meegroeivermogen van deze platen te maken.¹

Het onderscheid tussen buitendelta en bekken volgt rechtstreeks uit de dekking van de meetdata (Figuur 2-2). Deze begrenzing ligt hier in het midden tussen de eilanden.

Kwantificering van de (aanlandings)banken op de buitendelta is vervolgens gebaseerd op een analyse van het gebied omsloten door de contourlijnen op -6, -5, -4 en -3 m (Figuur 2-3). Ondiepere contouren omsluiten niet de banken en zijn daarom niet geschikt voor analyse. De -6m contour representeert het gehele buitendelta platform. Het volume van het eiland is hierbij niet meegenomen. Afhankelijk van de periode van analyse is een landwaartse grens op de eilandkop gekozen op basis van de +1m (langetermijn analyse) of +2m (recente kaarten) contourlijnen. Een probleem van het gebruik van de oude bodemkaarten is het verschil in resolutie en dekking van de bodemdata. In de oudere kaarten, opgenomen vóór 1987 is de dekking van de eilanden onvoldoende, waardoor het niet mogelijk is de

¹ In Appendix B worden de resultaten van volumeberekeningen van het gehele zeegat (incl. bekken) weergegeven. Deze berekeningen zijn gemaakt als "proof-of-concept" en niet direct noodzakelijk voor het beantwoorden van de gestelde onderzoeksvragen en zijn voor de volledigheid wel toegevoegd in deze appendix.

volumeverandering van de eilandkop nauwkeurig te berekenen. De eilandkop wordt in deze analyse dan ook afgebakend door de +1 m contourlijn. De betere dekking van de recente data maakt het mogelijk om de eilandkop beter te analyseren. De volumes tot de +2 m contourlijn zijn hierin meegenomen.

De -5 m, -4 m en -3 m contouren geven in toenemende detailniveau de individuele banken van de buitendelta weer. De -5 m contour (weergegeven door het groene vlak in Figuur 2-3) representeert daarbij het volume van het grootschalige onderliggende buiten-deltaplatform. De -4 m en -3 m contouren (gele en oranje vlakken) geven de individuele banken weer. De -3 m contour is de meest ondiepe contour die nog in de kaarten te onderscheiden is, en is representatief voor de aanlandingsbanken. Dit . Zoals in Hoofdstuk 1.2 beschreven kunnen waarschijnlijk alleen de ondiepe banken zich onder invloed van de golven rechtstreeks verhelen met de kust.

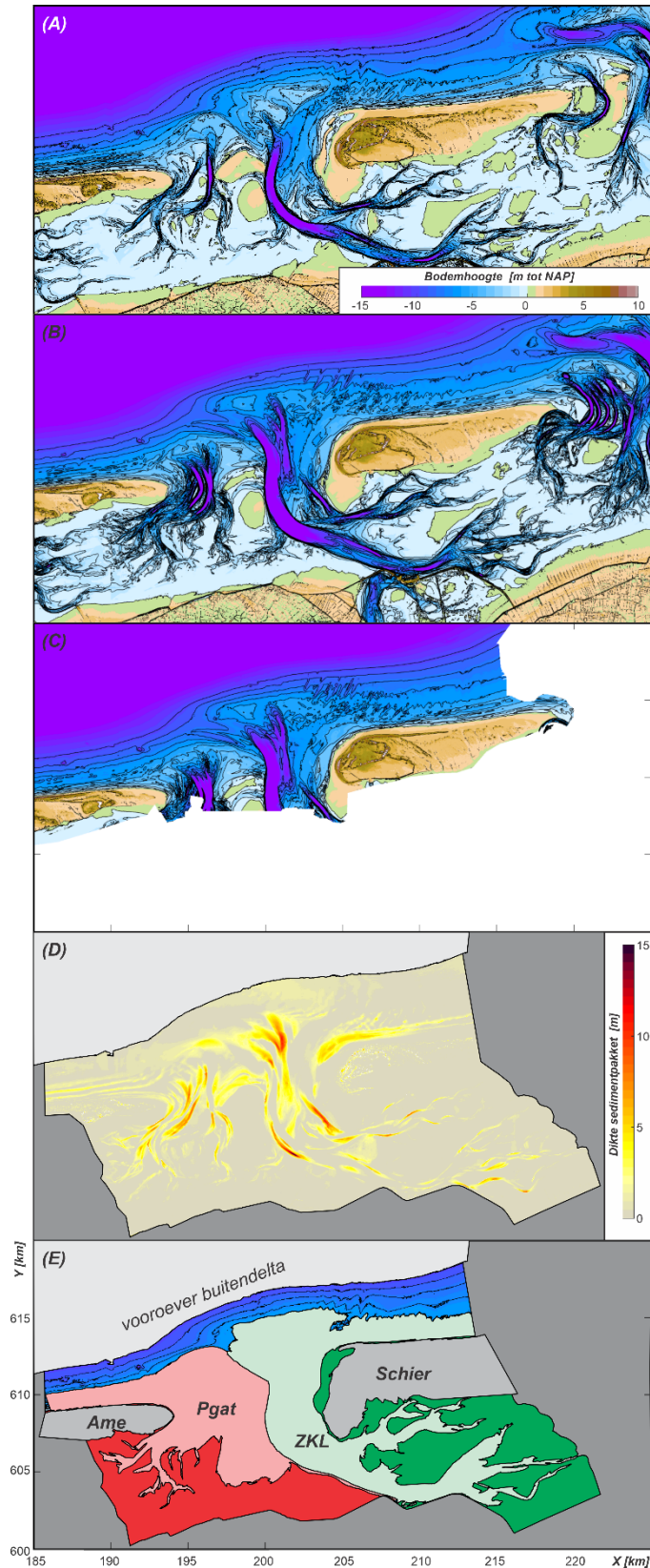
Let op:

De dikte van het sedimentpakket dat berekend wordt over verschillende perioden is niet gelijk. De langetermijn analyse berekent de sedimentdiktes ten opzichte van de minimumligging over de periode 1926-2019. De korte-termijn analyse berekent het sedimentpakket over de minimumligging van de periode 2000-2019. Deze periode is representatief voor de tijdsperiode waarop de banken zich ontwikkelen. In deze kortere periode is er minder morfologische verandering opgetreden. De minimumbodem zal dan gemiddeld ook iets hoger liggen t.o.v. de langere periode. Er is dan minder sedimentvolume in de actieve laag beschikbaar. Voor de kwantificering van de sedimentvolumeverandering maakt het verschil in actieve laagdikte geen verschil, maar voor de berekening van de totale sedimentvolumes in de actieve laag geeft dit wel een verschil.

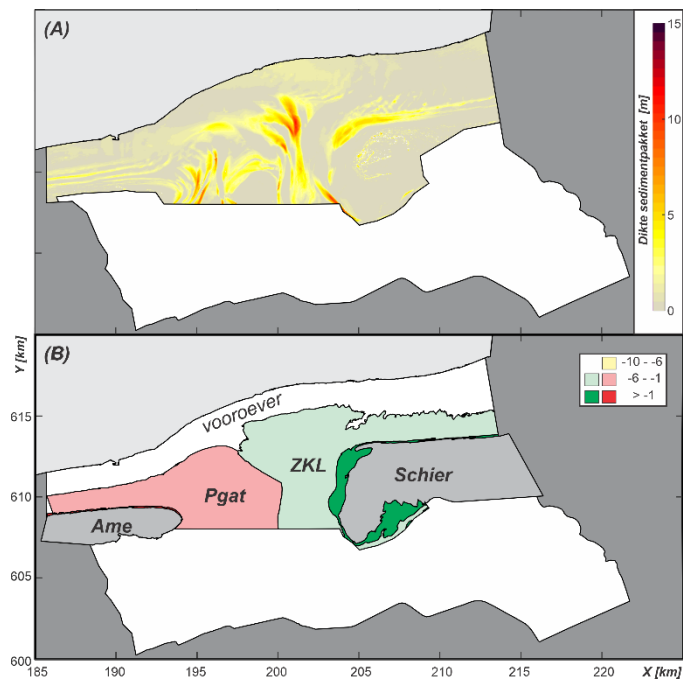
Lessons Learned:

Deze studie is de eerste toepassing van het actieve sedimentvolume in de analyses ten behoeve van KPP B&O kust. Een belangrijke conclusie is dat de methode en berekende volumes goed inzicht geeft in het mogelijke sedimentaanbod voor de kust. Een verdere toepassing en doorontwikkeling van deze methode lijkt dan ook wenselijk. Wel moet opgemerkt worden dat:

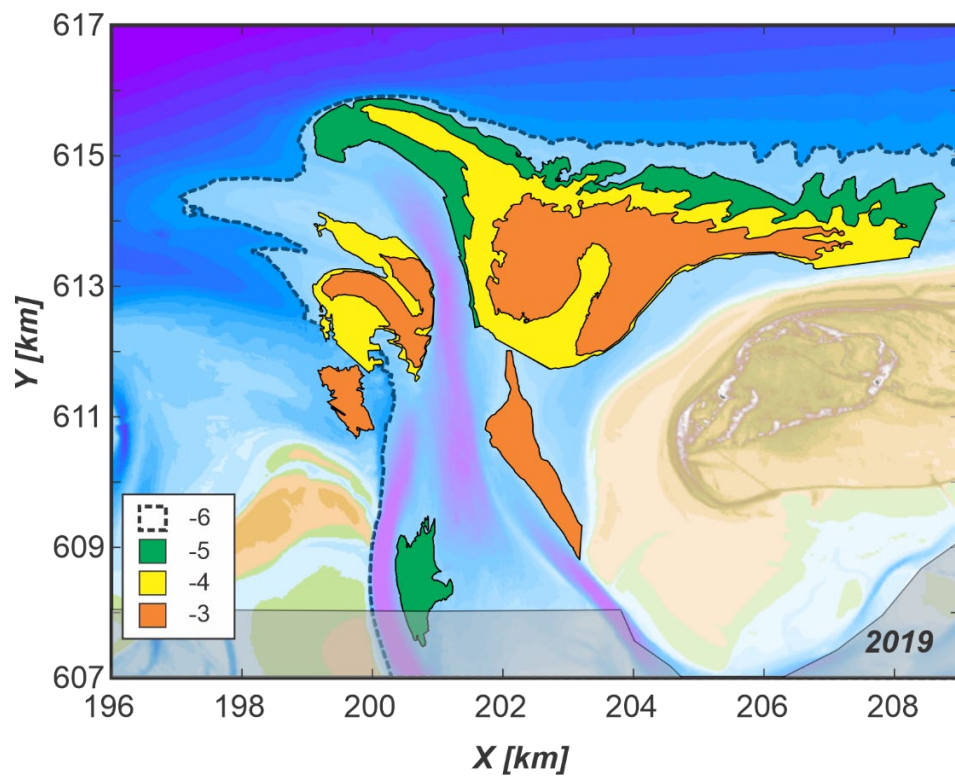
- (1) de bepaling en het analyseren van de contouren over alle verschillende jaren zeer tijdsintensief is. Hier is nog een optimalisatie nodig door bijvoorbeeld gebruik van ARC-GIS of QGIS, optimaliseren van de matlab scripts.
- (2) de keuze van de analyse periode de hoogte van het referentievlak (de minimum bodem) bepaald. Daarmee wordt ook de sedimenthoeveelheid in de actieve laag bepaald. Een langere tijdsperiode heeft de voorkeur omdat dan bijvoorbeeld periodieke morfologische mutaties van de buitendelta wordt meegenomen. Een langere tijdsperiode heeft echter ook als nadeel dat minder nauwkeurige en dekkende metingen worden toegevoegd. Dit beïnvloedt de resultaten van de volumebalans. In deze studie is dit opgelost door twee perioden te analyseren, maar gezien de benodigde inspanning is dit eigenlijk niet goed mogelijk.
- (3) het sedimentvolume in de actieve laag geeft wel inzicht in de volumes die in het verleden zijn geobserveerd, maar geven geen schatting van de in te toekomst beschikbare sedimentvolumes (het volume dat omsloten is in de passieve laag kan dat, zolang het geen harde laag is, in potentie wel). Deze toekomstige beschikbare hoeveelheid is wel relevant en dient nader uitgewerkt te worden.



Figuur 2-1: Een overzicht van de methode ter berekening van de sedimentvolumes. (A) Gemeten bodemligging in 2000. Minimum bodemligging 2000-2019 voor (B) het gehele bekken en (C) voor de buitendelta. (D) Afbakening van het studiegebied en berekende dikte van de sediment laag t.o.v. de minimum bodemligging (2000-minimum bodem), (E) Voorbeeld van deelpolygonen op bekkenschaal voor berekening van de volumes.



Figuur 2-2: Voorbeeld berekende sedimentdikte (A) en grootschalige indeling van de deelpolygonen op buitendelta schaal (B).



Figuur 2-3: Voorbeeld van de verschillende contourlijnen en banken ten behoeve van de volumebepaling van de buitendelta en de aanlandingsbanken aan de hand van de 2019 bodemligging. '-3' Markeert bijvoorbeeld de contour van het plaatareaal dat op -3 m en ondieper is gelegen. Het totale actieve sedimentvolume dat zich binnen deze contour bevindt wordt bepaald.

3 Volumebalansen

In dit hoofdstuk worden de volumebalansen van de banken op de buitendelta en het effect hiervan op de kustlijn op lange en korte termijn uitgewerkt. Begrip van de volumes en volumeverandering van de gehele buitendelta zijn gebaseerd op een analyse van de meetserie over de periode 1926-2019 (H. 3.1). Deze analyse maakt het mogelijk de effecten van de afsluiting van de Lauwerszee op de banken van de buitendelta in kaart te brengen en ook de volumes van de gevormde Strandhaak te kwantificeren. Kwantificering van de volumes in de huidige aanlandingsbanken is gebaseerd op een aanvullende analyse van de bodemkaarten over de periode 2000-2019 (H. 3.2). In deze analyse is ook de volumeontwikkeling van de eilandkop in detail meegenomen (zie H. 3.3).

3.1 Ontwikkeling van de banken op de buitendelta van de Zoutkamperlaag over lange termijn

3.1.1 Ontwikkeling van de buitendelta vóór afsluiting (1926- 1967).

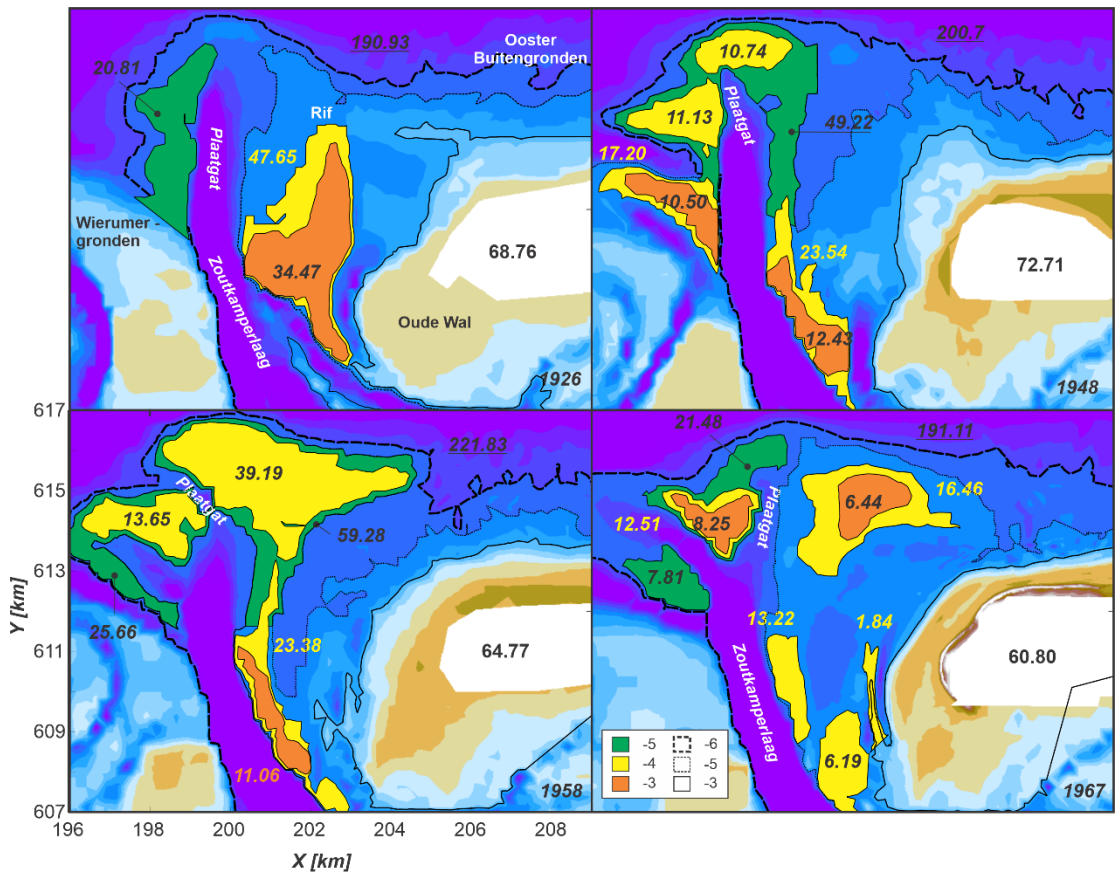
Een overzicht van de morfologische ontwikkeling van de buitendelta vóór afsluiting wordt gegeven in Elias en Oost (2020). In deze studie wordt geconcludeerd dat grootschalig de buitendelta een afwisseling van één- naar een twee-geulensysteem en terug vertoont. Deze ontwikkeling vond plaats over een tijdspanne van ongeveer 90 jaar. Het platenoppervlakte zeewaarts van de Engelsmanplaat lijkt hierbij een belangrijke rol te spelen. De cyclus bestaat uit de vorming een westelijke uitstroom van de hoofdgeul, het kloksgewijs roteren van deze geul tot een maximale noordelijke ligging en uitbouw. Binnen deze grootschalige ontwikkeling is er ook een fluctuatie in de uitstroom op kortere tijdschaal. Deze fluctuatie bestaat uit de vorming van een westelijke uitstroom van de hoofdgeul, het kloksgewijs roteren van deze regelmatig optredende uitstroming tot een maximale noordelijke ligging en uitbouw.

In de bodemopname van 1926 is een enkele hoofdgeul aanwezig (de Zoutkamperlaag). De uitstroom van de Zoutkamperlaag wordt ook wel Plaatgat genoemd (Figuur 3-1 en Figuur A-1). In deze één-geulconfiguratie is de hoofdgeul diep en strekt zich ver uit op de buitendelta. Het totale volume van de Zoutkamperlaag buitendelta tussen de -6 en +1 m is 191 miljoen m³. Op basis van de contourlijnen (-3, -4, -5 m) zijn 3 bankgebieden te onderscheiden. De -5 m contour omsluit een diepliggende langgerekte bank die zich langs de westzijde van het Plaatgat heeft gevormd. Het sedimentvolume van deze bank bedraagt 21 miljoen m³. Aan de oostzijde van de geul is er geen aparte bank te onderscheiden, hier omsluit de -5 m het gehele buiten-deltaplatform. Dit platform wordt dan nog Rif genoemd. Het volume omsloten door de -4m contour bedraagt hier 48 miljoen m³. Hiervan bevindt zich 34 miljoen m³ boven de -3 m .

In de periode 1926-1958 neemt vooral de bodemhoogte rondom de geul toe. Er ontstaan hier steeds meer en grotere banken. De -5 m contour omhult in 1958 een volume van 85 miljoen m³. Ook het volume binnen de -4 m contour is sterk toegenomen tot 76 miljoen m³. De -3 m contour vertoont een sterke afname in volume, van 34 miljoen m³ in 1926 naar 11 miljoen m³ in 1958. Deze grote veranderingen binnen de verschillende contourklassen zijn waarschijnlijk gerelateerd aan de geuldynamiek. Met name aan de westzijde ontstaan nieuwe geulen die de banken efficiënt opruimen en het sediment aan de voorzijde van de geul, in het ebschild, afzetten.

De bodem van 1967, net voor afsluiting van de Lauwerszee, vertoont een Zoutkamperlaag met meerdere uitstroomopeningen de buitendelta op. Deze uitstroomgeulen hebben het

buitendelta platform doorsneden en er zijn meerdere kleinere en hogere plaatoppervlakten ontstaan (Figuur 3-1). Het totale volume van het buiten-deltaplatform is met 191 miljoen m³ vrijwel identiek aan het 1926 volume. Een verschil is wel de ligging van de banken. In 1926 was er een grote bank zichtbaar op het Rif met een volume van 48 miljoen m³. Deze grote bank is in 1967 niet meer aanwezig, maar het totale volume van 50 miljoen m³ sediment in de kleinere banken is vrijwel gelijk. Het volume binnen de -3 m contourlijn ligt met 14 miljoen m³ aanzienlijk lager in vergelijking tot 1926.

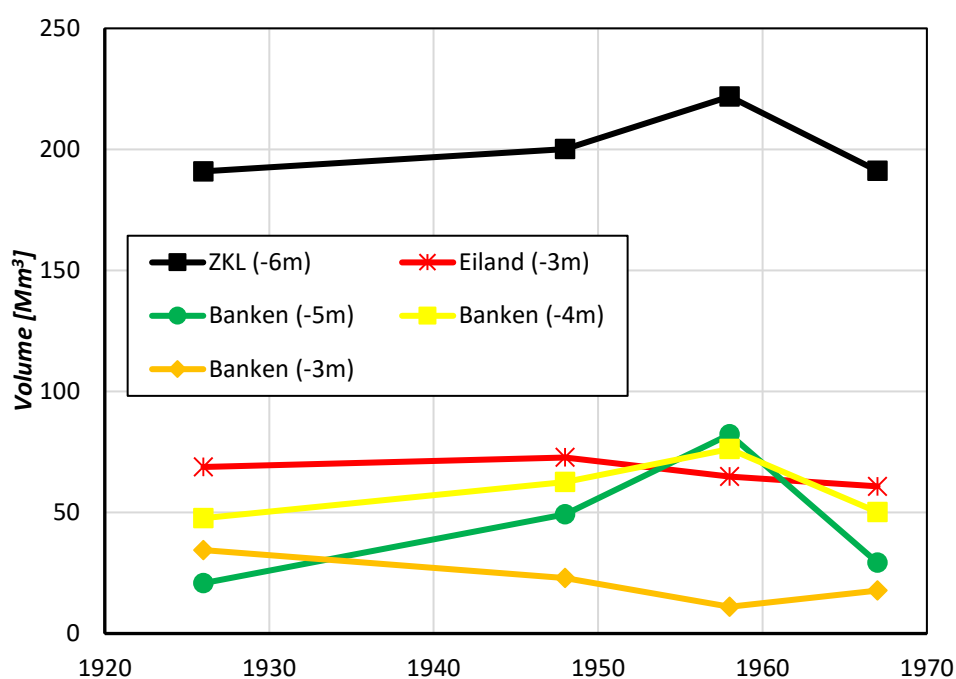


Figuur 3-1: Volumeontwikkeling van geselecteerde contouren en banken tussen 1926 en 1967. Volumes op basis van de periode 1926-2019. Onderstreepte volume is het totale volume van de buitendelta van de Zoutkamperlaag.

Tabel 3-1: Overzicht van de buiten-deltavolumes (in miljoen m³) vóór afsluiting van de Lauwerszee (1926-1967). Volumes bepaald t.o.v. de minimumbodem over de periode 1926-2019.

Jaar	Buiten-deltaplatform ⁽¹⁾	Eilandkop ⁽²⁾	Banken ⁽³⁾		
	-6m tot +1m	-3m tot +1m	-5 m	-4 m	-3 m
1926	190.93	68.76	20.81	47.65	34.47
1948	200.07	72.71	49.22	62.61	22.93
1958	221.83	64.77	82.23	76.22	11.06
1967	191.11	60.8	29.29	50.22	17.72

- (1). Buiten-deltaplatform (zwarte lijn in Figuur 3-2) geeft het volume weer tussen de -6m contourlijn aan de zeezijde en de +1 m contour van het eiland. Dit is dus inclusief alle bankvolumes.
- (2). Eilandkop (rode lijn in Figuur 3-2) geeft het volume weer tussen de -3 m contourlijn aan de zeezijde en de +1 m contour van het eiland. De banken buiten deze -3 m contour worden hierbij niet meegenomen in de analyse.
- (3) Banken (groen, oranje en gele lijnen in Figuur 3-2) is het volume omsloten door de betreffende contourlijn en niet het volume tussen de contourlijnen. In het volume omsloten door de -5m contourlijn zitten dus ook de volumes van de ondiepere contouren.



Figuur 3-2: Overzicht van het sedimentvolume ontwikkeling vóór afsluiting van de Lauwerszee (1926-1967). ZKL = Buitendelta Zoutkamperlaag tussen -6m en de +1m contour, Eiland = Eilandkop tussen -3m en +1m contour.

3.1.2 Ontwikkeling van de buitendelta ná afsluiting (1967-heden)

Vorming van de Strandhaak (1967 – 1991)

Ontwikkelingen van banken op de buitendelta ná afsluiting van de Lauwerszee worden geïllustreerd in Figuur 3-3. Net vóór afsluiting liggen er al een grote banken op de buitendelta. Deze banken worden dan nog gescheiden door de uitstroming van de Zoutkamperlaag (het Plaatgat) en worden nu Plaatgronden of Gronden van het Plaatgat genoemd. Het totale volume van deze banken, op basis van de -4 m contour, is 29 miljoen m³. Direct na afsluiting (1971) is de uitstroomegeul noordwestelijk gericht en liggen beide banken ten westen van de geul. De meest westelijke bank heeft zich dan al ver richting de kop van Schiermonnikoog uitgestrekt. Het totale volume in de twee banken is toegenomen tot 33 miljoen m³. Ruwweg 8 miljoen m³ bevindt zich boven de -3 m contour. De opeenvolgende bodems (1971-1987) laten de ontwikkeling van de Strandhaak zien (Figuur 3-3). Het volume omsloten door de -3 m contour neemt toe tot 20 miljoen m³ in 1975 en 23 miljoen m³ in 1979. Het volume in de periode 1979-1981 blijft dan behouden op 23 miljoen m³. Wel veranderen de banken van vorm en ontstaat in 1987 een haakvormige bank. Het volume van de Strandhaak bedraagt op basis van de -4 m contour 30 miljoen m³ en op basis van de -3 m contour 23 miljoen m³. De zuidelijke punt van de Strandhaak maakt in 1991 verbinding met de kust. Binnen de omhullende van de -3 m contourlijn is dan een volume van 27 miljoen m³ aanwezig. De volumetoename van de kust in 1991 is hoger dan het volume van de Strandhaak in 1987. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat de 1991 polygoon ook een deel van de eilandkop meeneemt in de volumebepaling.

Het totale volume omsloten door de -3 m en +1 m contour (eilandkop + banken) neemt sterk toe tussen 1971 en 1975, van 56 miljoen m³ naar 79 miljoen m³, maar blijft sindsdien vrijwel gelijk. In 1991 ligt het volume op 79 miljoen m³. Het totale sedimentvolume van de buitendelta is in deze periode wel afgenomen van 182 miljoen m³ in 1971 naar 154 miljoen m³ in 1991. Deze afname is gerelateerd aan het opruimen van een deel van de buitendelta en het daarmee gepaard gaande opvullen van het bekken, als gevolg van het afsluiten van de Lauwerszee.

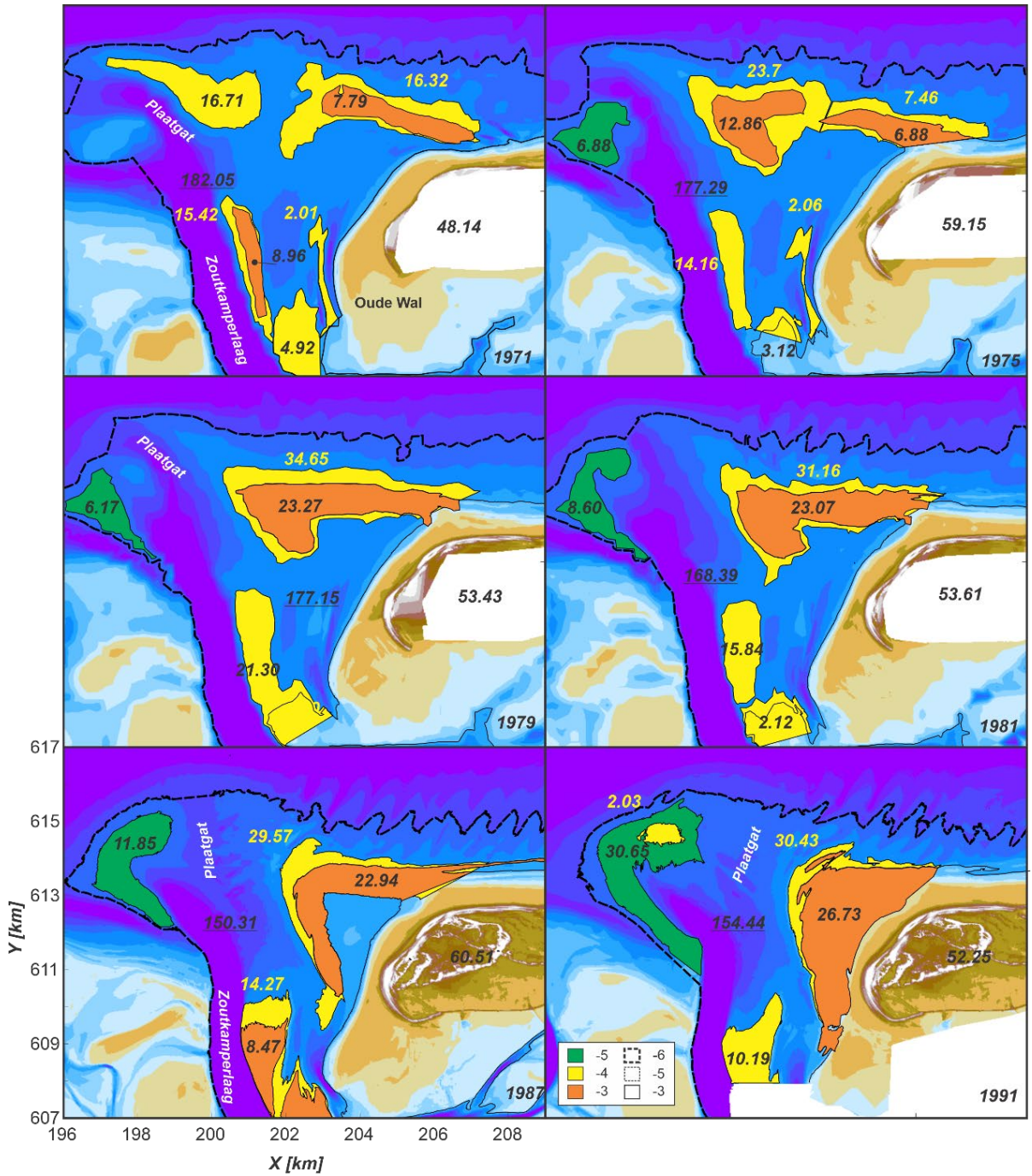
Tabel 3-2: Overzicht van de buiten-deltavolumes (miljoen m³) ná afsluiting van de Lauwerszee (1971-1991).

Jaar	Buitendelta platform	Eilandkop ⁽²⁾	Banken ⁽³⁾		Eilandkop + banken -3m
	-6m tot +1m ⁽¹⁾	-3m tot +1m ⁽²⁾	-4 m	-3 m	
1971	182.05	48.14	33.03	7.79	55.93
1975	177.29	59.15	31.16	19.74	78.89
1979	177.15	53.43	34.65	23.27	76.7
1981	168.39	53.61	31.16	23.07	76.68
1987	150.31	60.51	29.57	22.94	83.45
1991	154.44	52.25	30.43	26.73	78.98

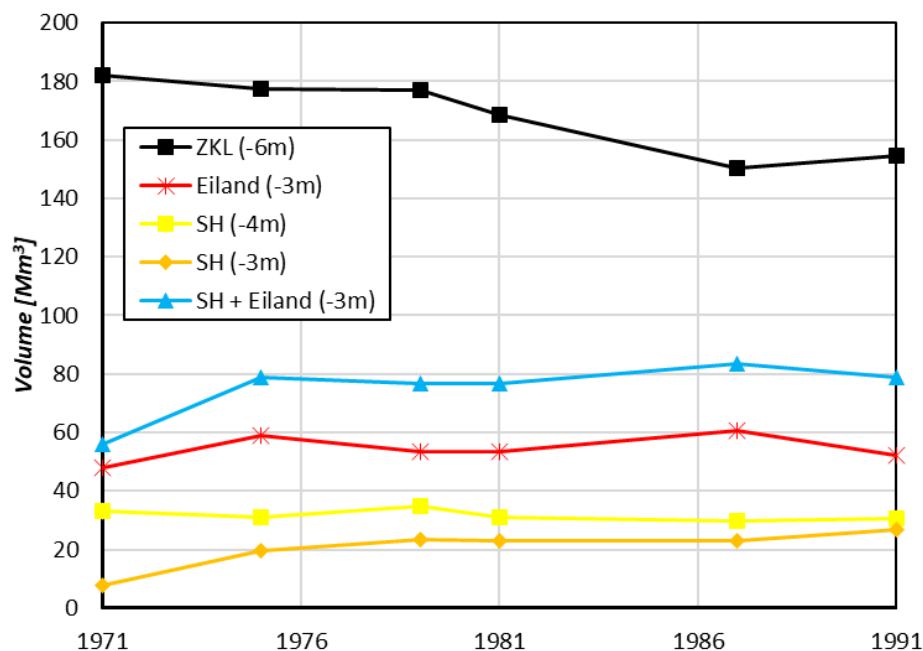
(1). Buien-deltaplatform (zwarte lijn in Figuur 3-3) geeft het volume weer tussen de -6m contourlijn aan de zeezijde en de +1 m contour van het eiland. Dit is dus inclusief alle bankvolumes.

(2). Eilandkop (rode lijn in Figuur 3-3) geeft het volume weer tussen de -3 m contourlijn aan de zeezijde en de +1 m contour van het eiland. De banken buiten deze -3 m contour worden hierbij niet meegenomen in de analyse. Het totale volume inclusief banken is weergegeven in de meest rechterkolom.

(3) Banken (groen, oranje en gele lijnen in Figuur 3-3) is het volume omsloten door de betreffende contourlijn en niet het volume tussen de contourlijnen. In het volume omsloten door de -5m contourlijn zitten dus ook de volumes van de ondiepere contouren.



Figuur 3-3: Volumeontwikkeling van geselecteerde contouren en banken tussen 1971 en 1991. Volumes op basis van de periode 1926-2019. Onderstreepte volume is het totale volume van de buitendelta.



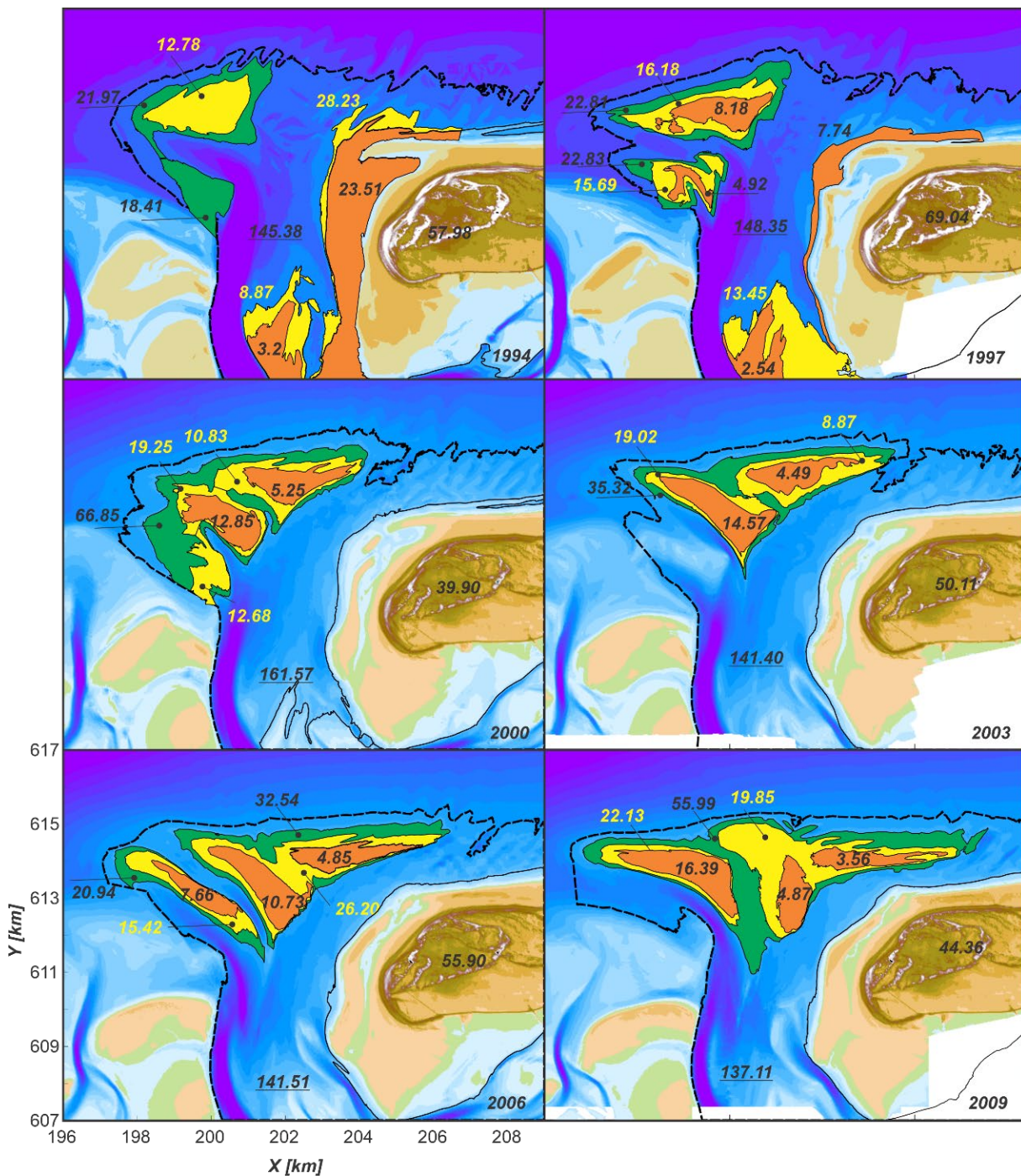
Figuur 3-4: Overzicht van het sedimentvolume ontwikkeling ná afsluiting van de Lauwerszee (1971-1991). ZKL = Buitendelta Zoutkamperlaag tussen -6m en +1m contour, SH = Strandhaak op basis van -4m of -3 m contour, Eiland = Eilandkop tussen -3m en +1m contour.

Verheling van de Strandhaak en vorming van recentere aanlandingsbanken (1991 – heden).

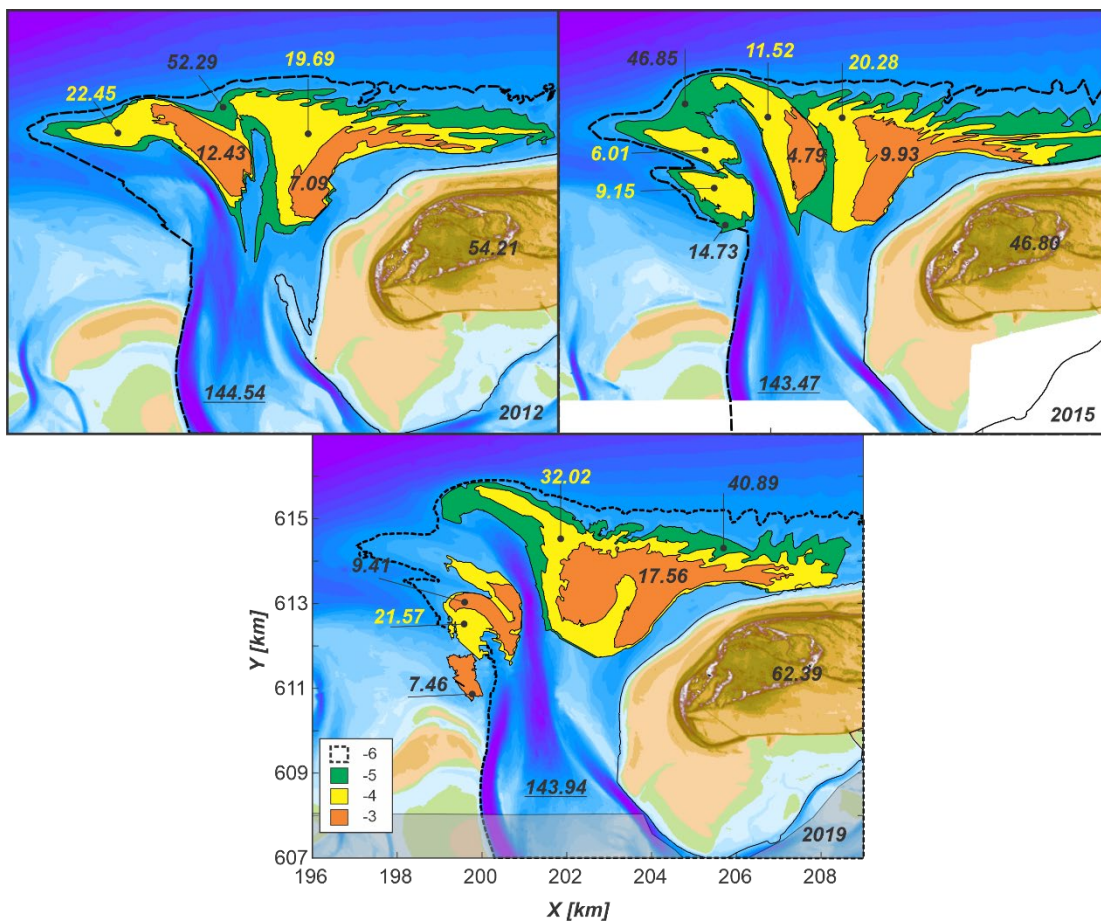
Na aanlanding in 1991 neemt het volume van de aangelande Strandhaak verder af (Figuur 3-5 en Figuur 3-6) en beginnen op de buitendelta de huidige aanlandingsbanken te vormen. Een analyse van de ontwikkeling van de eilandkop wordt in H. 3.2 gegeven. In deze paragraaf ligt de focus op de vorming van de aanlandingsbanken (zie Elias en Oost, 2021). Deze aanlandingsbanken ontstaan uit de banken die zich aan de noordwestzijde van de buitendelta vormen. Rond het Westgat is in 1994 een grote diepe bank gevormd met een volume van 40 miljoen m³ omsloten door de -5 m contour (Figuur 3-5). De banken nemen in hoogte en volume toe en migreren oostelijk. In 2009 is dan een groot ondiep platform ontstaan met een volume van 56 miljoen m³ binnen de -5 m contour. Op dit platform zijn een 3-tal kleinere banken (-3 m contour) gevormd met een totaal volume van 24 miljoen m³. Deze banken vormen de basis voor de aanlandingsbanken en verplaatsen tussen 2009 en 2019 verder landwaarts (Figuur 3-6). Het volume omsloten door de -5 m contour neemt in deze periode af tot 41 miljoen m³. De oostelijk uitbouw van deze contour geeft een indicatie dat een deel van dit sediment oostelijk verplaatst is. Het heeft hierbij waarschijnlijk bijgedragen aan de uitbouw van de eilandstaart van Schiermonnikoog (Elias, 2021).

De 3 kleinere ondiepe banken zijn tussen 2009 en 2019 geconsolideerd in 1 grotere aaneengesloten bank dat zich direct voor noordwestkop van Schiermonnikoog bevindt (Figuur 3-6). Het volume van deze bank ligt dan op 18 miljoen m³.

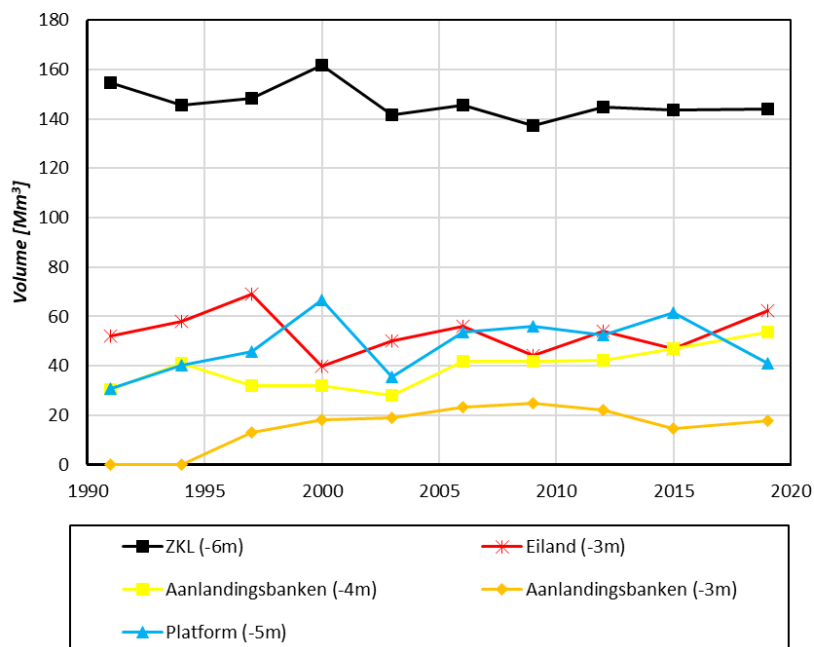
Een gedetailleerde analyse van de volumeontwikkeling van de eilandkop en aanlanding banken wordt in het volgende hoofdstuk gegeven. Deze analyse wordt uitgevoerd op de recente metingen. Doordat deze beter dekkend en met hogere resolutie zijn ingemeten geeft dit een nauwkeuriger beeld dan de analyse gebaseerd op de totale tijdserie.



Figuur 3-5: Volumeontwikkeling van geselecteerde contouren en banken tussen 1994 en 2009. Volumes op basis van de periode 1926-2019. Onderstreepte volume is het totale volume van de buitendelta.



Figuur 3-6: Volumeontwikkeling van geselecteerde contouren en banken tussen 2012 en 2019. Volumes op basis van de periode 1926-2019. Onderstreepte volume is het totale volume van de buitendelta.



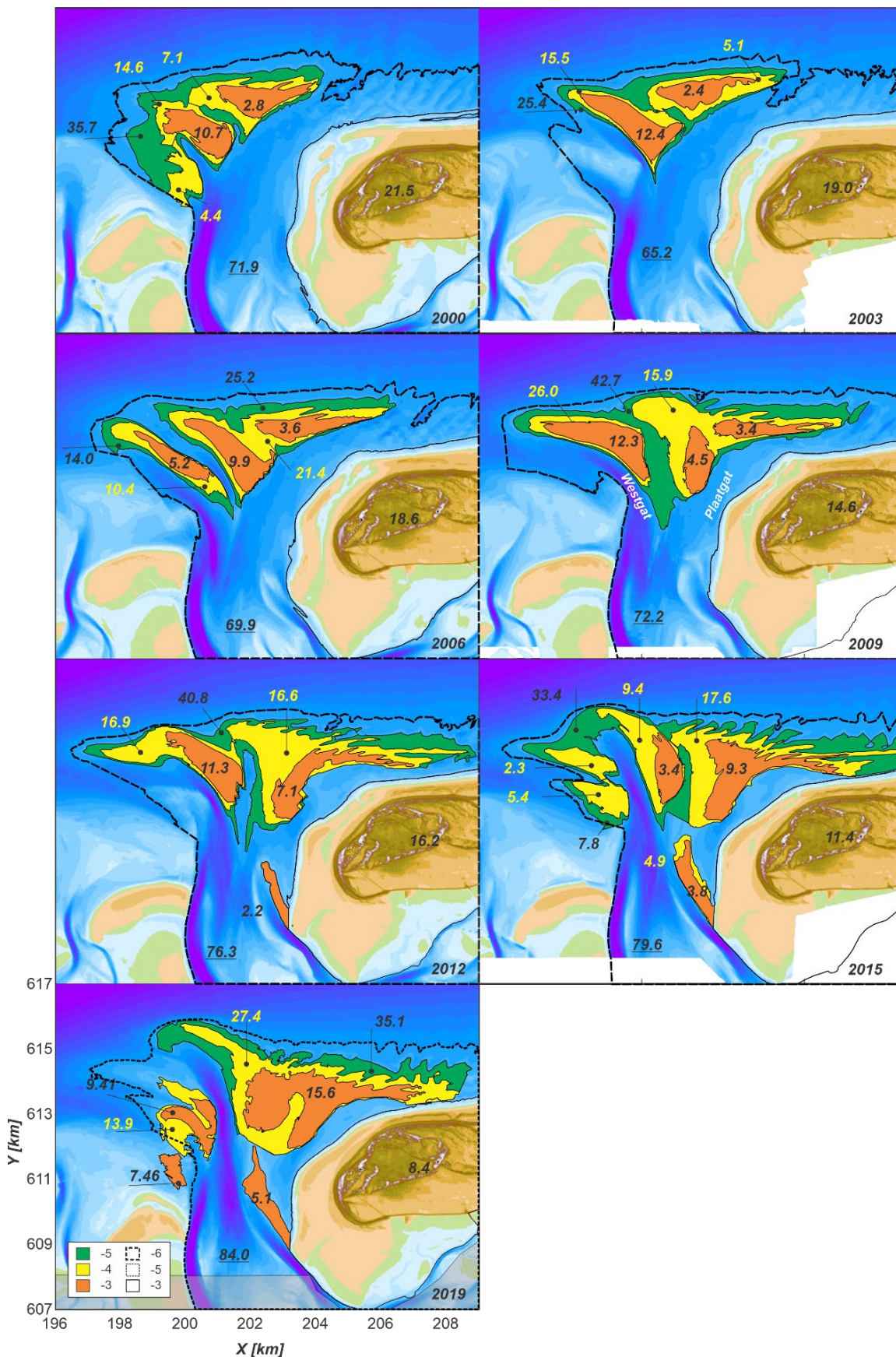
Figuur 3-7: Overzicht van het sedimentvolume ontwikkeling ná afsluiting van de Lauwerszee (1991-2019). ZKL = Buitendelta Zoutkamperlaag tussen -6 m en +1 m contour, Aanlandingsbanken en buitendelta-platform op basis van de -5 m, -4 m of -3 m contour, Eiland = Eilandkop tussen -3 m en +1m contour.

3.2 De recente ontwikkeling de buitendelta en aanlandingsbanken (2000-2019)

Gedetailleerde volumeontwikkelingen van de eilandkop en banken representatief voor de huidige situatie zijn uitgevoerd over de periode 2000-2019.

Op basis van de volumeontwikkeling over de periode 2000-2019 kan worden geconcludeerd dat de totale buitendelta inclusief eilandkop in volume toeneemt sinds 2003 (Figuur 3-8 en Figuur 3-9). Deze toename bedraagt 8 miljoen m³. De toename van de zone tussen -6 en -3 m is veel hoger (19 miljoen m³). De eilandkop vertoont echter erosie (11 miljoen m³) ofwel -0.7 miljoen m³/jaar. Ten opzichte van de 2000 bodem is het volume van de buitendelta juist iets afgenomen. Dit komt door de grote afname in volume tussen 2000 en 2003. Het is echter de vraag of deze afname ook werkelijk heeft opgetreden (zie vorige hoofdstuk). In het vervolg van dit hoofdstuk worden de veranderingen dan ook t.o.v. 2003 beschreven.

Op basis van de -5, -4 en -3 m contourlijnen kunnen de veranderingen in de banken van de buitendelta worden gekwantificeerd (Figuur 3-8). Het grootschalige platform, de omhullende van de -5 m contour) neemt met 10 miljoen m³ toe sinds 2003. Ook de aanlandingsbanken op basis van de -4 m contour vertonen een toename (6 miljoen m³). Het sedimentvolume in de ondiepe banken (de -3 m contour) blijft vrijwel gelijk. De volumes nemen tot 2009 eerst toe, + 5 miljoen m³ om vervolgens weer met een vrijwel gelijk volume af te nemen. Wel ontstaat aan de zuidwestzijde van de eilandkop nog een langgerekte bank waarvan het volume toeneemt van 2,2 miljoen m³ in 2012 tot 5,1 miljoen m³ in 2019.

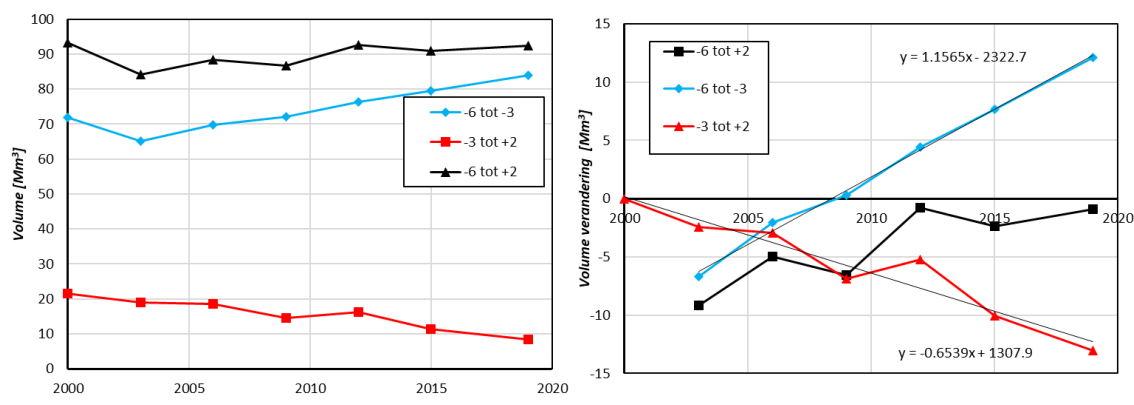


Figuur 3-8: Volumeontwikkeling van geselecteerde contouren en banken tussen 2000 en 2019. Volumes op basis van de periode 2000-2019. Onderstreepte volume is het totale volume van de buitendelta tussen de -6m en -13m. Volumes op de eilanden geven het volume weer tussen de -3m en +2m.

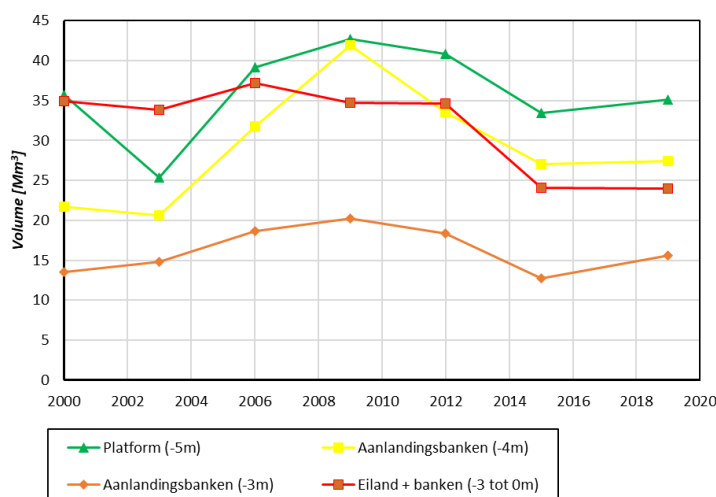
Tabel 3-3: Overzicht van de buiten-deltavolumes (in miljoen m³) over de periode 2000-2019.

Jaar	Buitendelta platform		Eilandkop	Banken			Eilandkop + banken -3m
	-6 tot +2m ⁽¹⁾	-6 tot -3 m ⁽²⁾	-3 tot +2m ⁽³⁾	-5m	-4 m	-3 m	
2000	93.34	71.89	21.45	35.7	21.7	13.5	34.95
2003	84.19	65.19	19	25.4	20.6	14.8	33.8
2006	88.36	69.85	18.51	39.2	31.8	18.7	37.21
2009	86.75	72.19	14.56	42.7	41.9	20.2	34.76
2012	92.53	76.33	16.2	40.8	33.5	18.4	34.6
2015	90.98	79.56	11.42	33.4	27	12.7	24.12
2019	92.4	84	8.4	35.1	27.4	15.6	24

- (1). Buien-deltaplatform (zwarte lijn in Figuur 3-9) geeft het volume weer tussen de -6m contourlijn aan de zeezijde en de +2 m contour van het eiland. Dit is dus inclusief alle bankvolumes.
- (2). Buien-deltaplatform -6 tot -3 m (blauwe lijn in Figuur 3-9) is het volume tussen deze twee contouren. Dit is exclusief de eilandkop en inclusief de buiten-deltabanken.
- (2). Eilandkop -3 tot 0 m (rode lijn in Figuur 3-9) geeft het volume weer tussen de -3 m contourlijn aan de zeezijde en de 0 m contour van het eiland. De banken buiten deze -3 m contour worden hierbij niet meegenomen in de analyse. Het totale volume binnen de -3 m contour inclusief banken is weergegeven in de meest rechterkolom.
- (3) Banken (Figuur 3-10) is het volume omsloten door de betreffende contourlijn en niet het volume tussen de contourlijnen.



Figuur 3-9: Overzicht van het sedimentvolumes (links) en volumeveranderingen(rechts) over de periode 2000-2019 voor het buiten-deltaplatform tussen de -6m en +2m contouren.



Figuur 3-10: Sedimentvolumes van het buiten-deltaplatform (-5m contour), de aanlandingsbanken aan de hand van de -4 en -3m contourlijnen en totale volume van banken en eilandkop tussen de -3m en +2m.

3.3 Volumeverandering van de eilandkop van Schiermonnikoog

De eilandkop van Schiermonnikoog is in detail geanalyseerd voor verschillende diepteklassen tussen de -3 en +2 m (Figuur 3-11, Figuur 3-12 en Figuur 3-13).

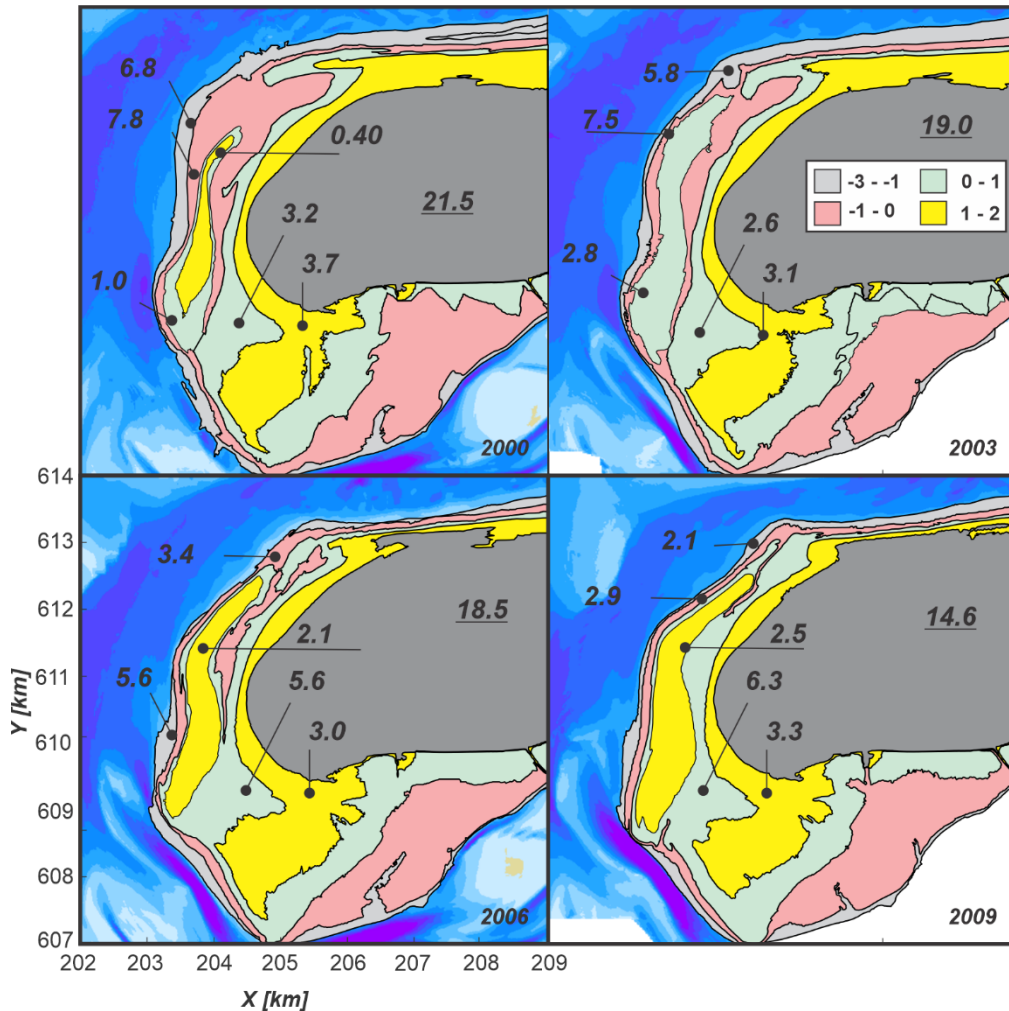
De zeewaartse begrenzing van de eilandkop is als -3 m contourlijn gedefinieerd. Op basis van deze contour kan nog een scheiding tussen eilandkop en het buiten-deltaplatform worden gemaakt. Aan de landwaartse zijde is +2 m contour geselecteerd als begrenzing. Het deel van het eiland binnen deze +2 m omhullende wordt niet meegenomen in de analyse. Dit elimineert het centrale (bewoonde deel) van het eiland, maar ook de duinen uit de berekening. In de Vaklodingen zijn de duinen namelijk niet volledig of nauwkeurig opgenomen.

De -1 m contourlijn is gebruikt als benadering voor Gemiddeld Laag Water (GLW). De 0 m contour wordt gezien als representatief voor de Gemiddelde Waterlijn (GWL). De +1 m contour is representatief voor Gemiddeld Hoogwater (GHW) en de +2 m contourlijn is gebruikt als scheiding tussen strand en duin. Op basis van deze contouren beslaat het intergetijdestrand de zone tussen -1 m en +1 m (GLW-GHW). Het droge strand is de zone tussen de +1m en +2m .

Ook in deze analyse zijn de sedimentvolumes bepaald ten opzichte van de minimum bodem over de periode 2000-2019. Deze volumes zeggen niets over de hoeveelheid sediment die zich nog in de eilandkop bevindt. Bij een structureel eroderend gebied (bijvoorbeeld een terugtrekkende eilandkop) is de minimumbodem vrijwel gelijk aan de huidige bodem. Dit betekent dat het sedimentvolume van de huidige bodem dan nihil is.

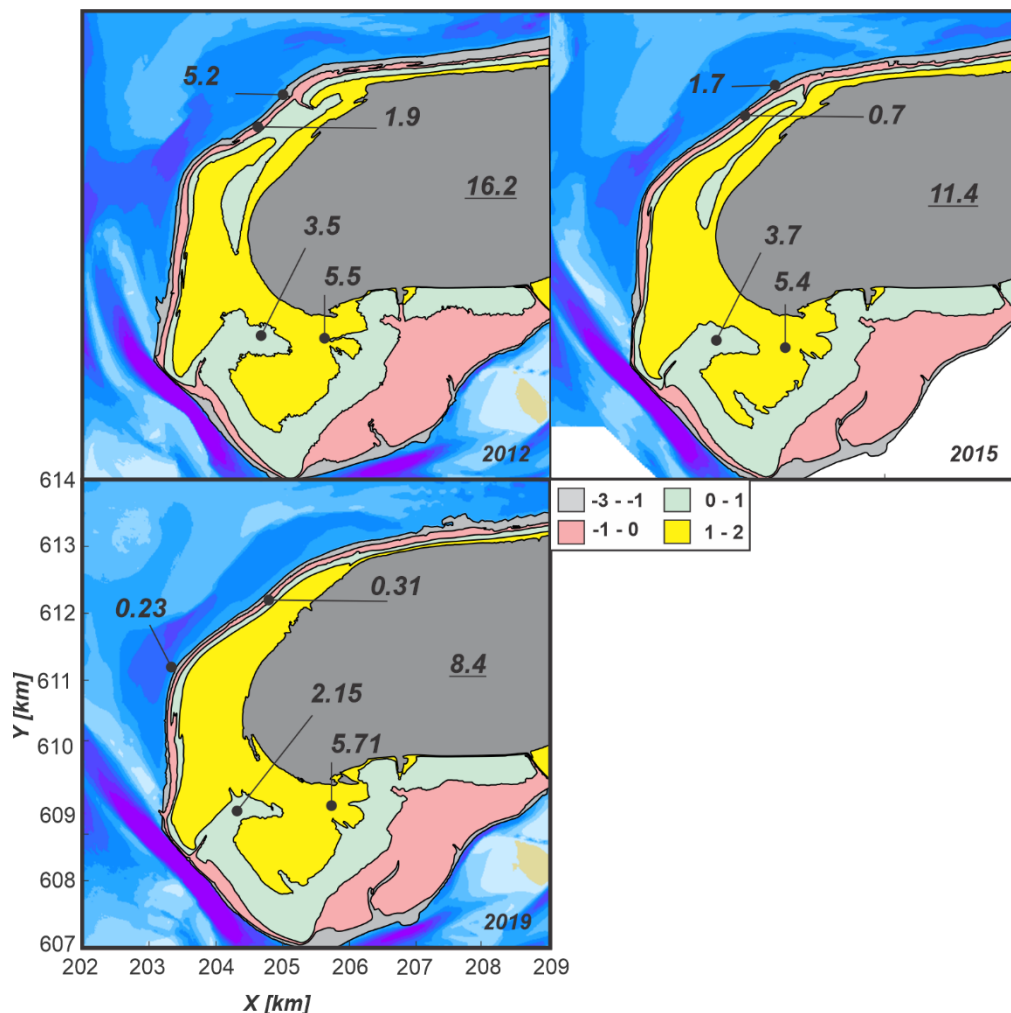
De volumeontwikkeling van de eilandkop van Schiermonnikoog is in detail geanalyseerd voor verschillende diepteklassen tussen de -3 en +2 m (Figuur 3-11, Figuur 3-12 en Figuur 3-13). Let op dat in deze figuren de volumes in de verschillende diepteklassen zijn weergegeven en niet de volumes voor de gehele contour zoals in Hoofdstuk 3.1 en 3.2. Deze analyse vertoont een continue trend over de gehele meetserie. Een meetonnauwkeurigheid in deze ondiepe zone is niet te observeren. Een mogelijke reden hiervoor is dat deze zone ingewonnen is als Jarkus meting en niet als Vakloding. In onderstaande analyse is dan ook de volledige periode 2000-2019 beschouwd.

Het totale volume omsloten door de -3 en +2m contourlijnen vertoont een afname van 13 miljoen m³ in de periode 2000-2019. De afname gebeurt vrijwel lineair met een trendwaarde van -0,65 miljoen m³/jaar. Het merendeel van deze afname vindt plaats in het natte deel van het profiel. De diepe zone (-3 tot -1m) verliest 7 miljoen m³ en de intergetijdezone, gedefinieerd als -1 tot +1 m , verliest 8 miljoen m³. Het droge strand (+1m tot +2m) neemt met een kleine 2 miljoen m³ toe.



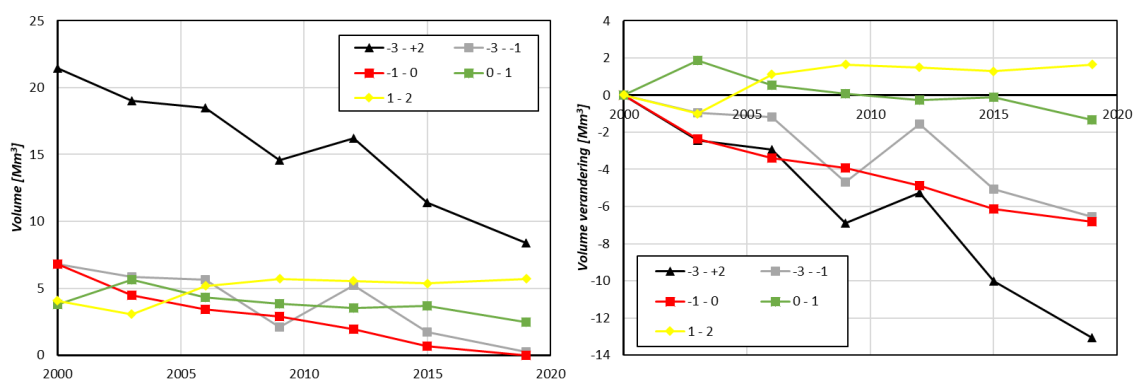
Figuur 3-11: Volumeontwikkeling van de verschillende dieptezones van de eilandkop geprojecteerd op de bodemkaarten voor de jaren 2000, 2003, 2006 en 2009.

Figuur 3-11 illustreert de bij deze volumeontwikkeling behorende morfologische ontwikkeling. In de 2000 bodem is de aangelande strandhaak nog zichtbaar als de langgerekte bank die zich van zuid naar noord op onderliggende strand/platform uitstrekt. Dit onderliggende platform heeft een hoogte tussen de GLW en GWL (-1 en 0 m). Op basis van de GWL heeft de Strandhaak een volume van 1 miljoen m³, waarvan zich 0,40 miljoen m³ boven GHW bevindt. In de periode 2000-2009 is te zien dat de noordwestzijde van de eilandkop zich landwaarts verplaatst en in volume afneemt. Dit sediment draagt bij aan de groei van de bank van de Strandhaak. Het volume omsloten door de 0 m contour is in 2003 toegenomen tot 2,8 miljoen m³. Ook het onderliggende platform neemt in hoogte toe, waardoor na 2003 de bank op basis van de 0m contourlijn niet meer zichtbaar is. De 0 tot +1 m contourlijn heeft in 2003 een volume van 2,1 miljoen m³ en in 2009 een volume van 2,5 miljoen m³, een toename van 2,1 miljoen m³ t.o.v. 2000.



Figuur 3-12: Volumeontwikkeling van de verschillende dieptezones van de eilandkop geprojecteerd op de bodemkaarten voor de jaren 2012, 2015 en 2019.

Na 2009 is de hoogte van het gehele platform zodanig toegenomen dat ook de +1 m contour geen begrenzing van de bank meer geeft. De Strandhaak kan dan als volledig verheeld met de eilandkop worden beschouwd (Figuur 3-12). In de periode 2009-2019 blijft het natte deel van het profiel in volume afnemen. Het volume van het droogvallende strand blijft dan vrijwel constant.



Figuur 3-13: Volumeverandering (links) en volumeverandering t.o.v. 2000 (rechts) voor de geselecteerde contourlijn. De volumes geven het actieve volume weer tussen de geselecteerde contourlijn en begrenst door de +2m contour aan de eilandzijde.

Tabel 3-4: Overzicht van de volumes voor geselecteerde contourklassen.

Jaren	Contourklasse [m]				
	-3 - -1	-1 - 0	0 - +1	+1 - +2	-3 - +2
2000	6.79	6.81	3.79	4.06	21.45
2003	5.84	4.46	5.64	3.06	19
2006	5.62	3.4	4.32	5.17	18.51
2009	2.1	2.89	3.86	5.71	14.56
2012	5.22	1.92	3.51	5.55	16.2
2015	1.73	0.68	3.66	5.35	11.42
2019	0.23	0	2.46	5.71	8.4

4 Conclusies en Aanbevelingen

De doelstelling van deze rapportage is de volumes van de aanlandingsbanken te kwantificeren, om zo een beter begrip van de mogelijke toekomstige kustlijnontwikkeling te verkrijgen. Hiervoor zijn 4 onderzoeksvragen opgesteld. Deze vormen de basis van de conclusies.

4.1 Conclusies

(1). Hoe kunnen de volumes van aanlandingsbanken worden gekwantificeerd?

Een nieuwe methodiek op basis van de 'actieve' bodemlaagdikte is toegepast om een inschatting te maken van de volumes van de aanlandingsbanken. Deze methode maakt gebruik van een referentievlak ofwel minimumbodem gedefinieerd als de onderkant van de morfologische enveloppe over een representatieve periode. Het volume dat zich boven deze referentiebodem bevindt neemt actief deel aan de morfologische verandering (de actieve bodemlaag). Op basis van geselecteerde contouren, waarbij de -4 m en -3 m contouren als representatief voor de aanlandingsbanken zijn gesteld, zijn de volumes van de aanlandingsbanken succesvol bepaald.

(2). Wat zijn de volumes in de huidige aanlandingsbanken van de Zoutkamerplaag?

Een analyse van de huidige aanlandingsbanken laat zien dat deze ontstaan vanuit de ebschilden die zich om de uitstroming van de Zoutkamperlaag en Plaatgat vormen. De geschiedenis van deze banken is terug te voeren tot de bodemmeting van 1976. In 1976 bevonden deze banken zich nog aan de noordwestzijde van de buitendelta en was het volume beperkt. Pas in 1991 werd deze bank ondieper van -4 m. Het volume bedraagt dan nog slechts 2 miljoen m³, maar neemt sindsdien sterk toe. In 2009 bevindt zich een volume van 20 miljoen m³ op de buitendelta ten noordwesten van Schiermonnikoog. Deze blijft zich richting NW Schiermonnikoog verplaatsen. In 2019 is het volume dan toegenomen tot 32 miljoen m³. Het volume binnen de meest ondiepe contour (de -3 m) is dan toegenomen van 8 miljoen m³ in 2009 tot zo'n 18 miljoen m³ in 2019.

Een toenemend volume binnen de -3 m contour laat zien dat de bank in hoogte toeneemt. Dit is belangrijk omdat alleen de ondiepe banken daadwerkelijk verhelen met de kust en zo een zeewaartse verplaatsing van de kustlijn initiëren. Een diepe bank vergroot wel de zandvolumes in het kustvak, maar dit resulteert niet per definitie in een zeewaartse verplaatsing van de kustlijn.

(3). Hoe verhouden de huidige volumes zich tot eerder opgetreden aanlandingen (zoals die van de Strandhaak)?

Een vergelijking van het sedimentvolume van de huidige aanlandingsbank met de Strandhaak laat vergelijkbare hoeveelheden zien. Het sedimentvolume in de banken op de buitendelta neemt sterk toe na afsluiting van de Lauwerszee. Op basis van de -4 m contour kan worden geconcludeerd, dat het volume van de aanlandingsbank 16 miljoen m³ bedraagt in 1967. Dit volume neemt toe tot 30 miljoen m³ in 1987 (net voor aanlanding van de Strandhaak).

(4). Wat was de respons van de eilandkop op de eerdere aanlanding?

Na aanlanding van de Strandhaak (1991) is het sedimentvolume van de eilandkop met 30 miljoen m³ toegenomen. Dit volume neemt daarna sterk af. Het volume op omsloten door de -3 m contour neemt gemiddeld met 0,65 miljoen m³/jaar af in de periode 2000-2019.

(5). *Wat is de te verwachten respons van de eilandkop op een eventuele nieuwe aanlanding?*

Op basis van de landwaartse verplaatsing van de toekomstige aanlandingsbanken en de geobserveerde volumetoename in het ondiepe deel van de bank is het waarschijnlijk, dat er in de toekomst een grote bankaanlanding zal plaatsvinden. Aangezien de volumina vergelijkbaar zijn met die van de in het verleden aangelande Strandhaak, lijkt het ook waarschijnlijk dat er bij aanlanding meer dan voldoende zandvolume aanwezig zal zijn om de kustlijn voor langere tijd weer zeewaarts van de BKL te positioneren. Een voorspelling wanneer deze aanlanding zal optreden is op basis van de uitgevoerde analyses in deze studie niet te maken.

4.2 Aanbevelingen

Het aanlanden van banken is nog niet een proces dat volledig begrepen wordt. Het is dan ook zaak de aanlandingsbanken goed te monitoren. Een hogere frequentie van metingen (bijvoorbeeld jaarlijks) zou hier veel aanvullend inzicht kunnen opleveren. Een beter begrip van de vorming en verplaatsing van deze aanlandingsbanken is niet alleen van belang voor de lokale kustlijnontwikkeling van Schiermonnikoog, maar ook voor kennisontwikkeling in het algemeen.

De gehanteerde methode van sedimentvolumebepaling van de actieve zone geeft veel nieuw inzicht in de morfologische veranderingen van buitendelta's. De volumes geven direct inzicht in het mogelijke sedimentaanbod voor de kust. Een verdere toepassing en doorontwikkeling van deze methode is daarom wenselijk.

5 Referenties

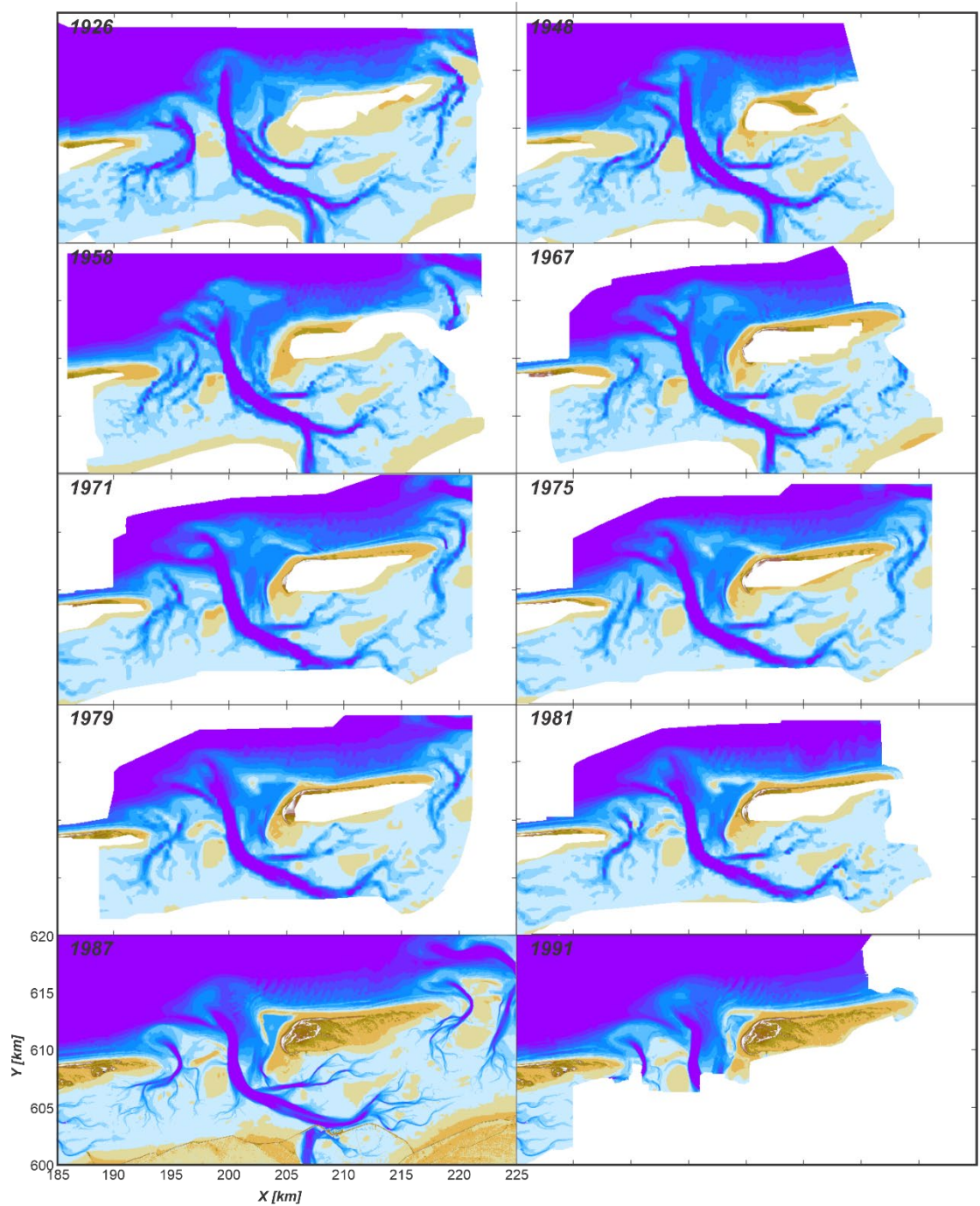
- Elias, E.P.L., 2018. Een actuele zandbalans van de Friesche Zeegat. Report 11202190-000 (in Dutch). Deltares, Delft: 27 pp.
- Elias, E.P.L., 2021. Morfologie van het Zeegat van het Vlie Een overzicht van de morfologische ontwikkelingen over de periode 1831-2020. Rapport 11206794-004, Deltares, Delft, 106 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., 2021. De morfologische ontwikkeling van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks. Rapport 11206794-004, Deltares, Delft, 55 p.
- 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.
- Van Heteren, S., Oost, A. P., de Boer, P.L., van der Spek, A.J.F., Elias, E.P.L., 2006. Island-terminus evolution as a function of changing ebb-tidal delta configuration: Texel, The Netherlands, *Marine Geology* 235, 1: 19-23.
- Elias, E.P.L., 2018. Een actuele zandbalans van de Friesche Zeegat. Report 11202190-000 (in Dutch). Deltares, Delft: 27 pp.
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F. & Lazar, M., 2016. '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 - Geologie en Mijnbouw*, online version, 27 pp. doi:10.1017/njg.2016.37.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F, Wang, Z.B., De Ronde, J., 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences* 91 (3): 293-310.
- Elias, E. P.L., Wang, Z.B., Taal, M., Cleveringa, J., van der Spek, A.J.F., van der Werf, J. (2022). Large-scale morphological changes and sediment budget of the Western-Scheldt estuary. In draft, to be submitted to *Netherlands Journal of Geosciences*.
- Elias, E.P.L., 2021. Morfologie van het Groninger Wad en Rottums, Rapport 11206794-001, Deltares Delft, 108 p.
- Elias, E.P.L., en Oost, A.P., 2021. Morfologische processen van het Friesche Zeegat. Een conceptueel model. Deltares, rapport 11205236-003, Delft, 130p.
- Oost, A.P. & De Haas, H., 1992. Het Friesche Zeegat, morfologisch-sedimentologische veranderingen in de periode 1970-1987, een getijde inlet systeem uit evenwicht. Deel 1 and 2, rapport *Kustgenese*, 68 pp. and 22 Figs.
- Oost, A.P. & De Haas, H., 1993. Het Friesche Zeegat, morfologisch-sedimentologische veranderingen in de periode 1927-1970, cyclische veranderingen in een tidal-inlet systeem, 96 pp. and 15 Figs. Oost 1995,

Pearson, S.P., Elias, E.P.L., van Prooijen, B.C., van der Vegt, H., van der Spek, Wang, Z.B., 2022. A novel approach to mapping ebb-tidal delta morphodynamics and stratigraphy. *Geomorphology* 405 (2022) 108185.

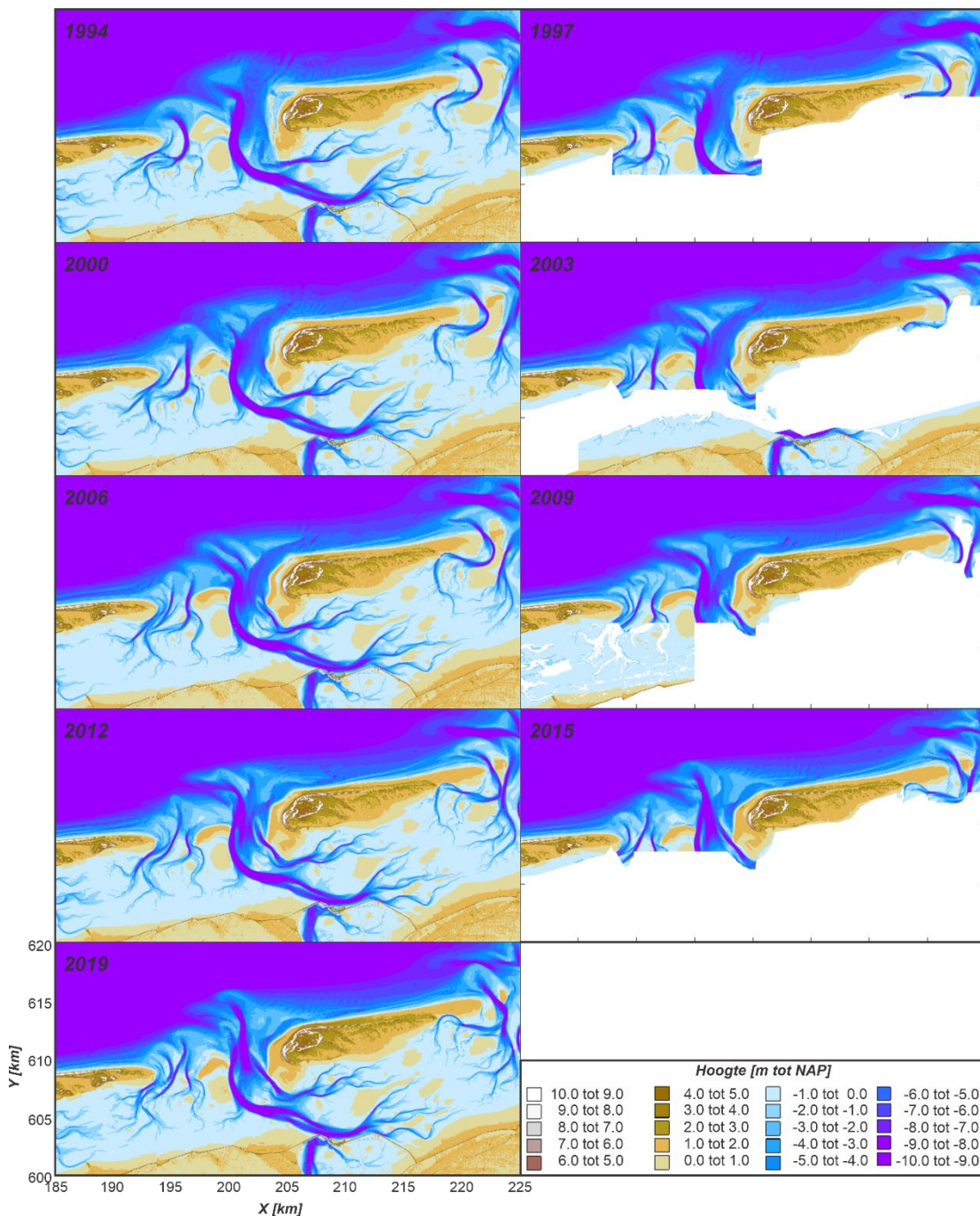
Schrijver, M.C. 2021. De balans opgemaakt. De ontwikkelingen in de Western Scheldt tot 2019 gezien vanuit de sedimentbalans. Report Rijkswaterstaat Zee en Delta, Middelburg, 92 p.

Van der Spek, A.J.F., and Elias, E.P.L. 2021. Half a century of morphological change in the Haringvliet and Grevelingen ebb-tidal deltas (SW Netherlands) - Impacts of large-scale engineering 1964–2015. *Marine Geology* 432 (2021) 106404

A Beschikbare bodem data



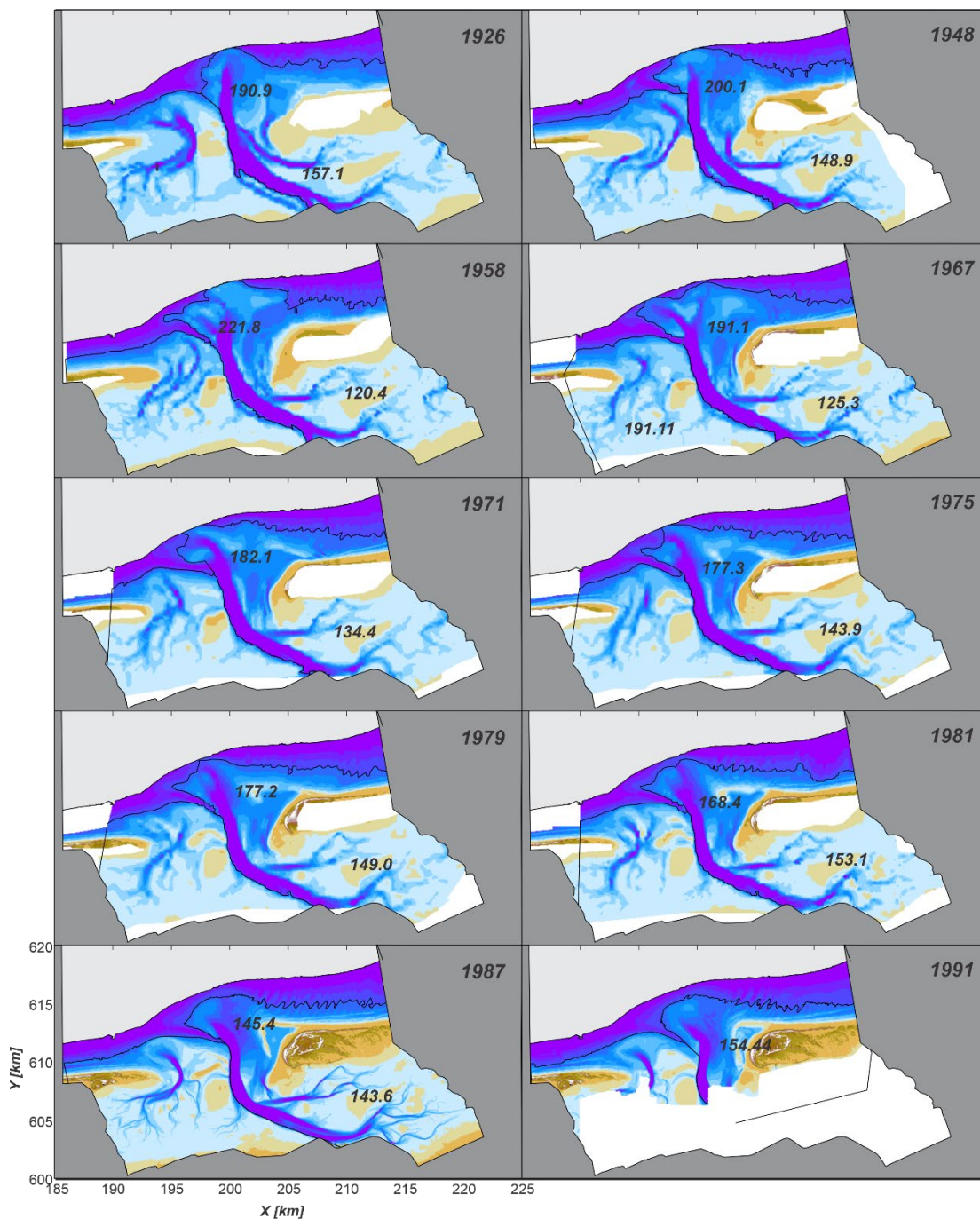
Figuur A- 1: Overzicht van de Vaklodingen over de periode 1926-1991.



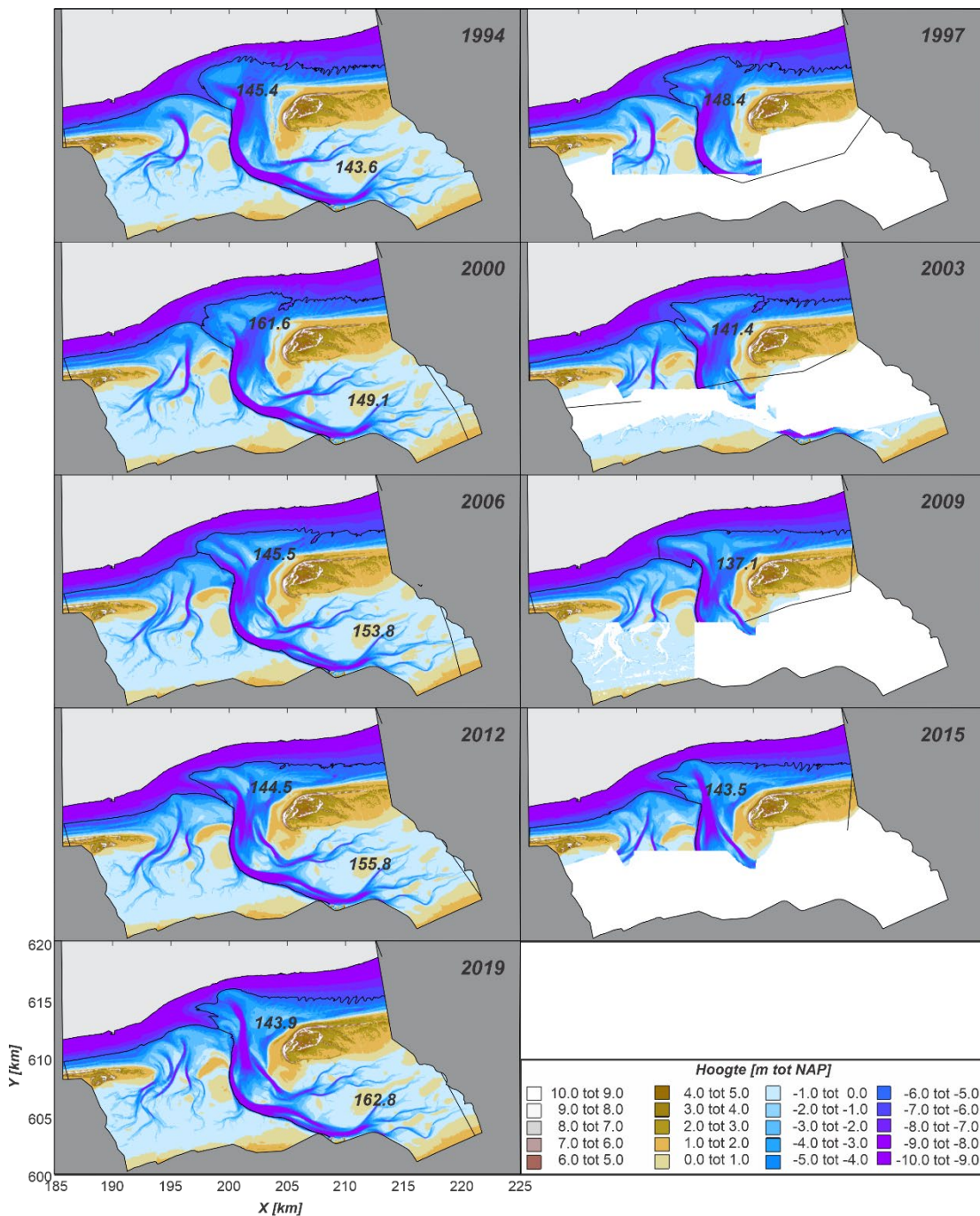
Figuur A- 2: Overzicht van de Vaklodingen over de periode 1994-2019.

B Data en balansgebieden volumeberekeningen

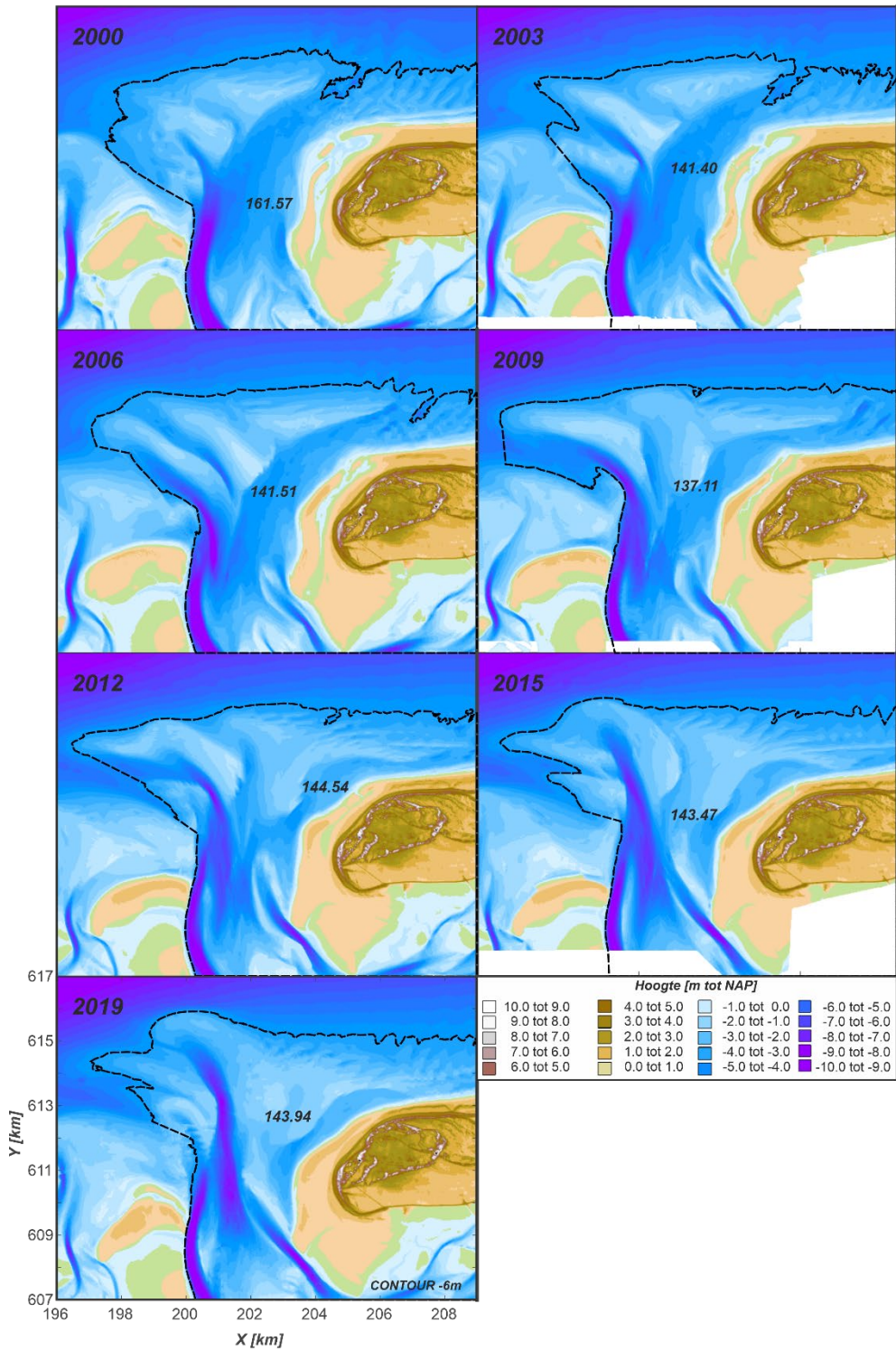
B.1 Totale zeegat incl. bekken



Figuur B- 1: Overzicht van de volumes in de Zoutkamerlaag buitendelta en bekken (1926-1991).



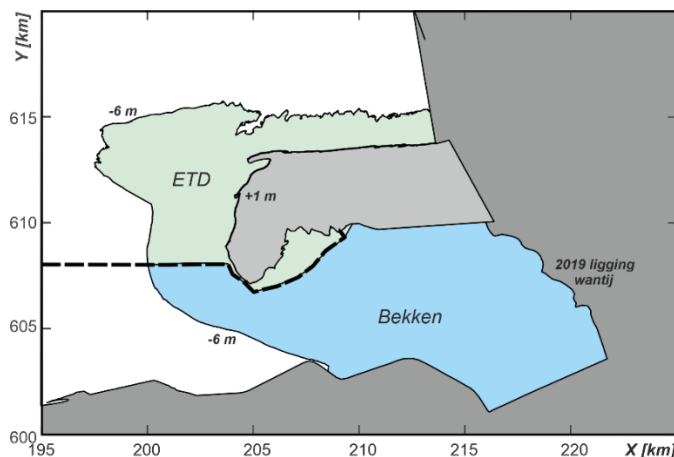
Figuur B- 2: Overzicht van de volumes in de Zoutkamerlaag buitendelta en bekken (1926-1991).



Figuur B- 3: Overzicht van de buitendelta gedefinieerd door de -6 m contourlijn (2000-2019).

B.2 Beknopte analyse Zoutkamperlaag buitendelta en bekken (1926-2019)

Het totale sedimentvolume van het deelsysteem Zoutkamperlaag is bepaald voor het gebied tussen de -6 m aan de zeezijde en de +1 m contour op de eilanden (Figuur B-4). De afbakening van eilanden is gebaseerd op de beschikbare meetdata. De oudere bodemkaarten hebben geen data boven de +1m contour beschikbaar. In het bekken wordt de -6m contour van de geul Zoutkamperlaag gevolgd. Het bankenoppervlakte ten westen hiervan wordt in deze polygoon dan ook niet meegenomen. Hierdoor wijkt de volumeontwikkeling van het bekkendeel af t.o.v. eerdere studies waarin het wantij als scheiding is gebruikt. Aan de oostzijde is een vaste begrenzing van het bekken gekozen op basis van de 2019 wantijligging.

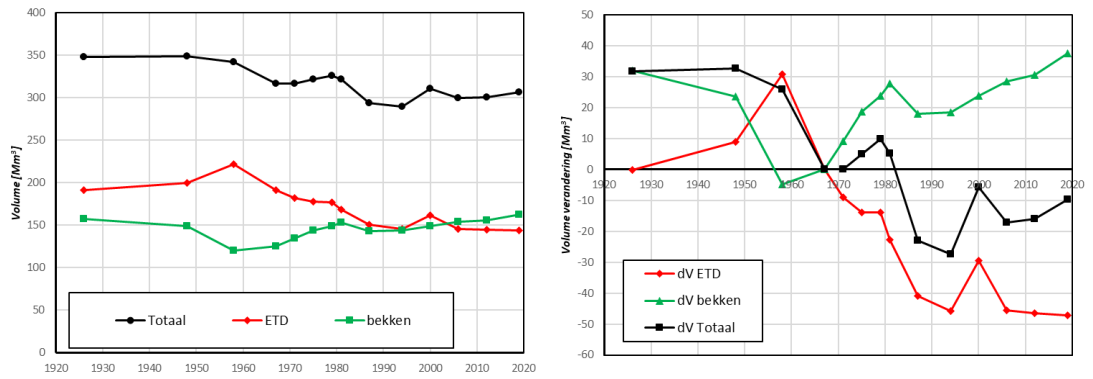


Figuur B-4: Overzicht van de indeling in deelgebieden voor volumebepaling balansgebied Zoutkamperlaag. ETD staat voor buitendelta.

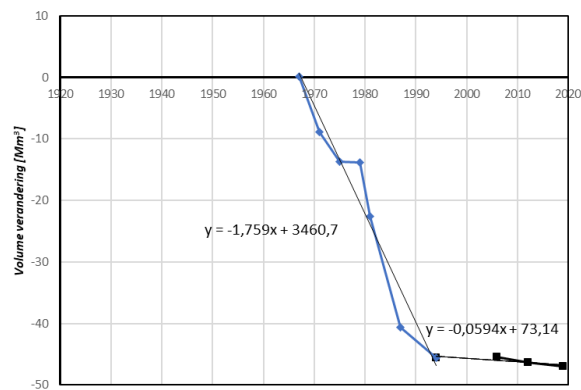
Op basis van de gedefinieerde balansgebieden zijn de sedimentvolumes bepaald voor de periode 1926 – 2019. Het systeem van bekken en buitendelta heeft gemiddeld een actief sedimentvolume van 317 miljoen m³, waarvan zich 171 miljoen m³ in het bekken bevindt en 146 miljoen m³ op de buitendelta (Figuur B-5). In Appendix B-1 worden de balansgebieden voor het zeegat weergegeven. Een maximaal volume op de buitendelta (221 miljoen m³) is aanwezig voor afsluiting in de 1958 meting. Na afsluiting van de Lauwerszee in 1967 neemt het volume van de buitendelta sterk af. De buitendelta verliest in totaal 47 miljoen m³ aan sediment in de periode 1967-2019. Dit verlies treedt vooral op in de periode 1958-1994. Sinds 1994 is de volumeverandering beperkt. Opvallend in de volumetijdserie is de sterke toename in volume (21 miljoen m³) tussen 1948 en 1958. Het is wel de vraag of dit ook daadwerkelijk is opgetreden en of het volume van 1958 representatief is. Vanaf 1967 lijken de waarden een redelijk consistente trend te vertonen. Alleen de waarde in 2000 wijkt hier weer sterk af. Het is niet geheel duidelijk waar deze afwijking door veroorzaakt wordt, maar een meeton nauwkeurigheid lijkt hierin waarschijnlijk. Op basis van een trendlijnanalyse kan geconcludeerd worden dat direct na afsluiting van de Lauwerszee (1967-1994) het volume met gemiddeld 1,8 miljoen m³/jaar afneemt. Vanaf 1994 is deze afname beperkt tot 0,06 miljoen m³/jaar (Figuur B-6).

Over de gehele periode blijft het volume van het bekken vrijwel gelijk. Dit komt vooral doordat de sedimentvolumes in de jaren 1926 en 1948 relatief hoog zijn. De nauwkeurigheid van deze volumes blijft echter een vraagteken. Na afsluiting van de Lauwerszee nemen de volumes van het bekken vrijwel continue toe. In de periode 1967-2019 is het volume van het bekken met 38 miljoen m³ toegenomen. De toename van het bekkenvolume is veel kleiner dan berekend in eerdere studies. Deze discrepantie komt vooral door de gebruikte afbakening van de Zoutkamperlaag op basis van de -6 m contour. Hierdoor vindt een groot deel van de aanzanding plaats buiten het hier gedefinieerde balansgebied. Aangezien het

doel van deze studie het kwantificeren van de volumes in de buitendelta is, is hier verder geen aandacht aan besteedt. De resultaten van deze studie moeten dan ook niet gebruikt worden om conclusies over het bekken te trekken.



Figuur B 5: Overzicht van het sedimentvolume van het gehele systeem, bekken en buitendelta tussen de -6m en +1m contourlijnen (links) en de volumeverandering t.o.v. 1967 (rechts).

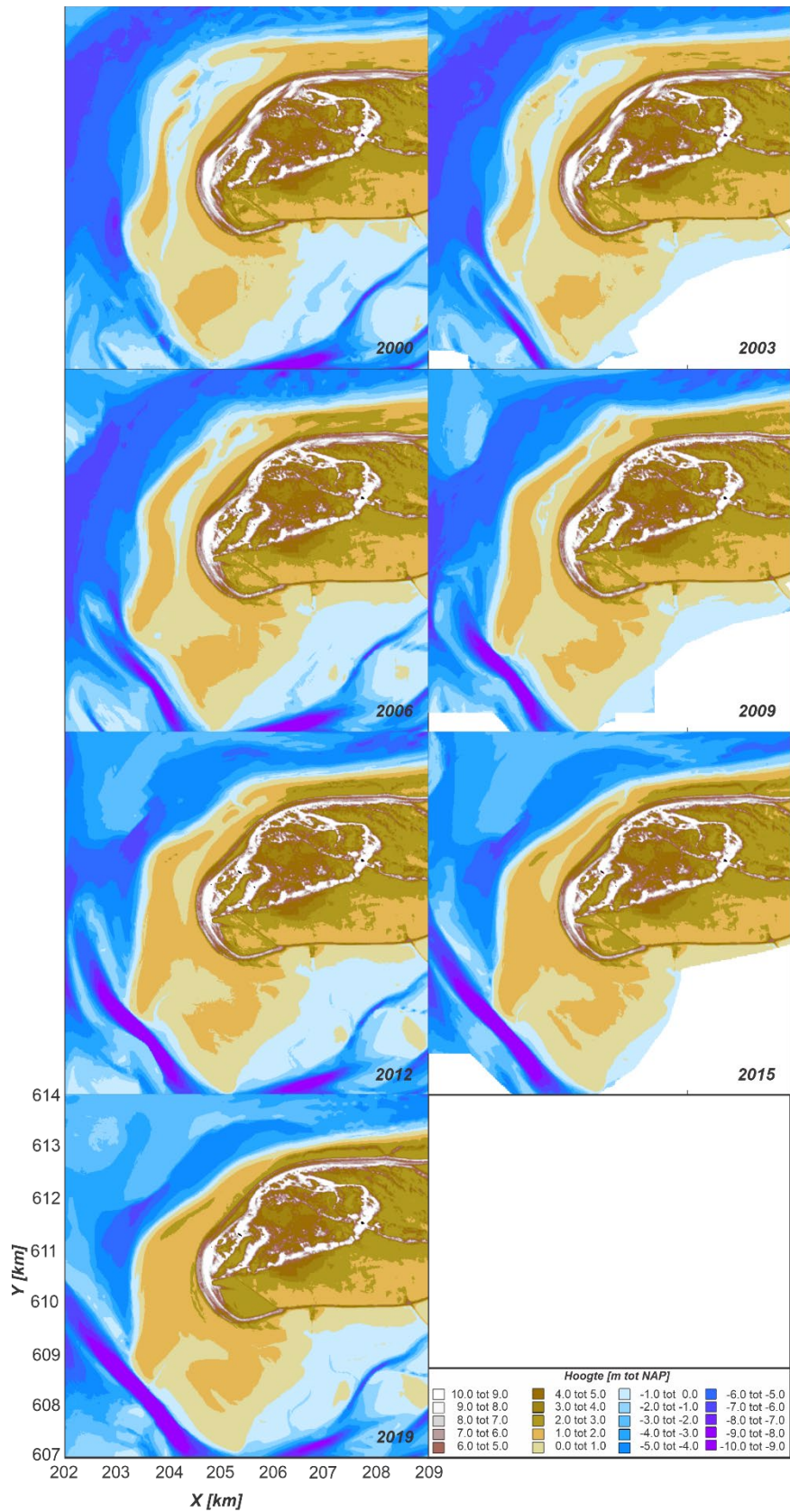


Figuur B-6 Overzicht van de sedimentvolume verandering van de buitendelta tussen de -6 m en +1 m contourlijnen sinds 1967 en zonder de 2000 meting.

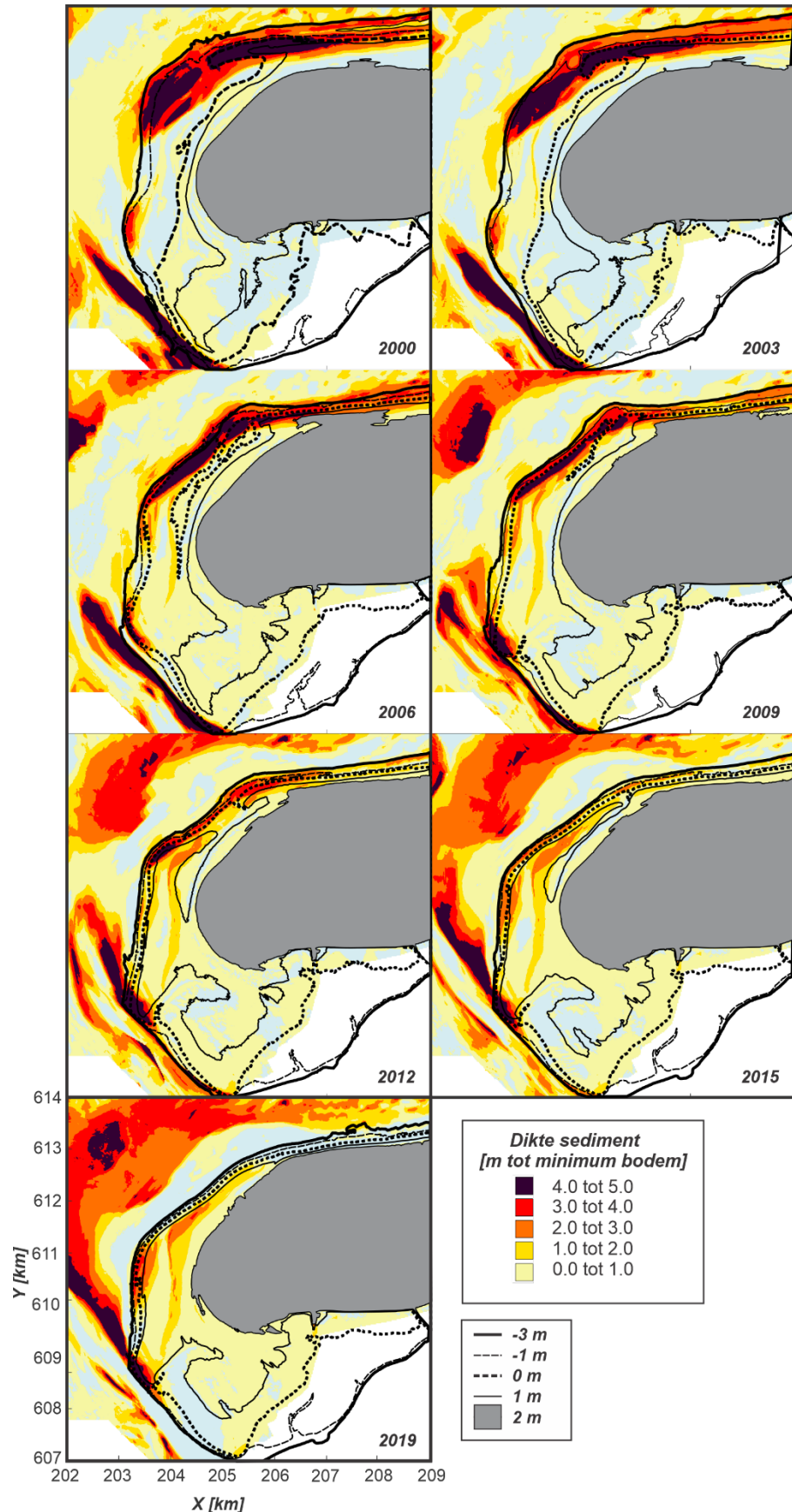
Tabel B-1: Overzicht van de grootschalige volumeverandering over de periode 1926-2019.

Jaren	Volume [miljoen m³]			Volumeverandering [miljoen m³/jaar t.o.v. 1926]		
	Totaal	Bekken	ETD	Totaal	Bekken	ETD
1926	348,05	190,93	157,12	0	0	0
1948	348,98	200,07	148,91	0,93	9,14	-8,21
1958	342,25	221,83	120,42	-5,8	30,9	-36,7
1967	316,37	191,11	125,26	-31,68	0,18	-31,86
1971	316,44	182,05	134,39	-31,61	-8,88	-22,73
1975	321,23	177,29	143,94	-26,82	-13,64	-13,18
1979	326,19	177,15	149,04	-21,86	-13,78	-8,08
1981	321,47	168,39	153,08	-26,58	-22,54	-4,04
1987	293,46	150,31	143,15	-54,59	-40,62	-13,97
1994	289,02	145,38	143,64	-59,03	-45,55	-13,48
2000	310,64	161,57	149,07			
2006	299,29	145,51	153,78	-48,76	-45,42	-3,34
2012	300,35	144,54	155,81	-47,7	-46,39	-1,31
2019	306,72	143,94	162,78	-41,33	-46,99	5,66
Gemiddeld	317,17	171,43	145,74			

B.3 Overzicht bodemdata van de eilandkop



Figuur B- 7: Bodemhoogtekaarten van de eilandkop van Schiermonnikoog tussen 2000 en 2019..



Figuur B- 8: Sedimentdiktekaarten van de eilandkop van Schiermonnikoog voor de periode 2000-2019 tov minimumbodempligging 2000-2019. Grize vlak geeft de +2m contourlijn weer, dit gebied is niet meegenomen in de analyse.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl