

Morfologisch onderzoek Zeegat van Ameland

Een verdiepend onderzoek naar de uitwisseling tussen buitendelta, kust en bekken.



Morfologisch onderzoek Zeegat van Ameland

Een verdiepend onderzoek naar de uitwisseling tussen buitendelta, kust en bekken.

Auteur(s)

Edwin Elias

Nienke Vermeer

Helena van der Vegt

Morfologisch onderzoek Zeegat van Ameland

Een verdiepend onderzoek naar de uitwisseling tussen buitendelta, kust en bekken.

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	S. Pluis
Referenties	Zie hoofdstuk 6
Trefwoorden	Morfologie, Ameland, buitendelta

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	16-11-2022
Projectnummer	11208035-004
Document ID	11208035-004-ZKS-0001
Pagina's	58
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Edwin Elias	Helena van der Vegt
	Nienke Vermeer	

Deze pagina is niet voor publicatie

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Edwin Elias	Ellen Quataert	Toon Segeren	
	Nienke Vermeer			
	Helena van der Vegt			

Samenvatting

De afgelopen jaren is binnen KPP B&O Kust en Kustgenese 2 uitvoerig onderzoek gedaan in het zeegat van Ameland om het morfologische gedrag van de buitendelta's, de bijbehorende sedimenttransporten en de uitwisseling tussen buitendelta en eilandkust beter te begrijpen. Eén van de uitkomsten van deze studies is de identificatie van sediment-bypassing cycli die optreden op de buitendelta. Een onderdeel van sediment-bypassing kan de vorming van aanlandingsbanken zijn die uiteindelijk verhelen met de kust, waarna de kust sterk uitbouwt. Sinds 1989 zijn twee van deze aanlandingen geobserveerd, terwijl een derde cyclus van aanlandingsbanken is gevormd.

In de voorliggende studie zijn de sedimentvolumes van het Zeegat van Ameland, met een focus op de aanlandingsbanken, gekwantificeerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van nieuwe inzichten rondom sediment-bypassing en is er gewerkt met een nieuwe methode die gebruik maakt van het actieve sedimentvolume zoals beschreven in Pearson et al. (2022).

In totaal nemen het bekken, de buitendelta en eilandkoppen van het Amelanders Zeegat met 72 miljoen m³ in sedimentvolume toe tussen 1989 en 2017. De grootste toename treedt op in het bekken (43 miljoen m³) door opvulling van geulen. De buitendelta neemt 29 miljoen m³ in volume toe. Erosie van de Boschplaat (30 miljoen m³) en de uitgevoerde suppleties (13 miljoen m³) vormen de grootste lokale zandbronnen voor deze aanzanding.

De bankaanlandingen van de Bornrif Strandhaak (1985 – heden) en het Bornrif Bankje (2017 - heden) hebben ieder geresulteerd in een kustvolumetoename van 40 tot 50 miljoen m³. Binnen de huidige sediment-bypassing cyclus zijn er grote ebschilden gevormd. Deze ebschilden vormen de basis van de toekomstige aanlandingsbanken en bevinden zich nu nog ver zeewaarts op de buitendelta. De ebschilden bevatten op dit moment al meer dan 45 miljoen m³ zand. Het is waarschijnlijk dat een nieuwe aanlanding op een tijdschaal van ~10 jaar zal plaatsvinden.

Een beter begrip van de vorming en verplaatsing van de aanlandingsbanken en de sedimentvolumes binnen deze banken ondersteunt Technisch Management van Kustlijn zorg bij het lokale kustbeheer van Ameland. Daarnaast draagt dit onderzoek bij aan kennisontwikkeling rondom het uitvoeren van systeemsuppleties op buitendelta's. Continuering van de metingen, het morfologisch onderzoek en verdieping van de kennis is hiervoor essentieel.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4	
1	Introductie	6
1.1	Aanleiding tot onderzoek	6
1.2	Doelstelling	7
1.3	Opbouw van het onderzoek	7
2	Morfologie van de Amelander buitendelta	8
2.1	Hydrodynamica	8
2.2	Ligging van geulen en platen op de buitendelta in 2021 (Elias, 2022b)	9
2.3	Morfologische veranderingen (Elias, 2022b)	11
2.4	Aanlandingscycli op de Amelander buitendelta (Elias et al. 2019 en Elias, 2022b)	13
2.4.1	Inleiding	13
2.4.2	Aanlanding van de Bornrif Strandhaak	13
2.4.3	Aanlanding van de het Bornrif Bankje	16
2.4.4	Bankvorming door ebschilden	16
3	Data en Methode	19
3.1	Bodemmetingen	19
3.2	Suppleties	20
3.3	Methodiek	21
4	Volumebalansen	25
4.1	Grootschalige analyse van het gehele zeegat (bekken, kust en buitendelta)	25
4.2	Bornrif Strandhaak	31
4.3	Bornrif Bankje	34
4.4	Ebschild en ebschaarsystemen	38
4.5	Boschplaat	42
5	Conclusies en aanbevelingen	46
5.1	Conclusies	46
5.2	Aanbevelingen	47
6	Referenties	49

1 Introductie

1.1 Aanleiding tot onderzoek

In het onderzoeksprogramma KPP B&O Kust worden kennis en tools door Deltares ontwikkeld die 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.

De kustlijn van de Wadden vormt geen aaneengesloten kust, maar bestaat uit een opeenvolging van eilandkusten gescheiden door zeegaten. De bij deze zeegaten behorende buitendelta's vormen een verbinding, doorgeefluik van sediment, tussen de verschillende eilandkusten. Het goed begrijpen van het morfologische gedrag van de buitendelta's, de bijbehorende sedimenttransporten en de uitwisseling tussen buitendelta en eilandkust is essentieel voor een efficiënt en duurzaam beheer van de Waddenkust. Om deze uitwisselingen beter te begrijpen is er de afgelopen jaren binnen KPP B&O Kust en Kustgenese 2 uitvoerig onderzoek gedaan op de buitendelta van het Zeegat van Ameland. Eén van de uitkomsten van deze studies is de identificatie van sediment-bypassing cycli die optreden op de buitendelta (Elias et al. 2019). "Sediment bypassing" beschrijft hoe de sedimentstroom zich over de buitendelta verplaatst van het bovenstroomse naar benedenstroomse eiland. Een onderdeel van sediment-bypassing kan de vorming van aanlandingsbanken zijn die uiteindelijk verheven met de kust, waarna deze sterk uitgroeit. Sinds 1989 zijn twee van deze aanlandingen geobserveerd, terwijl een derde cyclus van aanlandingsbanken al gevormd is op de buitendelta (Elias et al. 2019; Elias, 2022b). In deze studie worden de volumes die zich in deze aanlandingsbanken bevinden gekwantificeerd. Inzicht in de sedimentvolumes die zich in een natuurlijk systeem bevinden is van direct belang met het oog op de respons die optreedt in kustlijnligging. Daarnaast is deze informatie cruciaal met het oog op het eventueel toepassen van systeemsuppleties.



Figuur 1-1: Aanlanding van het Bornrif rond 1985 zorgt voor een sterke uitbouw van de kust. Deze uitbouw neemt langzaam in volume af waarbij het zand vooral richting de eilandkust verplaatst.

Het in deze studie uitgevoerde onderzoek ondersteunt Technisch Management van Kustlijn­zorg bij eventuele afwegingen rondom het uitvoeren van systeemsuppleties op buitendelta's. Door zeespiegelstijging is het de verwachting dat er in de toekomst meer zand moet worden gesuppleerd om niet alleen de kustlijn, maar ook de buitendelta te behouden. Het is de vraag of de reguliere strand- en vooroeversuppleties met toenemende behoefte nog voldoende efficiënt kunnen worden uitgevoerd. Suppleren op de buitendelta, waarbij de suppletie aansluit op natuurlijke morfologische veranderingen is dan een mogelijk alternatief. Het goed begrijpen van de zandvolumes die zich in de natuurlijke banken bevinden en verplaatsen over de buitendelta in de richting van de beneden­stroomse eilandkust is dan ook een essentiële stap binnen het onderzoek. Daarnaast is kennis van sedimentvolumes ook belangrijk voor de regionale kustbeheerder. Met kennis van de volumes die zich in de aanlandingsbanken voor de kust bevinden kan een betere inschatting van het toekomstige sedimentaanbod voor de kust en daarmee ook de toekomstige kustlijnontwikkeling gemaakt worden.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van deze rapportage is het beter begrijpen van de uitwisseling van sediment tussen de buitendelta van het Zeegat van Ameland en de aanliggende eilandkusten van Terschelling en Ameland door het kwantificeren van de sedimentvolumes op de schaal van de buitendelta en op de schaal van de individuele elementen zoals banken en eilandkoppen.

Om deze doelstelling te bereiken zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

1. Hoe ziet de sedimenthuishouding van het gehele zeegat (buitendelta, bekken en eilandkoppen) eruit?
2. Hoeveel aanlandingscycli zijn te onderscheiden op de Amelandse buitendelta?
3. Wat zijn de volumes in de aanlandingsbanken binnen deze cycli?
4. Wat zijn de volumes in de toekomstige aanlandingsbanken?
5. Wat was de respons van de eilandkop op de eerdere aanlandingen en in welke richting is het aangelande zand verplaatst (bekken of eilandkust)?

Dit onderzoek bestaat gedeeltelijk uit een samenvatting van de bestaande literatuur (met name voor deelvragen 1, 2 en 5) en nieuwe analyses (deelvragen 1, 3 en 4). De analyses worden uitgevoerd door berekening van de 'actieve' sedimentvolumes (zie Pearson et al. 2021; Elias, 2022a). Een aanvullende doelstelling van deze studie is het verder ontwikkelen van deze methodiek.

1.3 Opbouw van het onderzoek

In navolging van deze inleiding volgen drie inhoudelijke hoofdstukken. In Hoofdstuk 2 wordt een overzicht gepresenteerd van de huidige kennis van de morfologie van de Amelandse buitendelta. Hoofdstuk 3 geeft een beknopt overzicht van de gehanteerde data en methode. In Hoofdstuk 4 worden de uitkomsten van de volumeberekeningen gepresenteerd voor het gehele zeegat, de verschillende aanlandingscycli en de eilandkoppen. De verkregen inzichten vormen de basis voor de conclusies en aanbevelingen in Hoofdstuk 5.

2 Morfologie van de Amelander buitendelta

Dit hoofdstuk is gebaseerd op een literatuuranalyse. Voor de volledigheid zijn relevante onderdelen uit de bestaande literatuur opgenomen. Per deelhoofdstuk is aangegeven waar het op gebaseerd is.

2.1 Hydrodynamica

Volgens de classificatie van Davis en Hays (1984) is de buitendelta van het Amelander zeegat een karakteristiek voorbeeld van een 'mixed-energy', gemend-energetisch, systeem. Dit betekent dat zowel getij als golven een rol spelen in de vorming, ligging en verplaatsing van de buitendeltabanken en -geulen.

Het getij in het zeegat is dubbeldaags, 2 keer per dag wordt het water vanuit de Noordzee door de keel van het zeegat het bekken in geperst en vice versa. Hierdoor ontstaan er grote stroomsnelheden die zich tijdens uitstroom ver zeewaarts uitstrekken en daarbij grote hoeveelheden zand kunnen verplaatsen. Het sediment wordt zeewaarts verplaatst tot de snelheden zover afnemen dat ze onder de kritische snelheid van bezinking komen, waarna het sediment neerslaat. Dit proces vormt de basis voor de grote ondiepte, de buitendelta, die zich voor het zeegat vormt. Ook in het bekken speelt dit proces, alleen wordt de ondiepte dan vloeddelta genoemd. Deze vloeddelta is in de bodemdata minder duidelijk te onderscheiden, maar eigenlijk strekt de vloeddelta bij Ameland zich uit vanaf het zeegat tot de vasteland kust.

Getij is niet het enige proces dat speelt op de buitendelta. De zeewaartse, getij-gedreven sedimentuitstroom wordt tegengewerkt door de landwaarts gerichte golfgedreven transporten. De buitendelta vormt als een evenwicht tussen deze twee tegengestelde krachten. De golven zorgen er ook voor dat er naast het grote onderliggende platform van de buitendelta allerlei kleinere banken ontstaan die zich over de buitendelta verplaatsen.

De uitvoerige metingen uitgevoerd binnen de Kustgenese 2 meetcampagne geven veel inzicht in de processen die spelen in het zeegat en op de buitendelta (Elias, 2019; Van der Werf et al., 2019). In de keel van het zeegat varieert de dieptegemiddelde stroming tussen de 0,50 m/s tijdens doottij en 1,35 m/s tijdens springtij. De golfhoogte op de buitendelta is over het algemeen kleiner dan 2 m, maar tijdens (gemiddelde) stormcondities kunnen de golfhoogten oplopen tot 2 tot 3 m. Tijdens zware stormen worden veel hogere golven gemeten (4,5 en 9,1 m). Deze condities komen echter minder dan 1% van de metingen voor. Een belangrijk inzicht vanuit de Kustgenese 2 metingen is ook dat golfafscherming door de buitendelta eigenlijk beperkt is. Alleen golven hoger dan 2 meter vertonen een duidelijke afname in hoogte. Golfhoogten lager dan 2 meter propageren ongestoord over de buitendelta richting de eilandkusten. Desondanks, spelen deze golven wel een belangrijke rol in de sedimenttransporten naar de achterliggende kust, aangezien ze procentueel gezien het vaakst voorkomen. Vanuit het oogpunt van kustveiligheid speelt de golfbrekende werking van de buitendelta echter wel een grote rol: De hoge golven tijdens stormen kunnen niet doordringen tot de achterliggende kust.

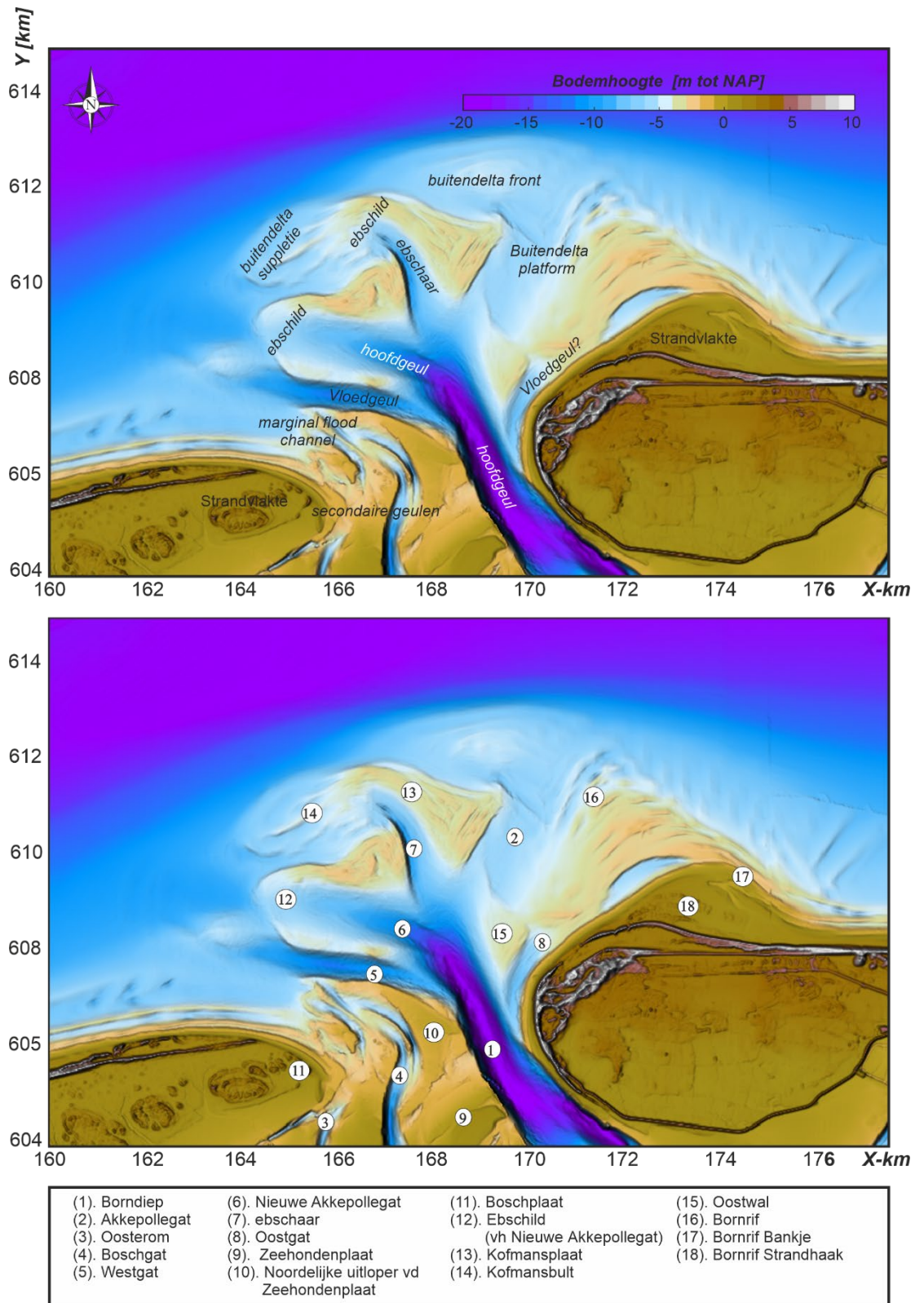
2.2 Ligging van geulen en platen op de buitendelta in 2021 (Elias, 2022b)

De geulen en banken van de buitendelta zijn continu aan verandering onderhevig. Geulen en banken verplaatsen, verdwijnen en (her)vormen. Consistente naamgeving is hierdoor soms lastig. In de rapportage van Elias (2022b) zijn op basis van de 2021 bodem de belangrijkste geulen en platen benoemd (Figuur 2-1).

De 2021 bodem vertoont een duidelijke hoofdgeul aan de oostzijde van het zeegat, langs de westkust van Ameland (het Borndiep [1]). Tot ongeveer 2019 vormde het Akkepollegat [2] de dominante uitstroomgeul de buitendelta op. In de 2021 is het Akkepollegat [2] vrijwel niet meer als geul te onderscheiden. De meest landwaarts gelegen ebschaar [6] vormt in deze bodem de belangrijkste uitstroomgeul. Deze geul heeft de functie van het Akkepollegat overgenomen en heeft daarom de naam *Nieuwe Akkepollegat* gekregen. Aan weerszijden van het Nieuwe Akkepollegat zijn nog kleinere geulen te onderscheiden; een ebschaar [7] ten noorden ervan en de vloedgeul Westgat [5] aan de zuidzijde.

Op de buitendelta bevinden zich drie duidelijke platen [12, 13, 16]. De grootste plaat, Bornrif [16], ligt ten oosten van het Akkepollegat. Als onderdeel van de sediment-bypassing cyclus vormen zich periodiek kleinere platen op het Bornrif, zoals het Bornrif Bankje [17] dat in 2019 is verheeld met de kust van Ameland. De aanlanding van het Bornrif Bankje vond ten oosten van de Bornrif Strandhaak [18] plaats. De westzijde van de buitendelta, tussen het Westgat en het Akkepollegat, wordt ook wel de Kofmansbult [14] genoemd. Op de Kofmansbult hebben zich recent twee ebscharen [6 en 7] met bijbehorende ebschilden gevormd [12 en 13]. Het zeewaartse ebschild [13] is de Kofmansplaat en aan de westzijde hiervan is de pilotsuppletie uit 2018-2019 [14] nog zichtbaar.

Het oostelijke uiteinde van Terschelling wordt de Boschplaat [11] genoemd. Aan de zeewaartse zijde hiervan bevindt zich de vloed-gedomineerde geul Westgat [5]. Tussen de Boschplaat en het Borndiep bevindt zich een ondiep gebied waarin diverse kleinere geulen zichtbaar zijn [3,4]. De grootte van deze geulen varieert door de tijd. Als er een duidelijke geul vormt dan ontstaat er een verbinding tussen de geulen in het bekken en het Westgat (zoals in de jaren 1975 en 1989). Deze verbinding is in het verleden vaak het Boschgat [4] genoemd. In het bekken bevindt zich het hogere plaatoppervlakte van de Zeehondenplaat [9]. Deze plaat vormt een scheiding tussen het oostelijke en westelijke deel van het bekken. Het oostelijke deel maakt verbinding met het Borndiep, het westelijke deel met het Boschgat. Aan de noordzijde heeft de Zeehondenplaat zich over de laatste jaren uitgebreid en is er een grote bank ontstaan [10].



Figuur 2-1: Overzicht van de geulen en platen van de huidige buitendelta van het Zeegat van Ameland. Bodemligging gebaseerd op de 2021 Vakloding van de buitendelta en 2017 Vakloding in het bekken. De eilanden zijn ingevuld met het AHN Cyclus 3. Alle dieptes in deze rapportage zijn t.o.v. NAP en worden weergegeven in het RD coördinatenstelsel.

2.3 Morfologische veranderingen (Elias, 2022b)

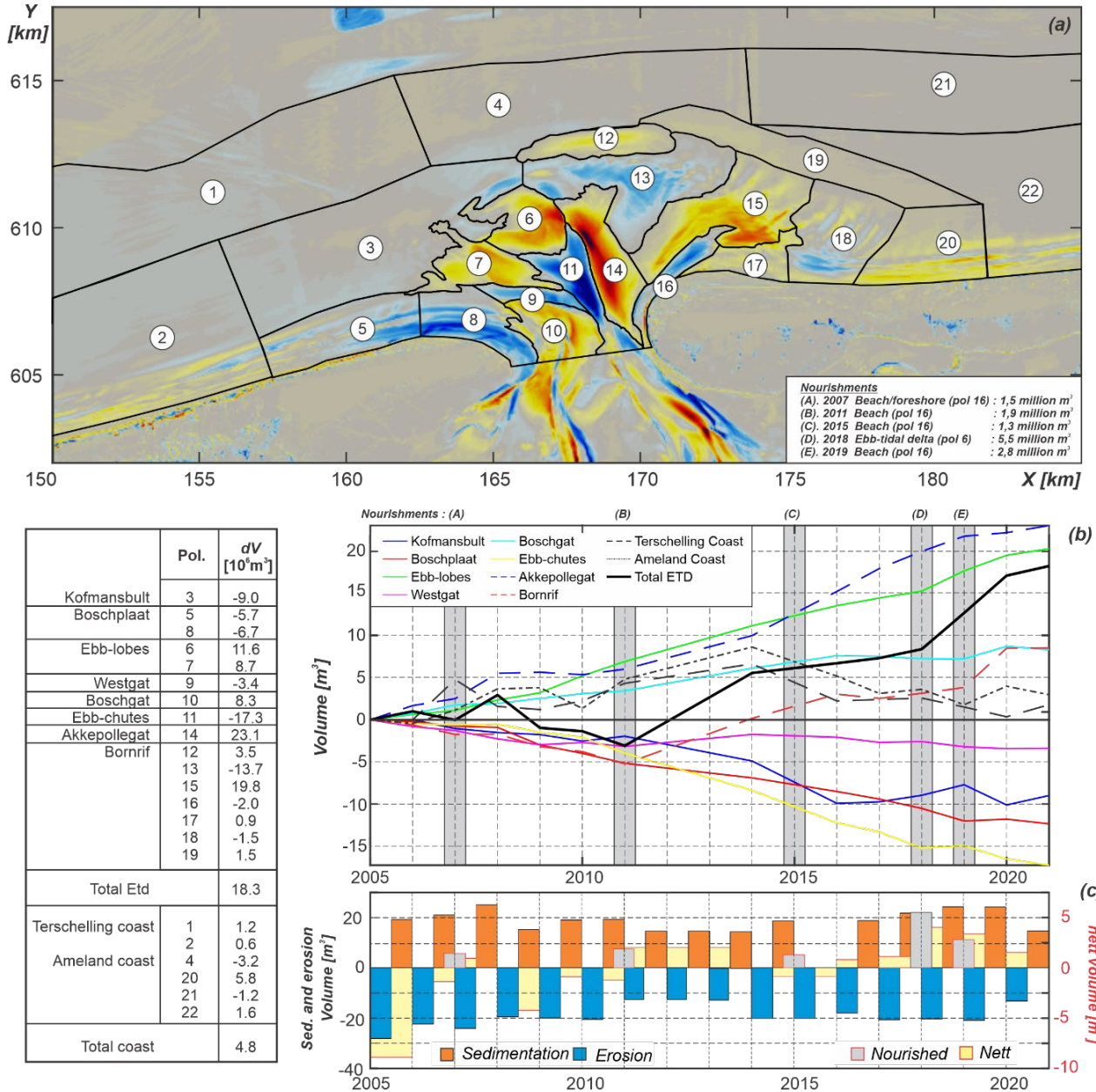
Het meest actuele overzicht van de sedimentvolumeveranderingen van de buitendelta is gepresenteerd in Elias et al. (2022). De gepresenteerde volumebalans is verkregen door het verschil in bodemligging tussen de 2005 en 2021 bodem te berekenen (Figuur 2-2). Op de buitendelta is een aaneenschakeling van sedimentatie- en erosiegebieden te zien. Voor ieder van deze gebieden is de volumeverandering berekend en geanalyseerd.

Tussen 2005 en 2011 resulteert dit in een verlies aan sedimentvolume van 0,5 miljoen m³/jaar. Sinds 2011 neemt het volume dan weer toe met gemiddeld 2,0 miljoen m³/jaar. In totaal geeft dit in de periode tussen 2005 en 2021 een netto volumetoename van ruim 18 miljoen m³. Deze verandering is klein ten opzichte van de bruto veranderingen. De jaarlijkse bruto verandering, de som van de absolute waarde van de sedimentatie en erosievolumes bedraagt gemiddeld 47 miljoen m³/jaar (Figuur 2-2c). Naast de natuurlijke processen spelen ook zandsuppleties een rol in de volumetoename van de buitendelta. Op de kop van Ameland is 7,5 miljoen m³ zand gesuppleerd tussen 2005 en 2021. Daarnaast is er nog 5,5 miljoen m³ gesuppleerd op de buitendelta. Gecorrigeerd voor suppleties, betekent dit een netto volumetoename door natuurlijke processen van ruim 5 miljoen m³ voor de periode 2005-2021.

Gebieden met grote erosie zijn de eilandstaart van Terschelling [5,8], het Westgat en de ebscharen [9,11]. Ook het zeewaartse deel van het Bornrif platform vertoont erosie [13]. De totale erosie van de Boschplaat [5,8] bedraagt 12,4 miljoen m³ over de periode 2005 – 2021 (=775.000 m³/jaar). Een deel van dit materiaal is oostelijk van de Boschplaat afgezet in het ondiepe gebied van de Boschplaat, de Zeehondenplaat [10]. Dit ondiepe gebied tussen de Boschplaat en het Borndiep neemt met 8,3 miljoen m³ in sedimentvolume toe. Aanzanding is ook zichtbaar op de ebschilden [6,7] waar het volume met 11,6 miljoen m³ en 8,7 miljoen m³ toeneemt. Een deel van de toename van polygoon 6 is gerelateerd aan de pilotsuppletie van 2018-2019. Daarnaast speelt de 17,3 miljoen m³ erosie van de ebscharen [11] een rol in het sedimentaanbod. Het zeewaartse deel van het Bornrif platform erodeert. In polygoon 13 treedt 13,7 miljoen m³ erosie op. Het geërodeerde sediment wordt landwaarts verplaatst waar het bijdraagt aan de grote aanzanding net ten noorden van de Bornrif Strandhaak. In polygoon 15 treedt 19,8 miljoen aan aanzanding op. Een tweede gebied met grote aanzanding is gelegen aan de westzijde van het Bornrif platform. Door invulling van de geulrand van het Akkepollegat treedt er 23,1 miljoen m³ aan aanzanding op (zie [14]). De vorming van een nieuwe westelijk gerichte uitstroomgeul de buitendelta op speelt waarschijnlijk een belangrijke rol in deze aanzanding. Een klein gebiedje van aanzanding is zichtbaar op de noordelijke rand van de buitendelta. In deelpolygoon 12 is het volume met 3,5 miljoen m³ toegenomen. Deze aanzanding vond plaats tijdens de oostelijke rotatie van het Akkepollegat. Tijdens deze rotatie vormden het Borndiep en het Akkepollegat tijdelijk een vrijwel rechte uitstroomgeul. Deze geul was zeer efficiënt, waardoor de geul zich ver zeewaarts doorzette en er sediment naar de rand van de buitendelta werd doorgevoerd (Figuur 2-4). Met doorgaande rotatie van het Akkepollegat en het opdrijven van de ebschilden werd de geul minder efficiënt. Het sediment op de rand van de buitendelta ligt nu eigenlijk buiten het actieve deel van de buitendelta. Alleen grote golven, tijdens stormcondities, zijn in staat dit sediment her te verdelen waardoor het lange tijd aanwezig kan zijn. Eigenlijk speelt hier een soortgelijk proces als bij de buitendeltasuppletie. Deze suppletie vervormt eerst snel tijdens stormcondities, waardoor deze dieper komt te liggen. Er zijn dan steeds grotere golven nodig om het overgebleven sediment te mobiliseren.

Een klein deel van de buitendelta, de zeewaartse rand, is in 2018 en 2019 halfjaarlijks opgenomen tijdens en na de aanleg van de buitendeltasuppletie. Elias et al. (2021) laten zien dat de invulling van het zeewaartse deel van het Akkepollegat [14] voornamelijk optreedt tijdens winter condities. De netto sedimentatie tijdens de wintermaanden ligt op 2,0 - 2,2 miljoen m³. De sedimentatie tijdens de zomermaanden is met 0,2-0,7 miljoen m³ aanzienlijk kleiner.

Op basis van deze waarnemingen is het waarschijnlijk dat de grotere golven in de winterperiode meer sediment landwaarts verplaatsen dan tijdens de kalme zomerperiode. Een soortgelijke, maar tegenovergestelde respons is zichtbaar op het Bornrif platform. Hier is de (golf-gedreven) erosie tijdens wintermaanden met 1,0–1,4 miljoen m³ veel groter dan de erosie van 0,2-0,3 miljoen m³ tijdens de zomermaanden. Deze sterke respons door de hogere golven die optreden gedurende de winter is ook zichtbaar in de erosie van de pilotsuppletie (Elias, 2022b).



Figuur 2-2: Een samenvatting van de sedimentatie-erosiepatronen en volumeveranderingen tussen 2005 en 2021. (a). Verandering van de bodemhoogte. De polygonen geven de morfologische gebieden aan gebruikt in de berekening van de volumeveranderingen. Bij de eilanden is de GHW gehanteerd als begrenzing. (b) Tijdsreeks van volumeverandering van geaggregeerde gebieden zoals weergegeven in de Tabel. De grijze vlakken geven de suppleties aan die hier zijn uitgevoerd langs de kust en op de buitendelta. (c) Overzicht van de jaarlijkse bruto sedimentatie (oranje) en erosievolumes (blauw) voor de gehele buitendelta. Gele blokken geeft de netto verandering weer.

2.4 Aanlandingscycli op de Amelander buitendelta (Elias et al. 2019 en Elias, 2022b)

2.4.1 Inleiding

De studie van Elias et al. (2019) beschrijft de langetermijntontwikkeling van het zeegat van Ameland in detail. Deze studie vormt ook de basis voor de studie gerapporteerd in Elias (2022b), waarin de analyse verder is aangevuld met de meetdata opgenomen tot 2021. De analyse richt zich op de periode 1989-2021, omdat over deze periode gedetailleerde metingen beschikbaar zijn met een resolutie van 20x20m. De oudere data is alleen beschikbaar in 250m resolutie of als analoge bodemkaart.

Elias et al. (2019) concluderen dat de huidige configuratie van de buitendelta ontstond rond 1926. Voor 1926 grenst het Borndiep nog aan de kust van de eilandstaart van Terschelling. Sinds 1926 ligt de geul dan stabiel tegen de kust van Ameland aan en wordt hier nu op zijn plaats gehouden door in de 2^e helft van vorige eeuw aangebrachte verdedigingswerken (bestortingen). De uitstroom van het Borndiep naar de buitendelta varieert dan nog wel in positie als onderdeel van het sediment-bypassing proces, met afwisselend perioden met een westelijke en noordelijke uitstroomrichting.

In de periode 1989-2021 zijn drie series van aanlandingsbanken te onderscheiden:

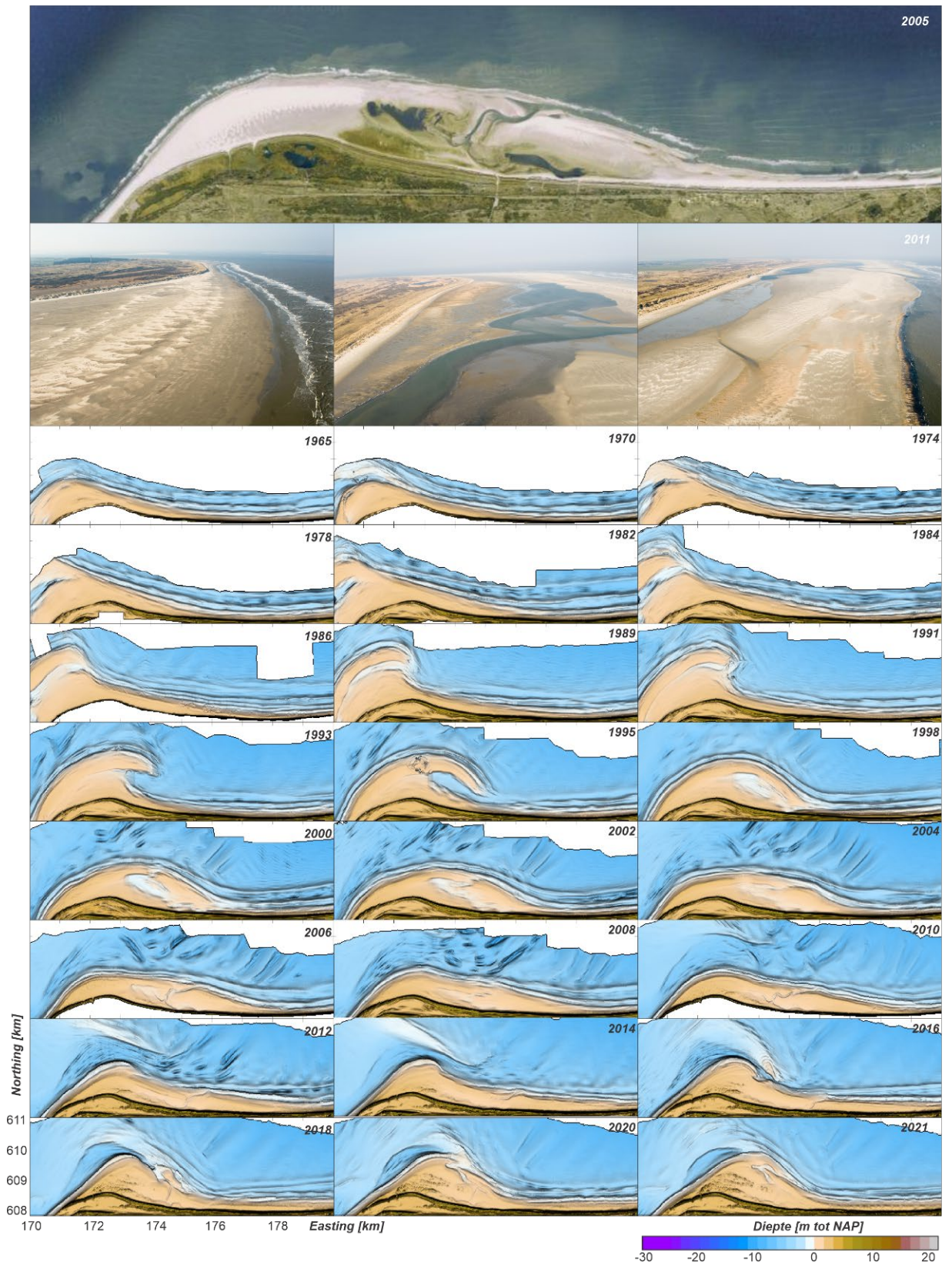
- (A) aanlanding van de Bornrif Strandhaak [H2.4.2],
- (B) aanlanding van het Bornrif Bankje [H2.4.3] en
- (C) bankvorming door ebschilden [H2.4.4] (Figuur 2-4).

2.4.2 Aanlanding van de Bornrif Strandhaak

De vorming van de aanlandingsbanken waaruit uiteindelijk de Bornrif Strandhaak ontstaat kan niet direct worden afgeleid uit de beschikbare bodemkaarten. De oudere kaarten (opgenomen vóór 1989) hebben hiervoor te weinig detail en het tijdsinterval tussen de metingen is te groot (Elias et al. 1999). Vanuit de Jarkus metingen kan wel worden geconcludeerd dat er in 1970 al een grote bank voor de kust van noordwest Ameland aanwezig was (Figuur 2-3). Deze bank neemt tussen 1970 en 1986 in omvang toe en beweegt zich richting de kust. Rond 1985 maakt de bank verbinding met de kust (zo tussen Jarkusraaien 200-500. Na aanlanding bouwt de oostelijke punt van de strandhaak snel uit naar het zuidoosten, in de richting van de kust (Figuur 2-3, 1989-1998). De noordwestelijke rand van de strandhaak erodeert en verplaatst in de richting van de kust. Initieel bouwt het noordwestelijke kustgedeelte dan ook sterk uit (tot 1989). Deze uitgebouwde kust trekt zich vervolgens weer snel terug, zoals duidelijk te zien is in de periode 1989-1995. De strandhaak zelf ontwikkelt zich als een halve cirkel (1989 – 1998). Rond 1998 bereikt de punt van de strandhaak de kust (bij Jarkusraai 760) en vervolgens ontstaat er een langgerekte uitbouw langs de kust (ongeveer 8 km lengte). Op een tijdschaal van decennia zorgt de aanlanding van platen voor een netto uitbouw van dit kustvak.

De detailontwikkeling van de Bornrif strandhaak laat duidelijk zien dat verschillende tijd- en ruimteschalen van belang zijn in de morfologische karakterisering van de kust. Over de gehele periode is dit kustvak sedimenteerd. Lokaal en tijdelijk is er echter duidelijke erosie van de kustlijn of de duinvoet aanwezig. In het geval van de strandhaak komt dit bijvoorbeeld door de insluiting van een meanderende getijgeul. Op basis van een visualisatie van de kustlidar-opnamen is dit proces duidelijk te volgen. In de eerste LiDAR opname (1997) is de strandhaak, zichtbaar als een grote halfronde zandrug, de kust dicht genaderd. Hierbij is een kleine getijdekom ingesloten tussen de strandhaak en de duinen. De in- en uitstroom vanuit deze getijdekom verloopt door een kleine geul. Door de landwaartse verplaatsing van de punt van de strandhaak wordt het geultje het kustprofiel ingedrukt en vindt er duinvoeterosie plaats (1997). Het geultje zorgt er ook voor dat de strandhaak niet aanlandt, maar oostwaarts langs de kust uitspreidt (1997-1999). Met de toegenomen lengte van de geul krijgt deze een

meanderend karakter. In 1999 en 2000 is duidelijk een tweede, meer oostwaarts gelegen duinvoetinsnijding te zien. Het geultje verliest zijn functie in 2000, als er zeewaarts een kortsluitgeul dwars door de strandhaak ontstaat. De oorspronkelijke geul langs de kust verzandt en de strandhaak kan nu vrij met de kust verhelen. Na het sterk uitbouwen van dit kustvak is het de verwachting, dat dit kustvak de komende jaren tot decennia sterk zal eroderen. Het aangelande zand wordt kustlangs (oostwaarts) verspreid.



Figuur 2-3: Een impressie van de Bornrif Strandhaak op basis van foto's opgenomen in 2005 en 2011 (boven) en de aanlanding, vorming en vervorming van de Strandhaak op basis van de JarKus metingen over de periode 1965-2021.

2.4.3 Aanlanding van de het Bornrif Bankje

Een tweede bankaanlanding vond plaats rond 2017 met de aanlanding van het Bornrif Bankje (zie Figuur 2-4 [B]). De vorming van het Bornrif Bankje is duidelijk zichtbaar tussen 1989 en 2005. Het Bornrif-Akkepollegat vormt in deze periode een grote, doorgaande ebgeul. Deze geul transporteert veel sediment naar het front van de buitendelta. Aan de noordzijde ontstaat dan een groot ondiep platform. De hoogte neemt daarbij toe waardoor golven relatief belangrijker worden. Het resultaat is dat de uitstroming van het Akkepollegat richting het westen wordt weggedrukt. Het Akkepollegat staat niet alleen aan de uitstroomzijde onder druk, maar ook richting de keel van het zeegat beginnen rond 2005 veranderingen op te treden. Aan de westzijde van de geul ontstaan kleine ebscharen die steeds meer van het ebdebiet overnemen. Dit kenmerkt het ontstaan van een nieuwe bypassing cyclus (zie 2.4.4).

Het Bornrifbankje verplaatst zich intussen steeds verder landwaarts. Een ondiepe uitloper (het Bornrifbankje) beweegt zich langs de rand van de buitendelta richting de eilandkust van Ameland (Figuur 2-4 [B]). Het Bornrif bankje landt in 2017 aan op het eiland, net ten oosten van de Strandhaak bij Jarkusraai 700. Er vormt zo een groot aanlandingsgebied, waarover waarschijnlijk veel sediment richting de centrale eilandkust van Ameland beweegt. De noordwestzijde van Ameland blijft gedurende deze hele periode dan ook krap in het zand zitten.

2.4.4 Bankvorming door ebschilden

De vorming van de ebscharen in 2005 kenmerkt de start van een nieuwe bankaanlandingscyclus en is ook al zichtbaar op de buitendelta (Figuur 2-4C). De vorming van deze banken is uitvoerig beschreven in Elias et al. (2019) en Elias (2022b). De belangrijkste inzichten uit deze studies worden hieronder samengevat.

De unieke meetreeks met bijna jaarlijkse opnames van de buitendelta tussen 2005 en 2021 maakt het mogelijk het sediment-bypassing proces in detail te beschrijven en te begrijpen. De bodemkaarten laten zien dat de morfodynamiek van de buitendelta gedomineerd wordt door de vorming en verplaatsing van verschillende ebschaar- en ebschild systemen (Figuur 2-4). Deze initieel kleine verstoringen beïnvloeden vervolgens het gehele gedrag van de buitendelta. De gehele cyclus bestaat uit 5 ontwikkelingsfasen

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

Fase 2; Vorming van verstoringen (Figuur 2-4, 2006 -2007).

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

Fase 3; Vorming van ebscharen en ebschilden (Figuur 2-4, 2006-2014).

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

Fase 4; Geul-plaatinteracties (Figuur 2-4, 2014-2019).

Met toenemende groei en zeewaartse verplaatsing van een ebschild worden de lokale golfgedreven transporten steeds belangrijker. Door de vorming van deze grote bank ver zeewaarts op de buitendelta gaan hier steeds meer golven breken. Deze golven genereren een oostwaarts transport en verplaatsen het ebschild oostwaarts. Hierbij begint de bank de voormalige ebgeul, Akkepollegat, steeds verder naar het oosten te drukken.

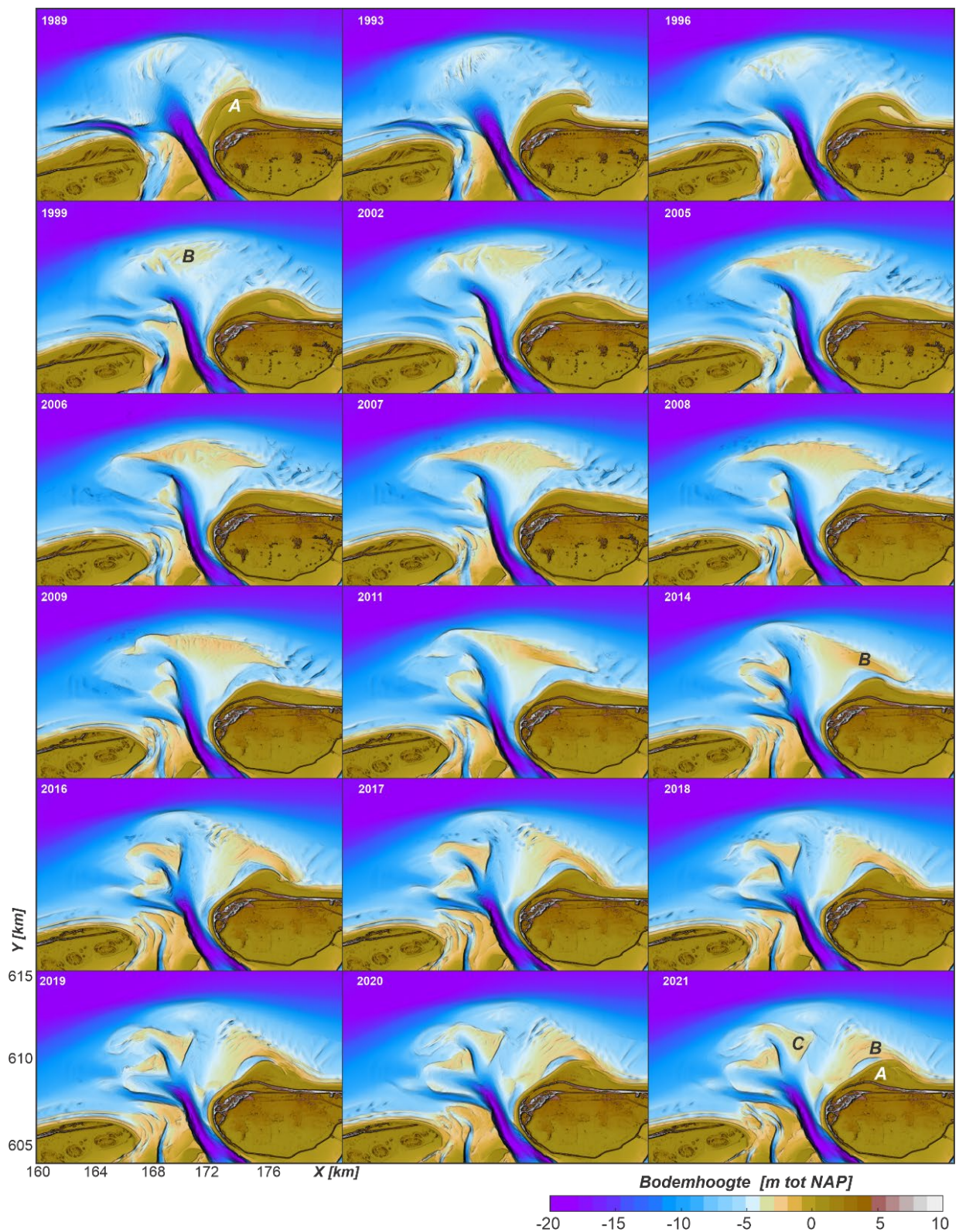
Fase 5; Heroriëntatie van de hoofdgeul en benedenstroomse bankaanlanding (Figuur 2-4, 2019-2020).

Met de groei van de ebscharen ontstaan er meerdere uitstroomopeningen van het Borndiep de buitendelta op. De uitstroming door het Akkepollegat wordt daarbij steeds minder efficiënt doordat het zeewaartse ebschild de geul dichtdrukt en oostelijk wegduwt. De meest zuidelijke ebschaar heeft een sterker getijverhang en vormt daarmee een efficiënt(er) alternatief. Deze ebschaar ontwikkelt zich dan ook sterk. Rond 2019 zou kunnen worden geconcludeerd dat dit nu de hoofduitstroomgeul op de buitendelta vormt (het Nieuwe Akkepollegat). Hiermee is het proces van *main ebb-channel switching* 'afgerond'.

Het is nog de vraag hoe het Westgat gaat reageren op deze verandering. Langs het Nieuwe Akkepollegat vormt zich een langgerekte bank die deze geul scheidt van het Westgat. Deze bank zorgt ervoor dat het Westgat in breedte afneemt, maar de geuldiepte neemt toe. Het is mogelijk dat de banken het Westgat steeds verder wegdrücken. Een optie is dan dat het Westgat direct verbinding gaat maken met het Boschgat. Er ontstaat dan (tijdelijk) een tweegeulen systeem zoals dat ook in bijv. 1989 te zien was.

Pilot buitendeltasuppletie

Op het meest zeewaarts gelegen ebschild is tussen maart 2018 en februari 2019 een pilotsuppletie uitgevoerd. Hierbij is 5 miljoen m³ zand aangebracht (Van Rhijn, 2019). De omvang van deze suppletie is groot genoeg om goed zichtbaar te zijn in de bodemdata (Figuur 2-4, 2018-2021). Maar de omvang is waarschijnlijk niet groot genoeg om de morfologische processen op de buitendelta significant te beïnvloeden (Elias, 2021). De ebschild en ebschaar systemen blijven een gelijkwaardig gedrag vertonen. Tweeënhalf jaar na aanleg is er 2,1 miljoen m³ aan erosie opgetreden. Dit sediment is in de banken van de buitendelta opgenomen zonder daarbij de autonome morfologische processen te verstoren (Elias, 2021).



Figuur 2-4: Ontwikkeling van de buitendelta tussen 1989 en 2021 op basis van de Vaklodingen, SBW en Kustgenese 2 metingen (zie overzicht in Appendix B.1). De aanlandingsbanken van de 3 sediment-bypassing cycli zijn weergegeven met A, B en C.

3 Data en Methode

3.1 Bodemmetingen

De basis voor de hier uitgevoerde analyses zijn de Vaklodingen en aanvullende datasets zoals opgenomen tijdens de Sterkte en Belastingen Waterkeringen (SBW) campagne (Zijderveld en Peters, 2006) en Kustgenese 2 (Van Prooijen et al., 2022; Elias et al., 2022).

Gebiedsdekkende kaarten van het zeegat worden al sinds 1958 opgenomen en gearchiveerd door Rijkswaterstaat. Sinds 1985 gebeurt dit volledig digitaal. De oudere bodemkaarten werden opgeslagen als analoge kaarten. Een deel van deze kaarten is vervolgens gedigitaliseerd als onderdeel van het Kustgenese programma (De Boer et al., 1991a,b; Rakhorst et al., 1993). Deze kaarten hebben echter een lagere resolutie dan de data opgenomen na 1985. In de hier uitgevoerde detailanalyses zijn deze daarom niet meegenomen en is alleen de periode 1989-2021 beschouwd.

De reguliere Vaklodingen bestaan uit het 3-jarlijks opmeten van de buitendelta en aangrenzende kust. Het bekken wordt elke 6 jaar opgenomen. Alle data worden na inwinning met vaste protocollen verwerkt door Rijkswaterstaat en opgeslagen. In het zeegat van Ameland zijn naast deze reguliere Vaklodingen ook aanvullende projectmetingen verricht in het kader van de onderzoeksprogramma's SBW en Kustgenese 2. Deze data zijn vervolgens door Rijkswaterstaat volgens het Vaklodingen protocol verwerkt en opgeslagen. De SBW metingen zorgen voor een jaarlijkse dekking van grote delen van het zeegat en buitendelta in de periode 2007-2010. De Kustgenese 2 metingen vullen de dataset aan met halfjaarlijkse metingen in 2016 en 2017 en jaarlijkse metingen tot 2020. Er ontstaat zo een zeer uitgebreide dataset met bodemmetingen (Tabel 3-1 en Appendix A). Deze dataset vormt ook de basis van de eerder uitgevoerde morfologische studies zoals samengevat in Elias et al. (2019, 2022) en Elias (2022b).

Tabel 3-1: Een overzicht van de beschikbare bodemdata voor het bekken en de buitendelta van het zeegat van Ameland onderverdeeld in reguliere Vaklodingen, en bodemdata gemeten in kader van de projecten SBW en Kustgenese 2.0.

Jaar	Dataset	Dekking		Jaar	Dataset	Dekking	
		Bekken	Buitendelta			Bekken	Buitendelta
1989	Vakloding	X	X	2011	Vakloding	channels	X
1993	Vakloding	X-	X	2014	Vakloding	X	X
1996	Vakloding	-	X	12-09-2016	KG2	X	X
1999	Vakloding	X	X	30-01-2017	KG2	-	X
2005	Vakloding	X	X	18-09-2017	KG2	X	Partial
2006	SBW	channels	X	31-05-2018	KG2	-	X
2007	SBW	X	X	12-10-2018	KG2	-	Partial
2008	Vakloding	X	X	12-07-2019	KG2	-	X
2009	SBW	channels	X	2020	Vakloding	-	X
2010	SBW	channels	X	2021	KG2	-	X

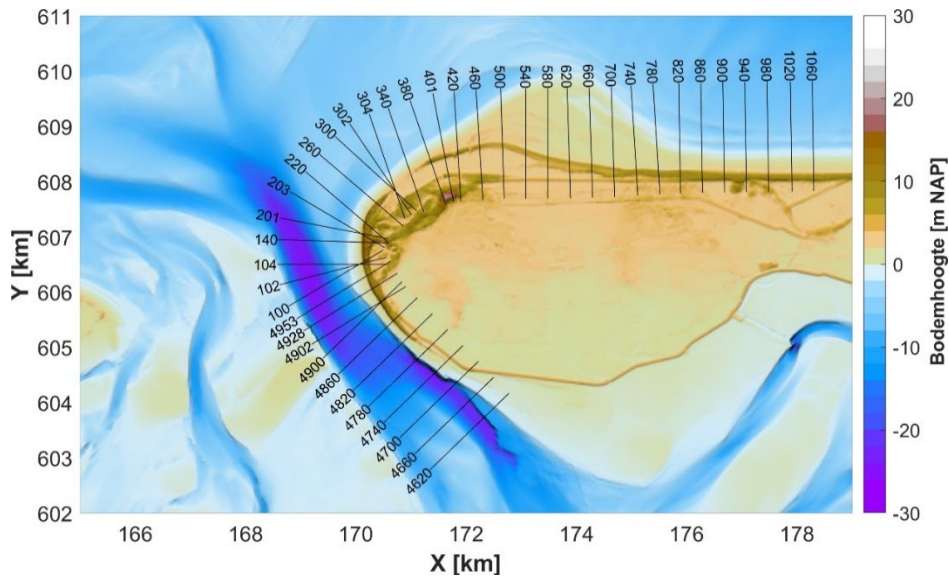
3.2 Suppleties

Sinds 1979 zijn er zandsuppleties uitgevoerd op Ameland. Tabel 3-2 geeft een overzicht van de uitgevoerde suppleties langs de westkust van Ameland en de buitendelta. Figuur 3-1 geeft de Jarkusraaien langs de westkust van Ameland weer. In totaal is er hier in de periode 1979-2021 16.5 miljoen m³ gesuppleerd.

Tabel 3-2. Overzicht van de uitgevoerde zandsuppleties op de buitendelta en bij Ameland Noordwest.

Jaar	Type	Volume (10 ³ m ³)	Locatie (raai nr)
1979	strandsuppletie	300	160-220
1994	strandsuppletie	190	4860-4960
1997	strandsuppletie	511	120-300
2000	strandsuppletie	401	100-260
2004	strandsuppletie	404	200-320
2007	vooroeversuppletie	1201	195-302
2007	strandsuppletie	303	200-320
2010-2011	strandsuppletie	1889	200-400
2015	strandsuppletie	1300	140-402
2017-2018	geulwandsuppletie	2500	4620-4820
2018-2019	pilot buitendeltasuppletie ⁽¹⁾	5000 (5450 in situ)	buitendelta
2019	strandsuppletie	2540	120-420
Totaal		16539	

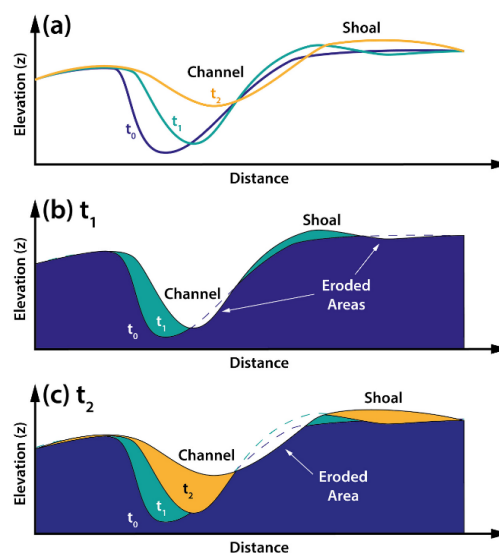
⁽¹⁾ Het ontwerp van de pilot buitendeltasuppletie heeft een in-situ volume van 5 miljoen m³. Van Rhijn (2019) berekent op basis van de bodemveranderingen bij aanleg dat er 5,45 miljoen m³ geplaatst is in en rond het suppletiegebied.



Figuur 3-1. Overzicht van de Jarkusraaien langs de Westkust van Ameland. Achtergrondkaart is de 2021-Vaklodgingen data gecombineerd met AHN2.

3.3 Methodiek

Een schatting van de volumes in de aanlandingsbanken wordt verkregen door de ‘actieve’ sedimentvolumes uit te rekenen. De ‘actieve’ sedimentvolume benadering wordt beschreven door Pearson et al. (2022) en is succesvol toegepast voor de bepaling van de sedimentvolumes in de aanlandingsbanken van Schiermonnikoog (Elias, 2022a). Het ‘actieve’ sedimentvolume wordt hierin uitgerekend door de sedimentdikte te berekenen als verschil tussen de gemeten bodem en de minimum bodem. De minimumbodem wordt hierbij gedefinieerd als de onderkant van de morfologische enveloppe over een representatieve tijdsperiode (zie Figuur 3-2). In deze studie is hiervoor de periode 1989-2021 gebruikt. 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. Door toepassing kan een schatting worden gekregen van de hoeveelheid sediment die bijdraagt aan de morfologische processen.



Figuur 3-2. Conceptuele weergave van de minimum bodem en het actieve volume overgenomen uit Pearson et al (2022). Het donkerblauwe vlak geeft de minimum bodem over de gehele tijdserie weer. De oranje en groene vlakken geven het actieve sedimentvolume weer.

De gehanteerde methode in deze studie is ook gebruikt door Elias (2022b) en wordt weergegeven in Figuur 3-4. De analyse bestaat uit 5 stappen:

Stap 1 – Optimalisatie van de bodemdata

De Vaklodingen en jaarlijkse lodingen tussen 1989 en 2021 beschreven in paragraaf 3.1 zijn gebruikt als basis voor de bodemkaarten (Figuur 3-4A). Missende datapunten zijn daarbij zo veel mogelijk ingevuld door het gebruik van aanvullende datasets (bijv. Jarkus of LiDAR) of door interpolatie. De totale tijdserie van alle kaarten en de tijdserie van de volledig gevulde kaarten zijn apart opgeslagen.

Stap 2 – Bepaling van de referentiebodem

Bij de bepaling van de minimum bodem (Figuur 3-4B) is per rasterpunt van het bodembestand gekeken of er in alle jaren (1989-2021) een bodemwaarde aanwezig is. Als een waarde ontbrak in één van de jaren is het punt niet meegenomen in de analyse.

Stap 3 - Afbakening van het studiegebied

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 (zoals weergegeven in Figuur 3-4). Aan de zeezijde is ervoor gekozen de -15 m contour te gebruiken als scheiding tussen vooroever en diepe vooroever. De diepe vooroever lijkt hier gevoelig te zijn voor meetfouten (Elias, 2018). Het niet meenemen van deze zone voorkomt dat de resultaten van de analyse hierdoor negatief 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 gemiddelde ligging van het wantij tussen 1989 en 2021. Deze begrenzingen liggen vast voor alle uitgevoerde analyses. In de studie van de buitendelta is de keuze van deze begrenzing verder niet belangrijk. De grenzen liggen ver genoeg weg van het interessegebied.

Stap 4 – Berekening dikte sedimentpakket

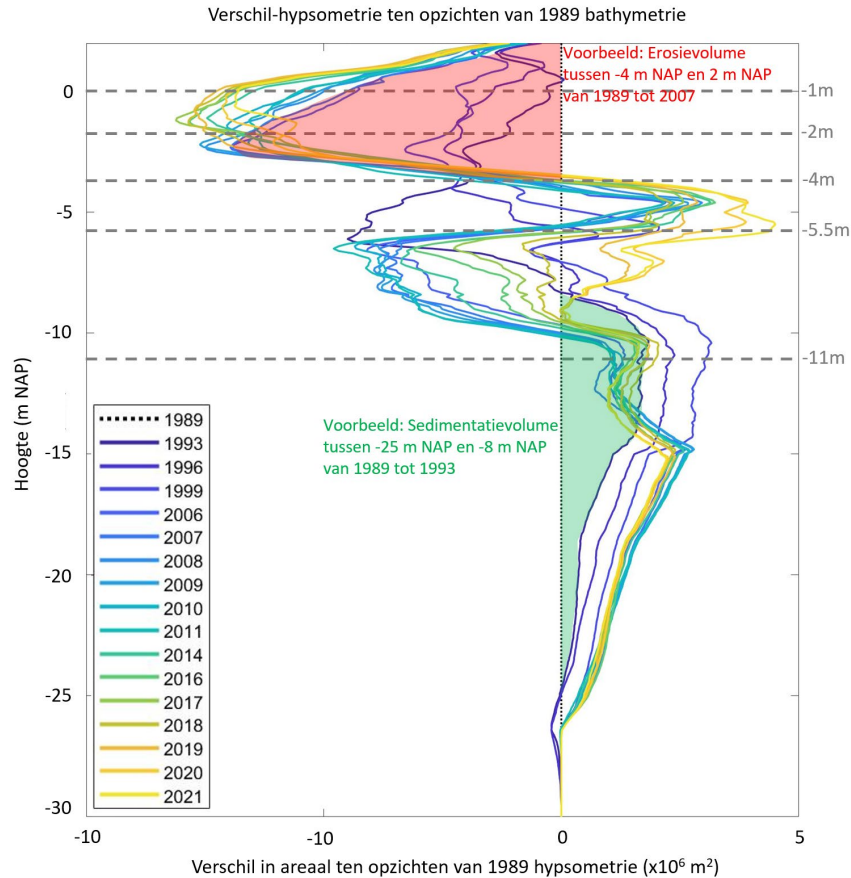
Voor iedere bodemkaart is het verschil met de minimum bodem uitgerekend (Figuur 3-4C). Dit verschil is de dikte van de actieve sediment laag. Voor verschillende deelpolygonen kan dan de sedimenthoeveelheid uitgerekend worden.

Stap 5 – Kwantificering van de volumes

Kwantificering van de volumes is gebaseerd op het maken van representatieve polygonen van morfologische eenheden. Een voorbeeld van deze polygonen op de schaal van het gehele zeegat is gegeven in Figuur 3-4D. De zeewaartse grens van de buitendelta is vastgesteld op de -11 m contour, aangezien de dikte van de actieve sediment laag van de buitendelta dieper dan -11 m sterk afnam. De 0 m NAP contourlijn geeft voor alle bodemkaarten een min of meer gelijke afbakening in het eiland. Het onderscheid tussen buitendelta en bekken volgt rechtstreeks uit de dekking van de beschikbare meetdata. Deze begrenzing ligt hier pakweg in het midden tussen de eilanden. Binnen het bekken is er ook een onderverdeling gemaakt in een diep en ondiep deel van het systeem (representatief voor geulen en platen in het bekken). Als begrenzing is daarbij de -1,5 m NAP contourlijn gebruikt. Deze contourlijn geeft een continue begrenzing van geul en plaat en komt ruwweg overeen met de laagwaterlijn. Dit is niet het doel van deze studie, maar door het volgen van zowel het plaatareaal als het plaatvolume is het mogelijk veel betere schattingen van bijvoorbeeld het meegroeivermogen van deze platen te maken.

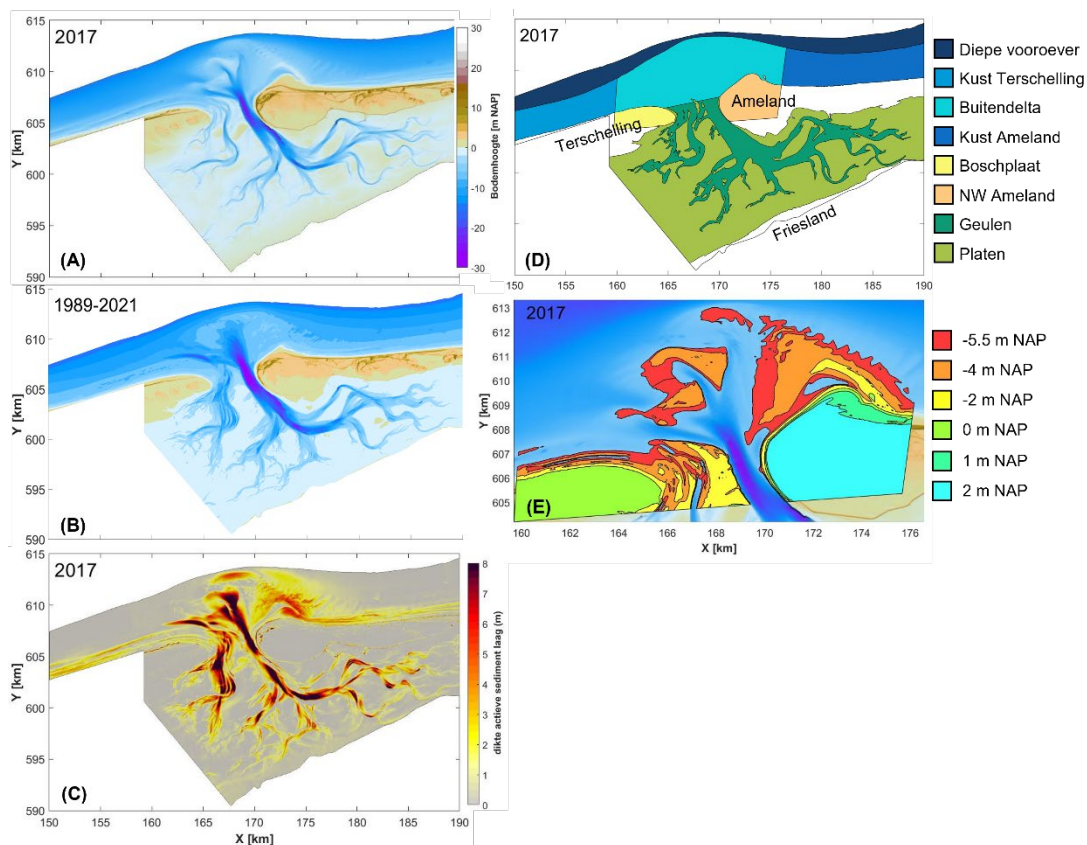
Kwantificering van de volumes in de buitendelta is vervolgens gebaseerd op een analyse van de -5,5; -4; -2 m en 0 m NAP contourlijnen (Figuur 3-4E). Deze contourlijnen zijn gekozen aan de hand van een analyse van de hypsometrische (verschil)curve (Figuur 3-3). Een

hypsometrische curve is een cumulatieve verdelingsfunctie van hoogte (t.o.v. NAP) over het oppervlakte binnen een geografisch gebied.



Figuur 3-3: Verschil tussen de hypsometrische curve van individuele jaren (Tabel 3-1) en de begin hypsometrie van 1989. Het oppervlakte tussen de nullijn en een lijn rechts ervan weergeeft het sedimentatievolume tussen de twee metingen voor het betreffende diepte interval. Het oppervlakte tussen de nullijn en de lijn links ervan weergeeft het erosievolume tussen de twee metingen voor het betreffende diepte interval.

De cumulatieve verandering in oppervlakte per diepte biedt inzicht in welke diepte intervallen de sedimentvolumes zijn toegenomen (geaccumuleerd) of afgenomen (geërodeerd). Een verandering in sedimentatie-erosie gedrag treedt op bij de -5,5 m en -4 m contourlijnen. Deze contourlijnen zijn geselecteerd voor de analyse. De kustlijn is gekozen op de gemiddelde water lijn (0 m contour).

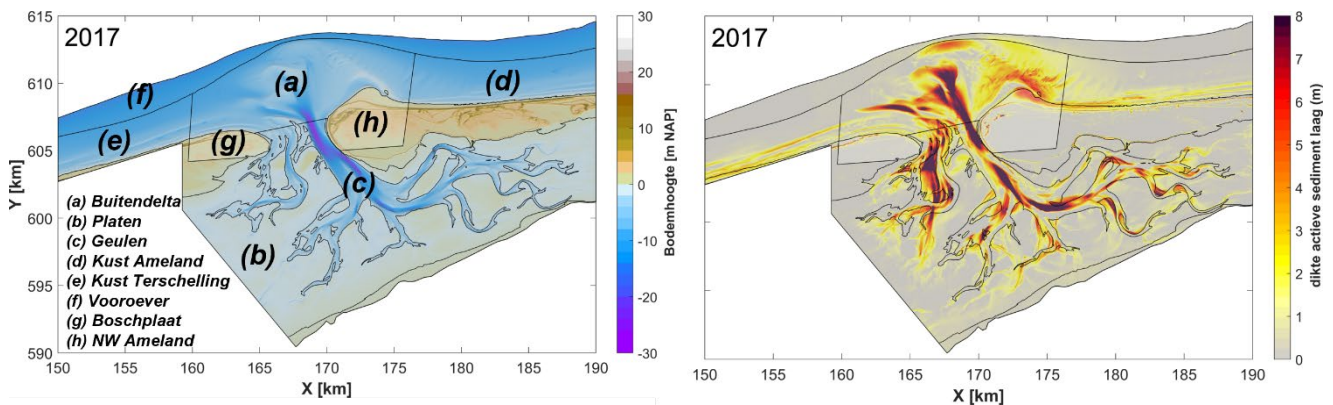


Figuur 3-4. Een overzicht van de methode ter berekening van de sedimentvolumes. (A) Gemeten bodemligging in 2017 en afbakening van het studiegebied (B) Minimum bodemligging 1989-2021 (C) Berekende dikte van de sediment laag t.o.v. de minimum bodemligging (2017-minimum bodem) (D) Voorbeeld van deelpolygoenen voor berekening van de volumes en (E) Voorbeeld van de deelpolygoenen van de buitendelta voor berekening van de volumes.

4 Volumebalansen

4.1 Grootschalige analyse van het gehele zeegat (bekken, kust en buitendelta)

Een grootschalige volumebalans van het zeegat is gebaseerd op een indeling van platen en geulen in het bekken en een onderverdeling van de kustzone in buitendelta, vooroever en kust van Ameland en Terschelling (Figuur 4-1). Door beschikbaarheid van de meetdata wordt deze analyse uitgevoerd voor de periode 1989-2017. Als begrenzing tussen geul en plaat in het bekken (resp. (b) en (c) in Figuur 4-1) is de -1,5 m contourlijn genomen. De grens tussen vooroever en kust en buitendelta is gekozen op -11 m. Langs de eilandkusten is de begrenzing gelegd bij de 0 m contour. De overgang van buitendelta naar centrale eilandkust ligt voor Terschelling bij Jarkus-raai 2280 en voor Ameland bij raai 840. Schattingen van de volumeveranderingen van de eilandkoppen worden hierbij toegevoegd vanuit de gedetailleerde analyses zoals beschreven in H. 4.2 (Bornrif Strandhaak) en H. 4.5 (Boschplaat). Het overige deel van de eilanden is in deze analyse niet meegenomen. De contouren worden per bodemmeting opnieuw bepaald en variëren dus gedurende de tijdsperiode.



Figuur 4-1: Overzicht van de verschillende deelgebieden waarop de grootschalige volumeveranderingen in de actieve zone berekend zijn. In de linker figuur zijn deze geprojecteerd op de gemeten bodemligging in 2017 en in de rechterfiguur op de dikte van de actieve sedimentlaag in 2017.

De berekende actieve volumes laten zien dat er zich gemiddeld 254 miljoen m^3 actief sediment in de kustzone van Ameland (a, d-h in Figuur 4-1) bevindt (Tabel 4-1 en Figuur 4-2). In het bekken (b en c in Figuur 4-1) is dit actieve volume met gemiddeld 297 miljoen m^3 iets hoger. Dit hogere volume wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat er zich diepe geulen in het bekken bevinden. Door het verplaatsen van de geulen vinden er relatief grote verticale veranderingen plaats. Hierdoor ligt de minimumbodem lager en is de laagdikte per meting t.o.v. deze minimumligging groter.

Het actieve sediment in de totale kustzone is, ondanks suppleties, in 2017 volgens deze analyse ten opzichte van 1989 met 20 miljoen m^3 in volume afgenomen. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat er in de periode 1989-2005 grote slingeringen in volume optreden. Dit is ook één van de redenen waarom de periode 1989-2005 in eerdere studies (o.a. Elias et al. 2021; Elias, 2022a) niet is meegenomen in de analyses. Deze slingeringen zijn waarschijnlijk gerelateerd aan de meetnauwkeurigheid. De 1999 meting wijkt met name sterk af van de omliggende metingen. Sinds 2005 blijft het totale volume vrijwel gelijk. De 12 miljoen m^3 sedimentatie op de buitendelta, mede veroorzaakt door de pilotsuppletie, is dan vrijwel gelijk aan de 10 miljoen m^3 erosie van de Boschplaat.

Een vergelijking van de resultaten van deze studie met de eerdergenoemde studies geeft vrijwel identieke volumeveranderingen over de periode 2005/2006-2021 van 18 miljoen m³ (Elias et al. 2021, Elias, 2022a) versus 19,5 miljoen m³ in deze studie. Een mogelijke oorzaak voor deze kleine afwijkingen zijn de niet geheel gelijke polygoongrenzen van de buitendelta. In het vervolg van H4.1 worden de volumeveranderingen uit Tabel 4-1 (1989 – 2017 voor het gehele zeegatsysteem) en Tabel 4-2 (1989 – 2021 voor de gehele Noordzeekustzone) beschreven.

Tabel 4-1: Actieve volumes in miljoen m³ binnen geselecteerde gebieden voor het zeegat van Ameland over de periode 1989-2017.

Jaren	Kustzone						Bekken		Totaal	
	Buiten-delta (a)	Kust Ameland (d)	Kust Ter. (e)	Diepe Voor-oever (f)	Bosch -plaat (g)	NW Ame (h)	Geulen (b)	Platen (c)	Kust	Bekken
1989	144.49	29.37	19.27	14.66	33.02	22.74	118.08	153.56	263.56	271.63
1993	142.04	22.23	21.06	12.62	31.74	16.93	131.42	150.96	246.63	282.38
1999	175.87	28.80	25.66	22.85	21.74	12.33	144.89	156.68	287.25	301.56
2006	161.40	24.34	21.76	10.73	13.90	10.91	154.39	142.87	243.05	297.27
2011	160.25	31.47	21.05	8.97	9.39	9.83	157.41	157.79	240.96	315.20
2017	173.16	29.66	19.61	7.04	3.68	10.48	154.39	160.38	243.64	314.77

Bekken

Het bekken neemt met 43 miljoen m³ in volume toe sinds 1989. Deze toename vindt vooral plaats tot 2011. De volumes van de 2011 en 2017 bodem zijn vrijwel identiek. Gemiddeld over het gehele bekken zou dit resulteren in een netto hoogtetoename van 6 mm/jaar. De volumetoename zit met name in de geulen en in de periode 1989-2006. De platen slingeren om de volume-nullijn heen. In 2017 is er een kleine netto toename in plaatvolume te observeren van 7 miljoen m³ t.o.v. het 1989 volume. Uitgedrukt in een hoogteverandering zou dit betekenen dat de platen gemiddeld met 1,4 mm/jaar in hoogte zijn toegenomen. De gemiddelde toename in hoogte van de geulen is groter: + 23 mm/jaar. Het opvullen van de geulen in het westelijke deel van het kombergingsgebied zal al een groot deel van de geulvolume toename verklaren.

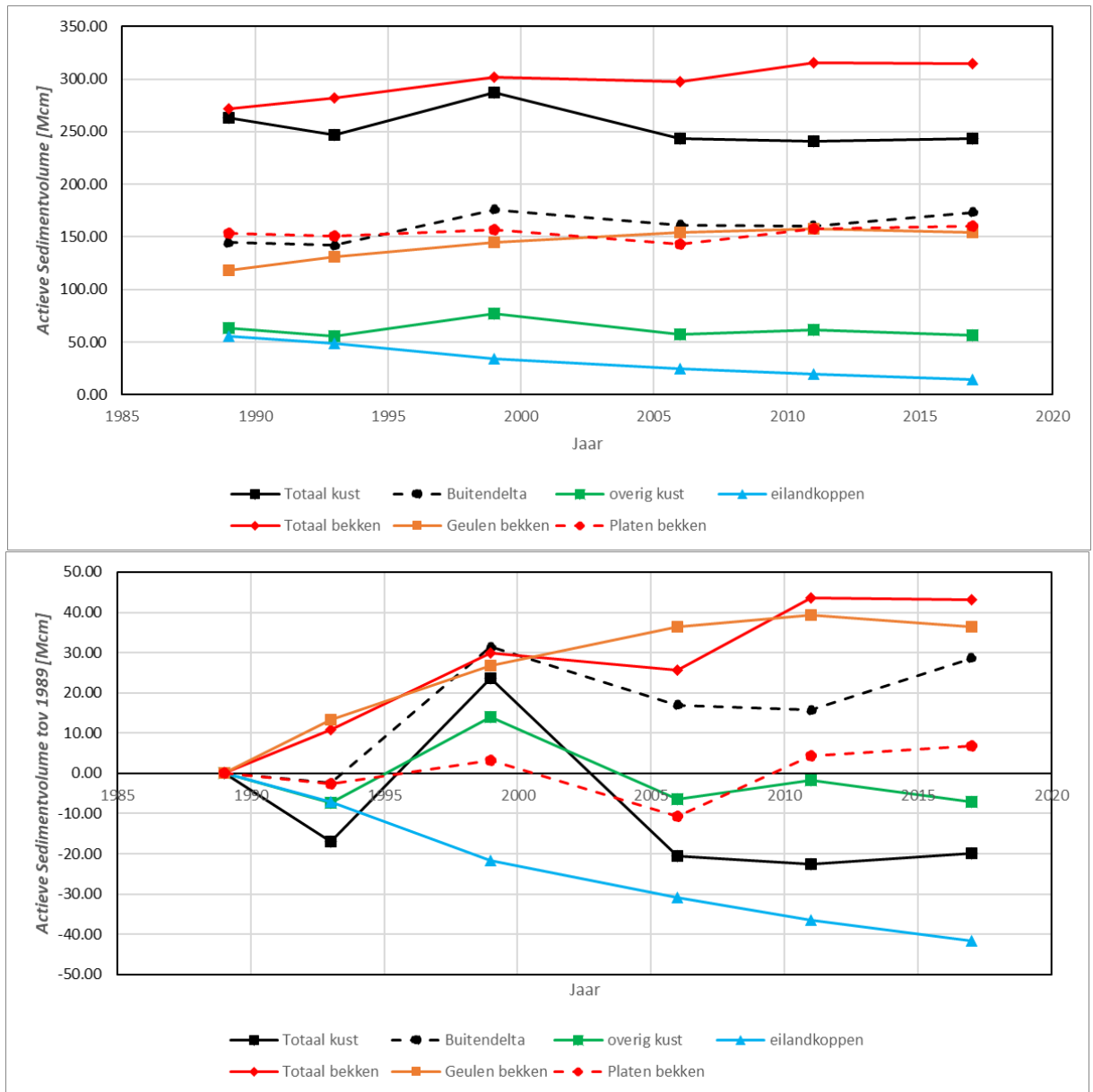
Buitendelta en kust

De buitendelta en kust vertonen grote fluctuaties in volume tot 2006 (Tabel 4-2 en Figuur 4-2). De toename in volume van gemiddeld 1 miljoen m³/jaar voor de buitendelta en 1,2 miljoen m³ voor de gehele kustzone lijkt echter wel in lijn te zijn met het volumeverloop in de periode 2006-2021. De buitendelta neemt met 19,5 miljoen m³ in volume toe over de periode 2006-2021. Het volumeverloop vertoont een vrij stabiel volume in de periode 2006-2011. Een grote toename in volume is dan zichtbaar tussen 2011 en 2021. De 2020 en 2021 volumes zijn vrijwel identiek.

Suppleties zullen zeker bijgedragen hebben aan de geobserveerde volumetoename. In deze periode is er meer dan 13 miljoen m³ gesuppleerd. Op de eilandkop van Ameland vonden grote strandsuppleties plaats in 2010-2011 (1,9 miljoen m³), 2015 (1,3 miljoen m³) en 2019 (2,5 miljoen m³). In de keel van het zeegat is in 2018-19 een grote geulwandsuppletie uitgevoerd van 2,5 miljoen m³. Van Onselen en Vermaas (2020) laten zien dat in de eerste twee jaar na aanleg ruim driekwart van deze suppletie al was verspreid in voornamelijk noordelijke richting. Op de buitendelta is in 2018-19 de 5 miljoen m³ buitendeltasuppletie uitgevoerd. Deze suppletie vertoont een verlies van zo'n 2,1 miljoen m³ in de tweeënhalf jaar na aanleg. Dit sediment is waarschijnlijk naar de aangrenzende buitenbanken verplaatst (Elias, 2022a). Een tweede bron van sediment voor de buitendelta (en ook voor het bekken) is de aangrenzende

eilandstaart van Terschelling, de Boschplaat. Het geschatte volumeverlies van de Boschplaat bedraagt 30 miljoen m³ sinds 1989 (zie H4.5 voor details).

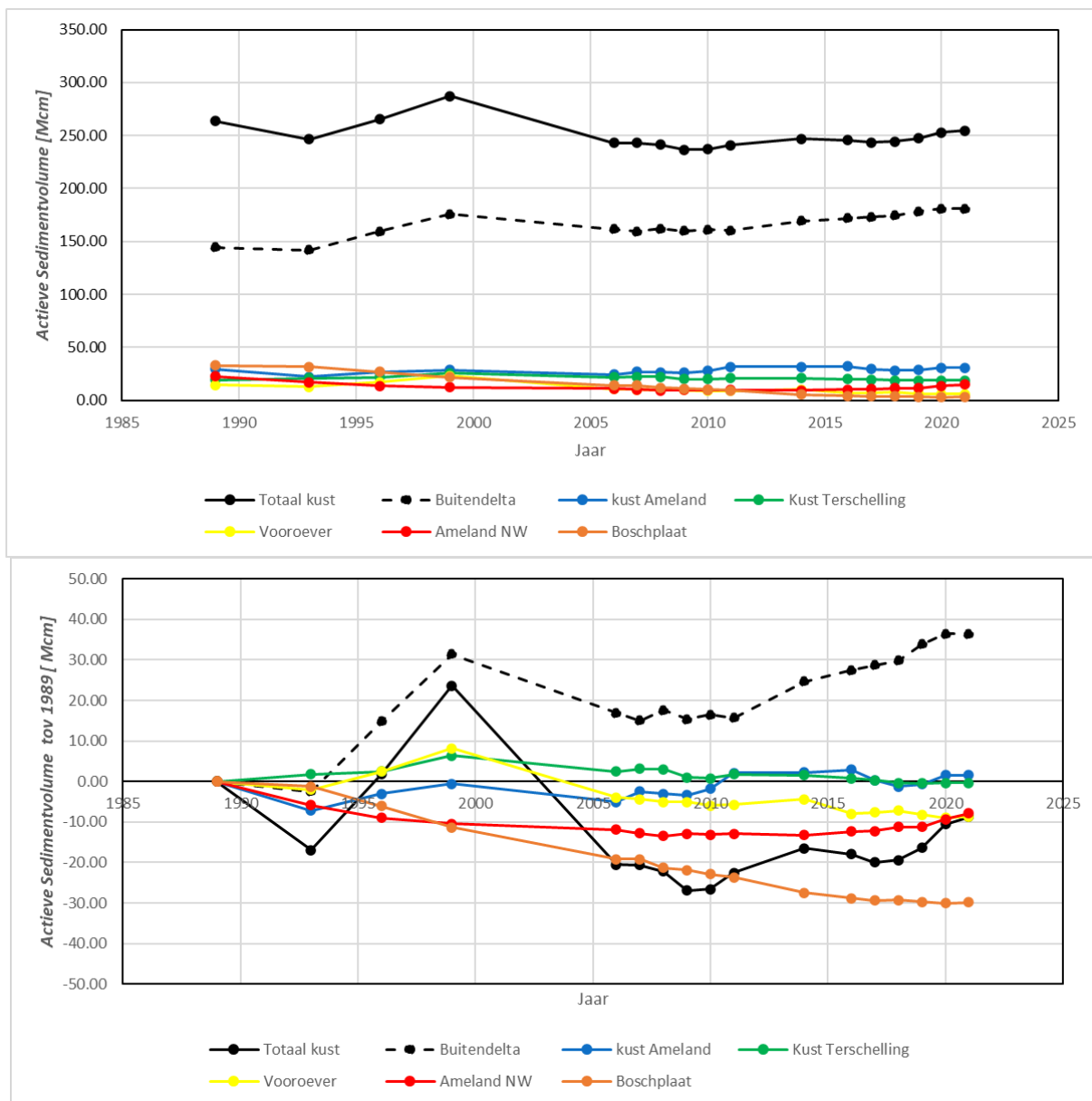
In totaal nemen het bekken en de buitendelta van het Amelanders Zeegat tussen 1989 en 2017 met 72 miljoen m³ in sedimentvolume toe. Op basis van de geobserveerde volumeveranderingen kan worden geconcludeerd dat het grootste deel van deze aanzanding afkomstig is van de erosie van de Boschplaat (42%), maar ook de suppleties dragen significant bij aan de volumeverandering (18%). Ameland NW vertoont wel grote erosie maar dit sediment wordt waarschijnlijk voor een groot deel oostelijk, richting de centrale eilandkust van Ameland, verplaatst (zie H4.2 en H4.3 voor detail). De berekende erosie op de diepe vooroever bedraagt -8 miljoen m³. Het is niet direct duidelijk of dit sediment ten goede komt aan de buitendelta. Het lijkt waarschijnlijk dat de getijstromingen dit kustlangs afvoeren. In totaal is zo'n 60% van de aanzanding van de buitendelta en het bekken goed te verklaren uit de lokale volumeveranderingen, zoals de erosie van de Boschplaat. Dit betekent dat de overige 40% (29 miljoen m³) van buiten het balansgebied aangevoerd moet zijn. Dit zou een aanvoer van minimaal 1,0 miljoen m³/jaar zijn. Deze waarde is maar een ruwe schatting. De werkelijke aanvoer zal hoger zijn vanwege verliezen naar de kwelder en bodemdaling. Gaan we ervan uit dat de verliezen naar de kwelder vooral door slib worden ingevuld, dan lijkt de schatting van 1,0 miljoen m³ zandtoevoer vanaf de eilandkust van Terschelling wel een realistische waarde. Erosie van de noordoostzijde van de buitendelta van het Vlie (Elias, 2021) zou een mogelijke bron van dit zand kunnen zijn.



Figuur 4-2 (boven): Actieve sedimentvolume (10^6 m^3) per morfologische eenheid in het Zeegat van Ameland. Onder: Verandering in actief volume sinds 1989. De buitendelta is (a) in Figuur 4-1, de geulen en platen in het bekken zijn respectievelijk (c) en (d), overig kust is (d, e, f).

Tabel 4-2: Actieve volumes binnen geselecteerde contourklassen van de buitendelta en Noordzeekust (zie Figuur 4-1).

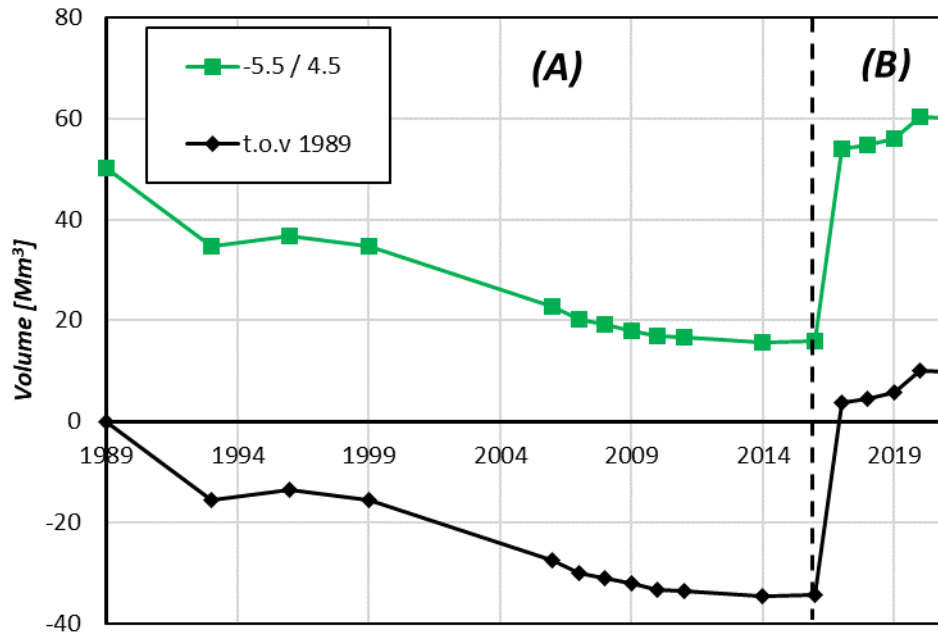
Jaren	Buiten-delta (a)	Kust Ameland (e)	Kust Ter. (d)	Diepe Vooroever (f)	Bosch-plaat (g)	NW Ameland (h)	Totaal Noordzee Kust
1989	144.49	29.37	19.27	14.66	33.02	22.74	263.56
1993	142.04	22.23	21.06	12.62	31.74	16.93	197.96
1996	159.34	26.35	21.75	17.10	26.99	13.77	224.55
1999	175.87	28.80	25.66	22.85	21.74	12.33	253.18
2006	161.40	24.34	21.76	10.73	13.90	10.91	218.24
2007	159.53	26.85	22.36	10.25	13.90	9.98	219.00
2008	162.11	26.32	22.30	9.60	11.77	9.29	220.32
2009	159.83	26.00	20.23	9.60	11.16	9.85	215.66
2010	160.98	27.56	20.01	8.70	10.18	9.58	217.25
2011	160.25	31.47	21.05	8.97	9.39	9.83	221.74
2014	169.12	31.64	20.90	10.26	5.60	9.51	231.93
2016	171.98	32.26	20.09	6.66	4.20	10.39	230.99
2017	173.16	29.66	19.61	7.04	3.68	10.48	229.47
2018	174.34	28.13	18.95	7.48	3.79	11.49	228.90
2019	178.34	28.67	18.80	6.49	3.36	11.49	232.31
2020	180.94	30.96	18.93	5.72	2.96	13.45	236.55
2021	180.93	30.96	18.91	6.01	3.16	14.87	236.80



Figuur 4-3 (boven): Actieve sedimentvolume (10^6 m^3) per morfologische eenheid van de buitendelta en kust bij Ameland. Onder: Verandering in actief volume sinds 1989.

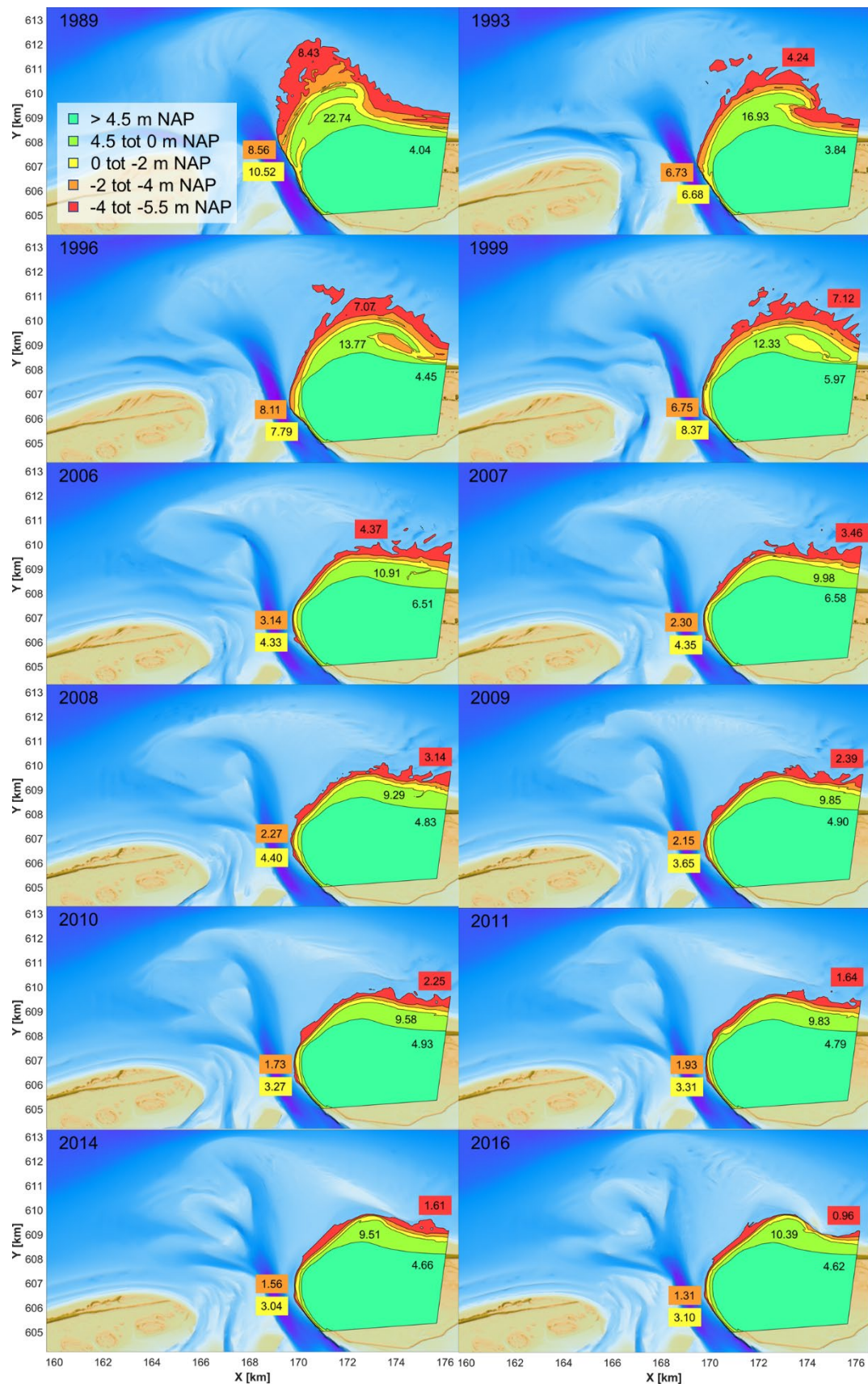
4.2 Bornrif Strandhaak

De volumeontwikkeling van de geselecteerde contouren tijdens verheling van de Bornrif Strandhaak is weergegeven in Figuur 4-4 en Tabel 4-3. De -5,5 m contour wordt hierbij als meest zeewaartse grens gehanteerd. Aan de eilandzijde is een begrenzing getrokken op basis van een vaste contour (de +4,5m) De volumes landwaarts van deze +4,5 m contour zijn niet relevant (in alle bodemkaarten zit een gelijke versie van het AHN) en worden verder niet meegenomen in de analyses.



Figuur 4-4: Volumeontwikkeling tussen de -5,5 m en +4,5 m contourlijnen tijdens verheling van de Bornrif Strandhaak (1989-2021). (A) geeft de verheling van de Bornrif Strandhaak weer, (B) de aanlanding van het Bornrifbankje (zie H. 4.3 voor details).

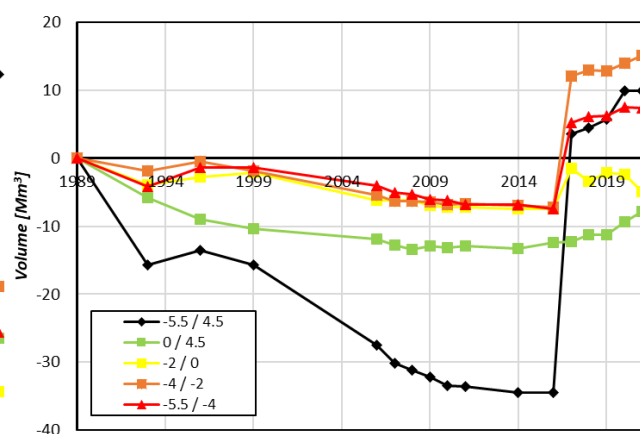
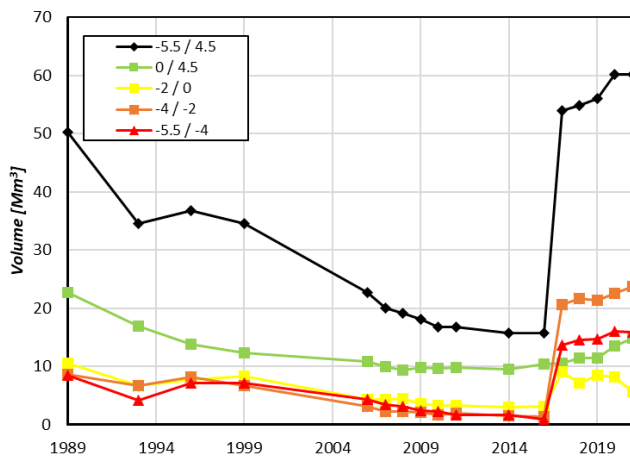
In de eerste meting (1989) bedraagt het totale, actieve volume 50 miljoen m³. Dit volume neemt af tot 16 miljoen m³ in 2014 en 2016. Na 2016 neemt het volume weer sterk toe. Dit wordt veroorzaakt door de aanlanding van het Bornrif Bankje. De analyse richt zich hier daarom alleen op de periode 1989-2016. In deze periode neemt het volume tussen de -5,5 m en +4,5 m contour af met gemiddeld 1,3 miljoen m³/jaar. De morfologische verandering, waarbij een duidelijke verplaatsing van de contouren richting het eiland te zien is, geeft aan dat het merendeel van het volume oostelijk richting het eiland verplaatst. Alle diepteklassen vertonen een afname in volume. Deze afname is het grootst in de contourklasse 0 - +4,5 m (het droogvallende strand + duinen). Hier vindt 36% van de totale afname plaats. De afname in de overige 3 natte contourklassen ligt tussen de 21 en 22%. De afname per diepteklasse is geïllustreerd in Figuur 4-6.



Figuur 4-5: Overzicht van de verdeling van de Bornrif strandhaak (1989-2016) en de volumeveranderingen binnen de geselecteerde contouren.

Tabel 4-3: Actieve volumes in miljoen m³ binnen geselecteerde contourklassen tijdens de verheling van de Bornrif Strandhaak over de periode 1989-2021.

Jaren	Contourklasse				
	-5,5 / -4 m	-4 / -2 m	-2 / 0 m	Eiland 0 / 4,5 m	Totaal -5,5 / 4,5 m
1989	8.43	8.56	10.52	22.74	50.26
1993	4.24	6.73	6.68	16.93	34.58
1996	7.07	8.11	7.79	13.77	36.74
1999	7.12	6.75	8.37	12.33	34.57
2006	4.37	3.14	4.33	10.91	22.75
2007	3.46	2.30	4.35	9.98	20.08
2008	3.14	2.27	4.40	9.29	19.10
2009	2.39	2.15	3.65	9.85	18.03
2010	2.25	1.73	3.27	9.58	16.82
2011	1.64	1.93	3.31	9.83	16.71
2014	1.61	1.56	3.04	9.51	15.73
2016	0.96	1.31	3.10	10.39	15.78

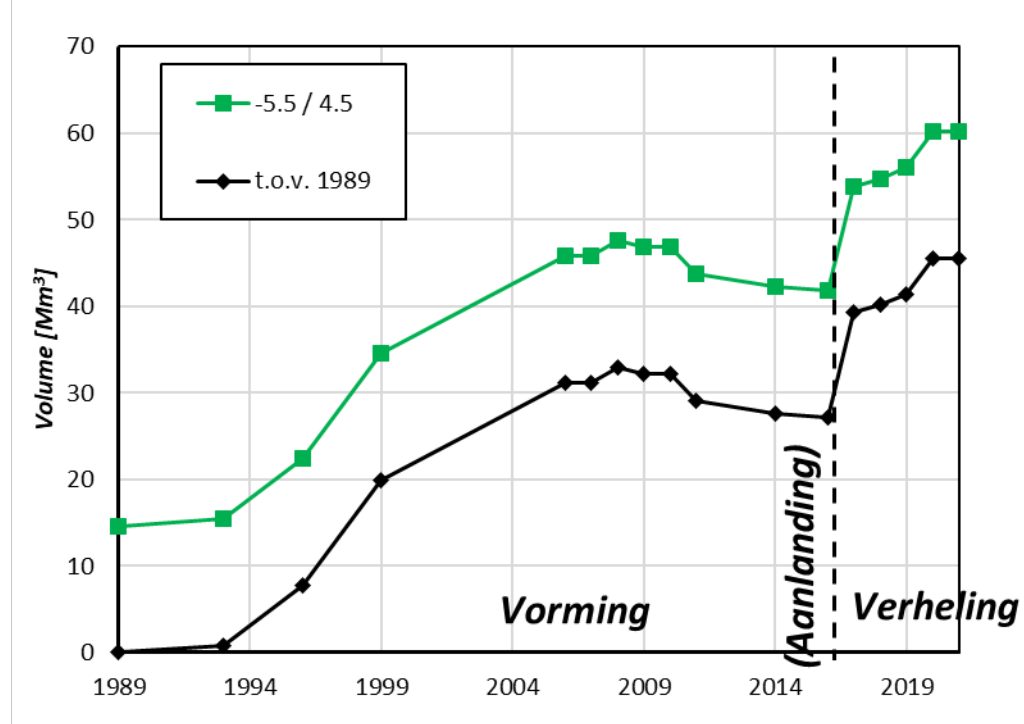


Figuur 4-6: (links) Totale volumes per contour in de actieve laag van de Bornrif Strandhaak en (rechts) volumeverandering t.o.v. de 1989 volumes.

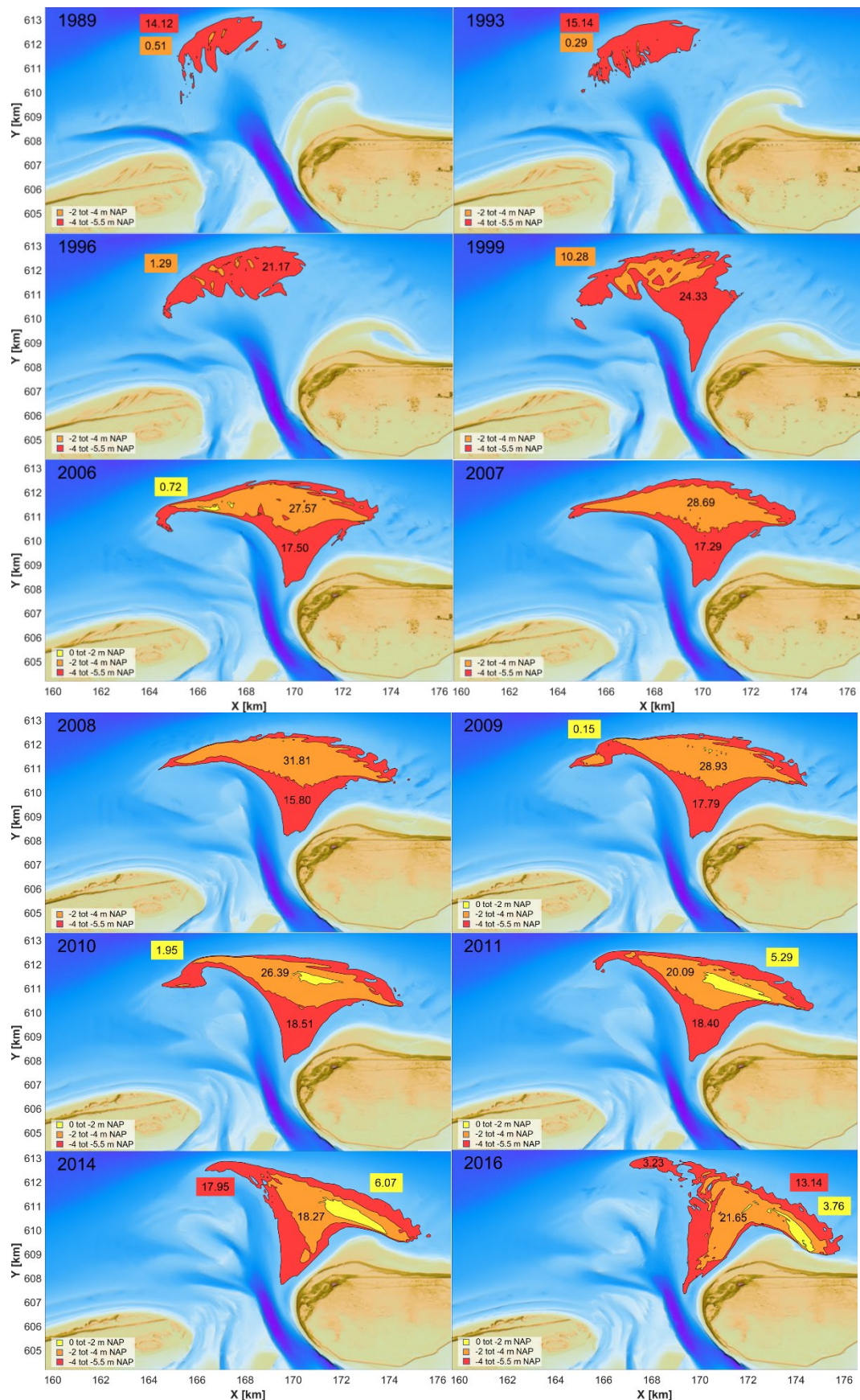
4.3 Bornrif Bankje

De vorming en groei in volume van het Bornrif Bankje is te volgen in Figuur 4-7 en Figuur 4-8. In 1989 zijn de volumes met 14,1 miljoen m³ nog beperkt. Het bankje neemt tussen 1993 en 2008 sterk in volume toe (+ 33 miljoen m³). In de periode 2008-2016 nemen de volumes dan iets af (- 5.8 miljoen m³). Vóór aanlanding in 2017 bedraagt het volume in de bank 47 miljoen m³.

In 2017 landt het bankje aan op de kust. Het volume binnen de -5,5 en +4,5 m contouren neemt dan met 12 miljoen m³ toe, maar dit is vooral omdat nu de kuststrook binnen de contour valt.

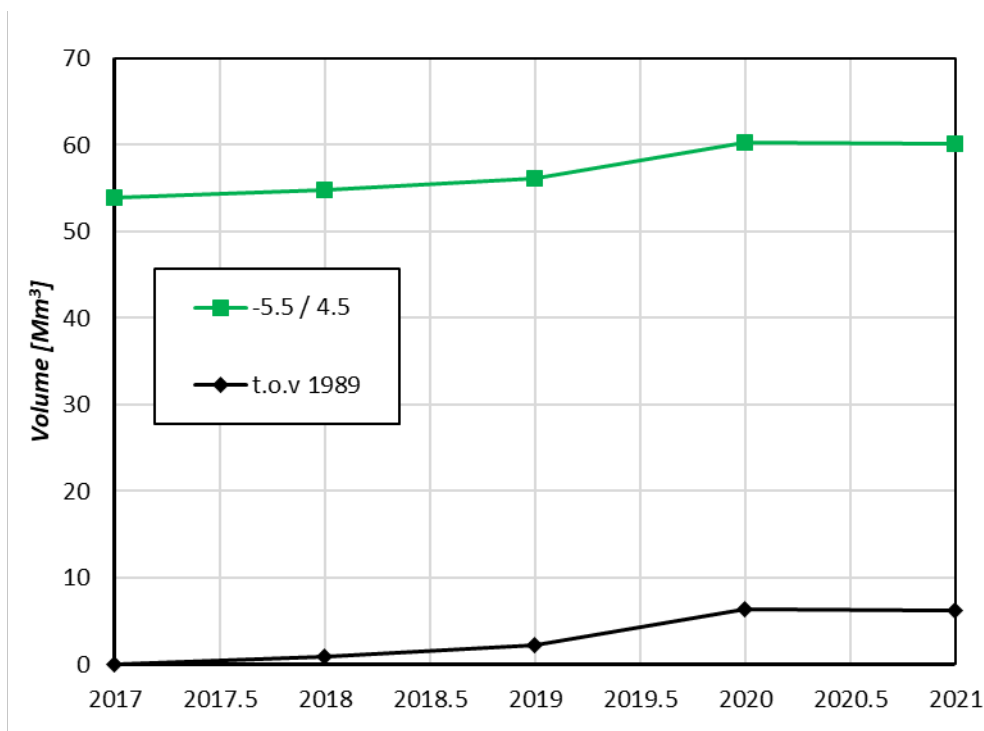


Figuur 4-7: Volumeontwikkeling tussen de -5,5 m en +4.5 m contourlijnen tijdens vorming en verheling van het Bornrif Bankje (1989-2021).



Figuur 4-8: Actieve sedimentvolumes (10^6 m^3) tijdens de vorming en landwaartse verplaatsing van het Bornerif Bankje over de periode 1989-2016.

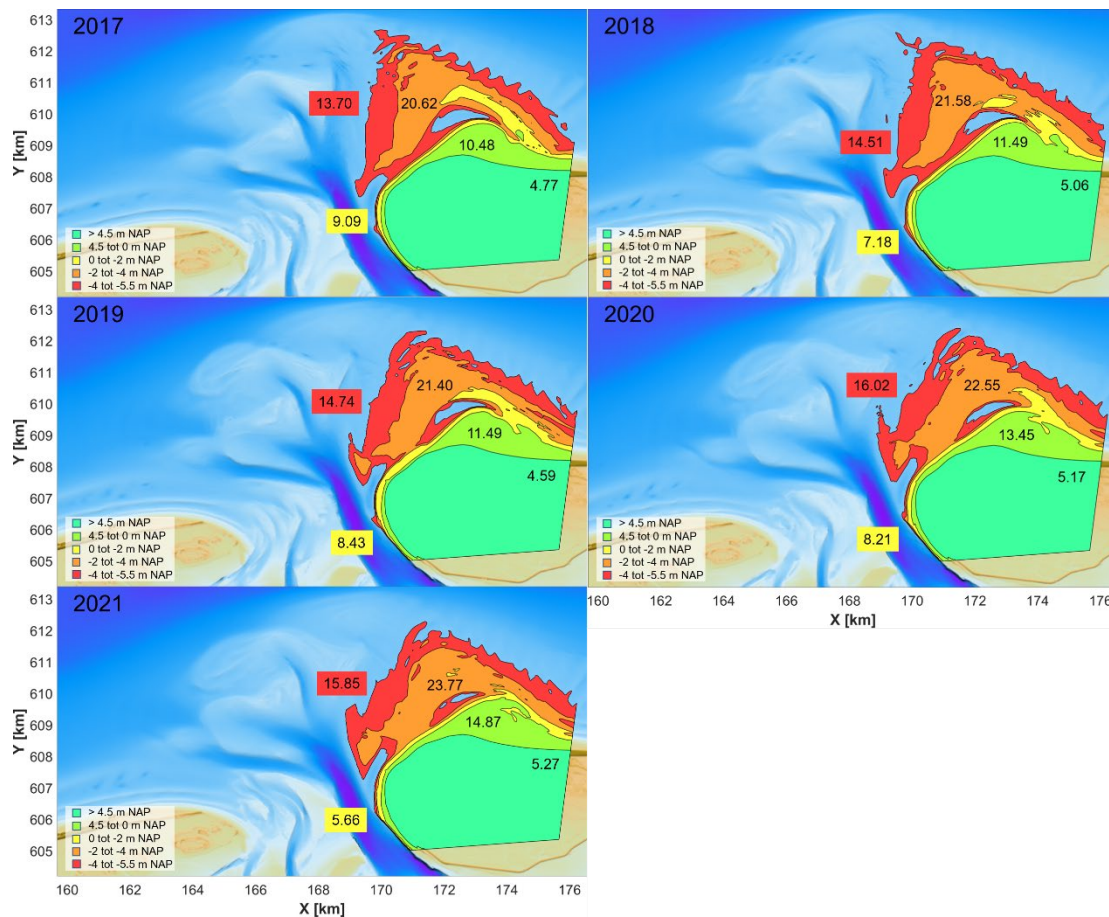
Het totale actieve volume tijdens aanlanding van het Bornrif Bankje bedraagt 54 miljoen m³ (Figuur 4-9 en Tabel 4-4). Dit volume neemt toe tot 60 miljoen m³ in 2021. De aanvoer vanaf het Bornrif platform lijkt hiermee de afvoer van sediment richting de eilandkust van Ameland te overtreffen. Figuur 4-10 laat de volumes en Figuur 4-11 de volumeveranderingen per diepteklasse zien. Met uitzondering van de diepteklasse -2 – 0 m neemt het volume toe. De grootste toename (4,4 miljoen m³) treedt op in de zone boven de gemiddelde water lijn (0 m contour). De afname in de -2 tot 0 m contour is zichtbaar als de verheling van deze ondiepe bank met de kustlijn. Dit zand wordt dan waarschijnlijk oostelijk afgevoerd. De diepere klassen nemen in deze perioden in volume toe.



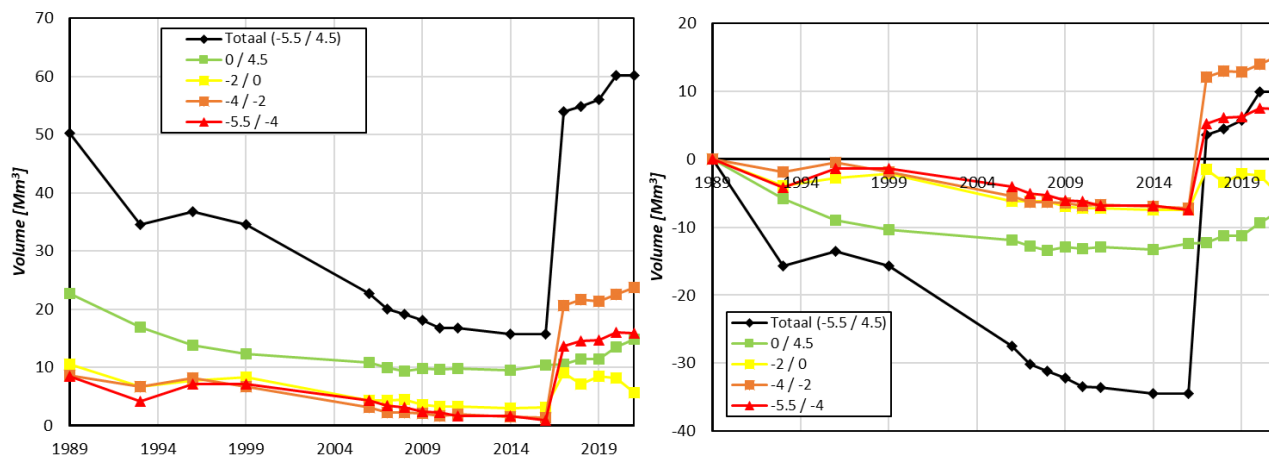
Figuur 4-9: Volumeontwikkeling tussen de -5,5 m en +4,5 m contourlijnen na verheling van het Bornrif Bankje over de periode 2017-2021. Zie Figuur 4-10 en Tabel 4-4 voor details van deze aanlanding

Tabel 4-4: Actieve volumes in miljoen m³ binnen geselecteerde contourklassen tijdens de aanlanding en verheling van het Bornrif Bankje (2017-2021).

Jaren	Contourklasse				
	-5,5 / -4 m	-4 / -2 m	-2 / 0 m	Eiland 0 / 4,5 m	Totaal -5,5 / 4,5 m
2017	13.70	20.62	9.09	10.48	53.90
2018	14.51	21.58	7.18	11.49	54.77
2019	14.74	21.40	8.43	11.49	56.07
2020	16.02	22.55	8.21	13.45	60.23
2021	15.85	23.77	5.66	14.87	60.15



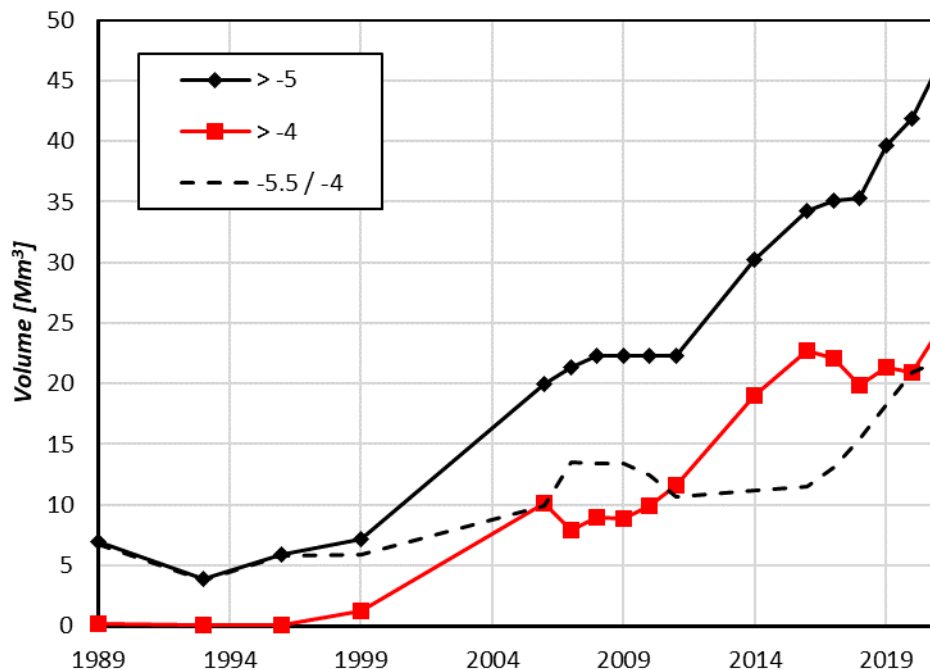
Figuur 4-10: Actieve sedimentvolumes (10^6 m^3) tijdens de aanlanding en verheling van het Borrif Bankje. De tijdseries van volumeverandering per contourklasse worden weergegeven in Figuur 4-11



Figuur 4-11: (links) Totale volumes per contour in de actieve laag van Borrif Bankje en (rechts) volumeverandering t.o.v. de 1989 volumes.

4.4 Ebschild en ebschaarsystemen

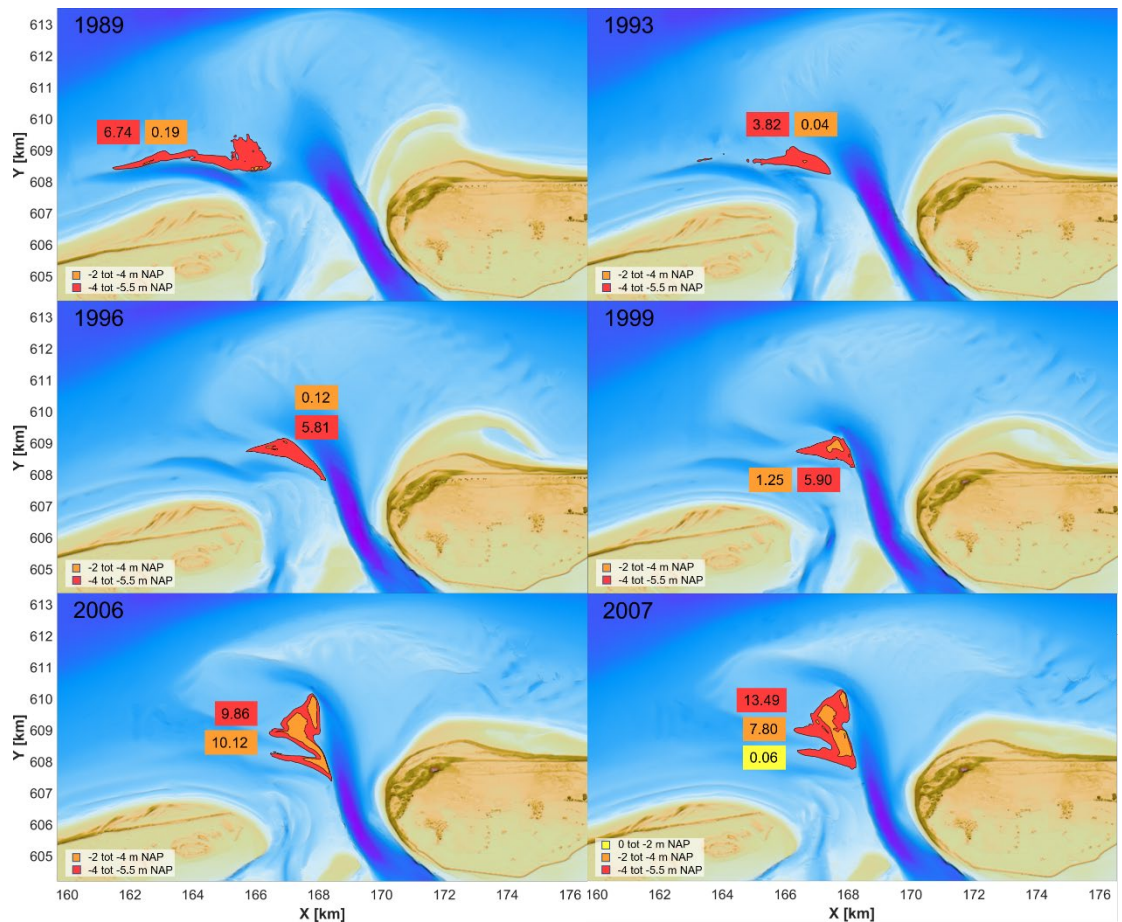
Een schatting van de volumes in banken van de ebschaar en ebschildsystemen is gebaseerd op de -5,5 m en -4 m contouren. In de ondieper gelegen contouren (-2 m) is het actieve volume beperkt. Sinds 1989 worden de volumes binnen de banken duidelijk groter. Het volume in de -5,5 m contour neemt toe van 7 miljoen m³ in 1989 tot meer dan 46 miljoen m³ in 2021 (Figuur 4-12 en Tabel 4-5).



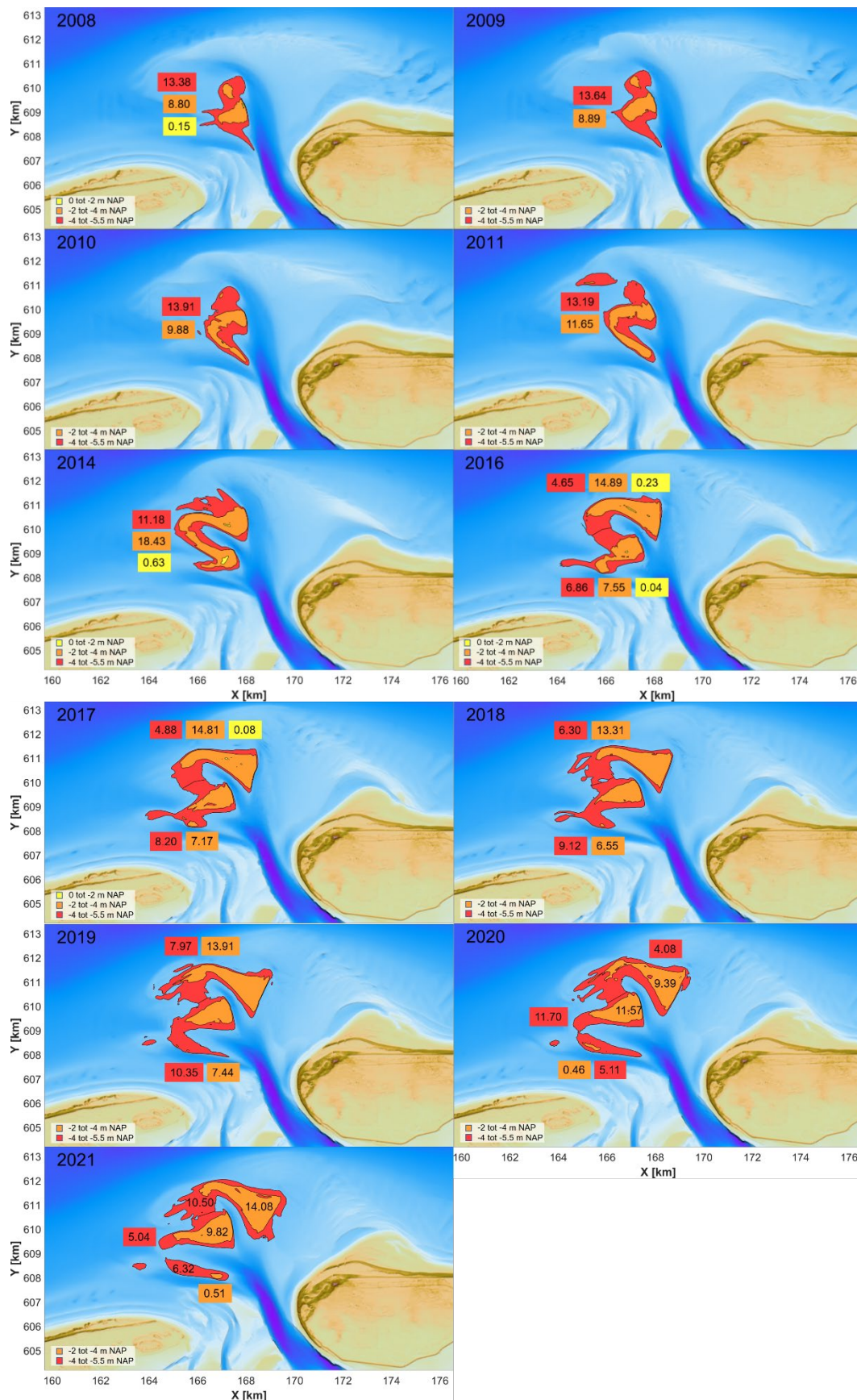
Figuur 4-12: Volumeontwikkeling van de ebschilden. Totale volumes zijn berekend voor de actieve bodemlaag binnen de -5,5 m contour en de -4 m contour en het volume tussen de -5 en -4 m contourlijnen over de periode 1989-2021.

De ebschaar en ebschildsystemen worden eigenlijk pas zichtbaar rond 2005. Het onderliggende bankje was echter al eerder te observeren. Gebaseerd op de -5,5 m contour is de basis van dit bankje al zichtbaar in 1989 (Figuur 4-13). Deze bank strekt zich dan van het Akkepollegat westelijk uit, langs de noordelijke zijde van het Westgat. Het volume boven de -5,5 m contour bedraagt dan 7 miljoen m³. De westelijke uitbouw van het bankje neemt daarna sterk af, waardoor het volume in 1993 afgenomen is tot 4 miljoen m³. Vanaf 1993 neemt het bankje dan weer in volume toe en begint zich dan steeds verder noordelijk, langs de westzijde van het Akkepollegat, uit te strekken. De initiële groei in volume, tussen 1999 en 2006, correspondeert met de afname in volume van de Zeehondenplaat (Appendix A.4). Het lijkt dan ook waarschijnlijk dat de Zeehondenplaat gedurende deze periode een belangrijke bron voor sediment was. In de periode 2006-2009 blijft het volume van de Zeehondenplaat tussen de 9 en 10 miljoen m³ (in de zone boven -5,5 m) slingeren. Vanaf 2009 nemen de volumes dan weer langzaam toe tot 14 miljoen m³ in 2021.

Het volume van de ebschilden bedraagt in 2006 20 miljoen m³. Dit volume blijft vervolgens tussen 2006 en 2011 met 22 miljoen m³ vrijwel constant. Het ebschild vertoont in deze periode vooral een sterke zeewaartse verplaatsing. Vanaf 2011 neemt het volume weer toe, wat correspondeert met de vorming van het tweede, meer landwaarts gelegen ebschild. Bij vorming neemt het volume in een aantal jaar toe tot 34 miljoen m³ in 2016. Tussen 2016 en 2018 vindt een tijdelijke stabilisatie van de volumes plaats om vervolgens weer sterk toe te nemen. De buitendeltasuppletie zal zeker bijgedragen hebben aan deze toename, maar is hier niet alleen voor verantwoordelijk. Het merendeel van de suppletie ligt onder de -5.5 m contour en is dus niet direct meegenomen in de volumeberekening. De sterke stijging in berekende volumes tussen 2019 en 2020 zou voor een deel wel door de suppletie veroorzaakt kunnen zijn. Er treedt in deze periode 2,1 miljoen m³ verlies op van de suppletie. Dit sediment draagt bij aan de groei van de oostelijk gelegen banken.



Figuur 4-13: Actieve sedimentvolumes (10⁶ m³) aanwezig in de ebschilden op basis van geselecteerde contourlijnen in de periode 1989-2007.



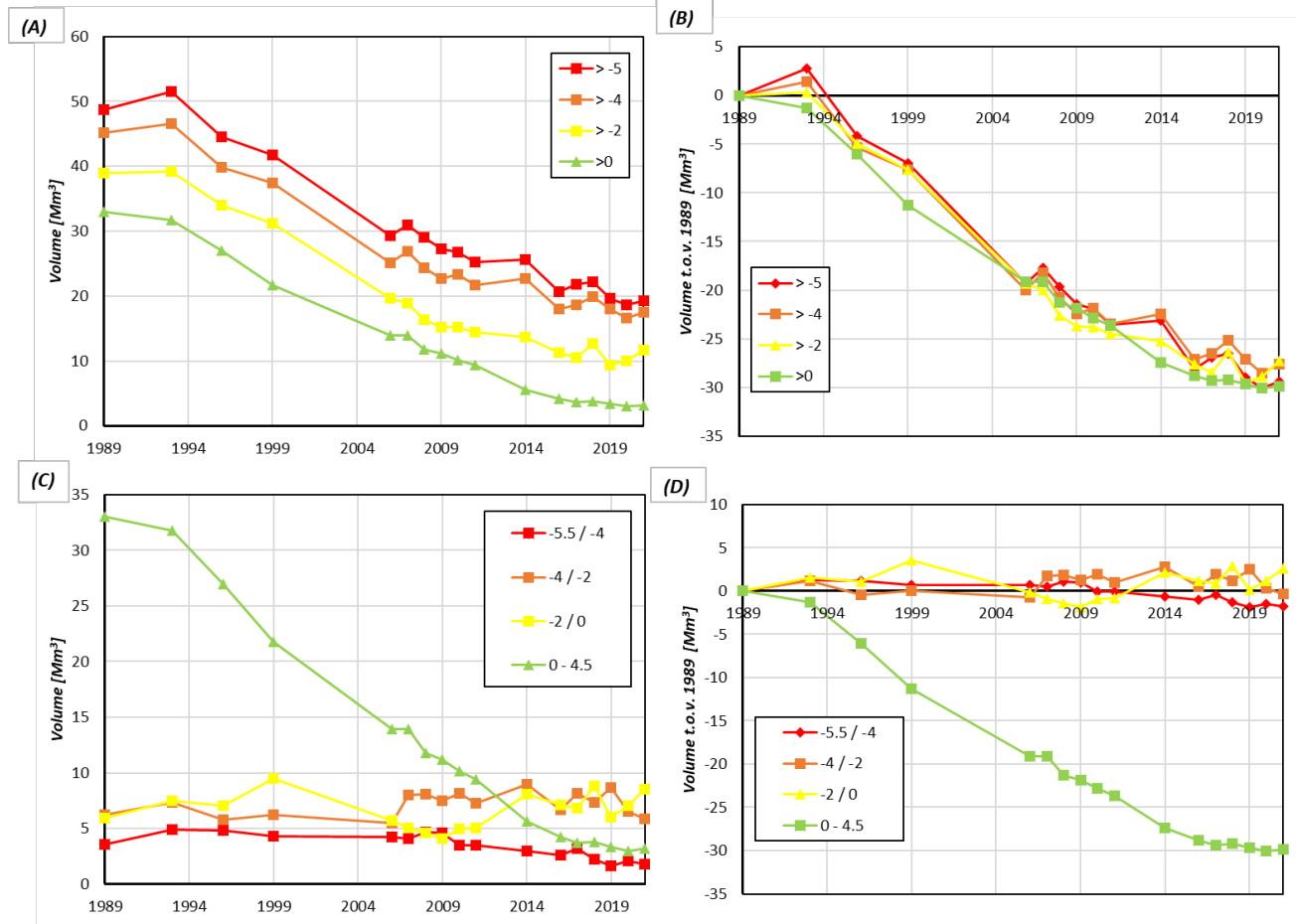
Figuur 4-14: Actieve sedimentvolumes ($10^6 m^3$) aanwezig in de ebschelden op basis van geselecteerde contourlijnen in de periode 2008-2021.

Tabel 4-5: Actieve volumes binnen in miljoen m³ geselecteerde contourklassen tijdens de aanlanding en verhelving van het Bornrif Bankje (2017-2021).

Jaren	Contour			Contourklasse
	-5,5 m	-4 m	-2 / 0 m	-5.5 / -4 m
1989	6.93	0.19	0.00	6.74
1993	3.86	0.04	0.00	3.82
1996	5.94	0.12	0.00	5.81
1999	7.15	1.25	0.00	5.90
2006	19.99	10.12	0.00	9.86
2007	21.35	7.87	0.06	13.49
2008	22.33	8.95	0.15	13.38
2009	22.33	8.89	0.00	13.45
2010	22.33	9.88	0.00	12.45
2011	22.33	11.65	0.00	10.68
2014	30.24	19.06	0.63	11.18
2016	34.23	22.72	0.27	11.51
2017	35.13	22.06	0.08	13.08
2018	35.13	19.86	0.00	15.27
2019	35.13	21.35	0.00	13.79
2020	35.13	20.96	0.00	14.17
2021	46.28	24.42	0.01	21.86

4.5 Boschplaat

Op basis van de Vaklodingen kan ook een schatting gemaakt worden van de sedimentverliezen van de Boschplaat (Figuur 4-15, Figuur 4-16, Figuur 4-17 en Tabel 4-6). Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de data niet geheel dekkend is. De waddenzijde is niet geheel meegenomen in de berekening. De duinen zijn gedeeltelijk gebaseerd op de LiDAR en gedeeltelijk op AHN (cyclus 3). AHN is hier in alle metingen gelijk. De volumes zijn bepaald door de hoogte boven de “4,5 m NAP” niet mee te nemen in de berekening. De “4,5” is hier een voor alle jaren gelijke, vaste begrenzing, getrokken over de stuifdijk welke de achterliggende kwelder omsluit (zie het groene vlak in Figuur 4-16 en Figuur 4-17).

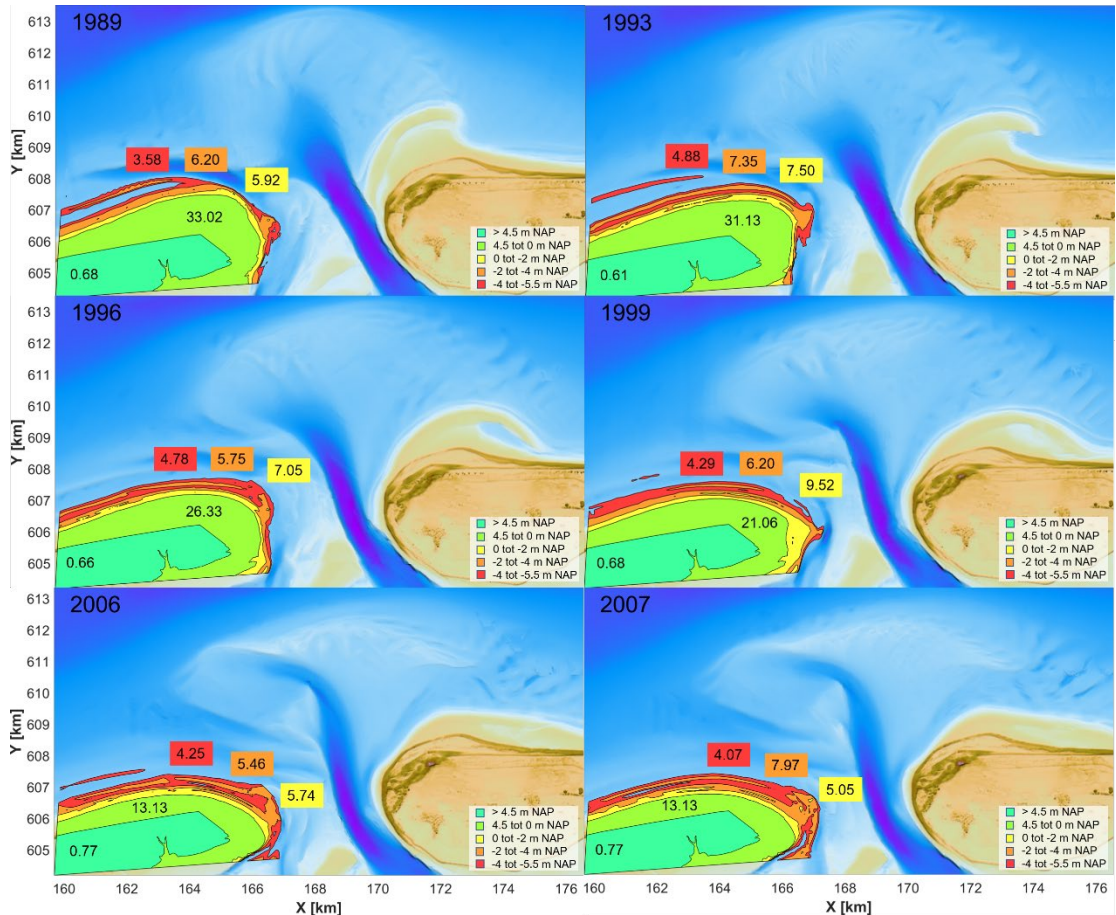


Figuur 4-15: (A, B) Cumulatieve volumes in de actieve laag van de Boschplaat boven een bepaalde contour en volumeverandering t.o.v. de 1989 volumes. (C,D) Totale volumes per contourklasse in de actieve laag van de Boschplaat en volumeverandering t.o.v. de 1989 volumes. Kleuren van de lijnen corresponderen met de ingekleurde contouren van Figuur 4-16 en Figuur 4-17. Alle volumes zijn gecorrigeerd voor het eilandvolume boven de +4.5 m contour.

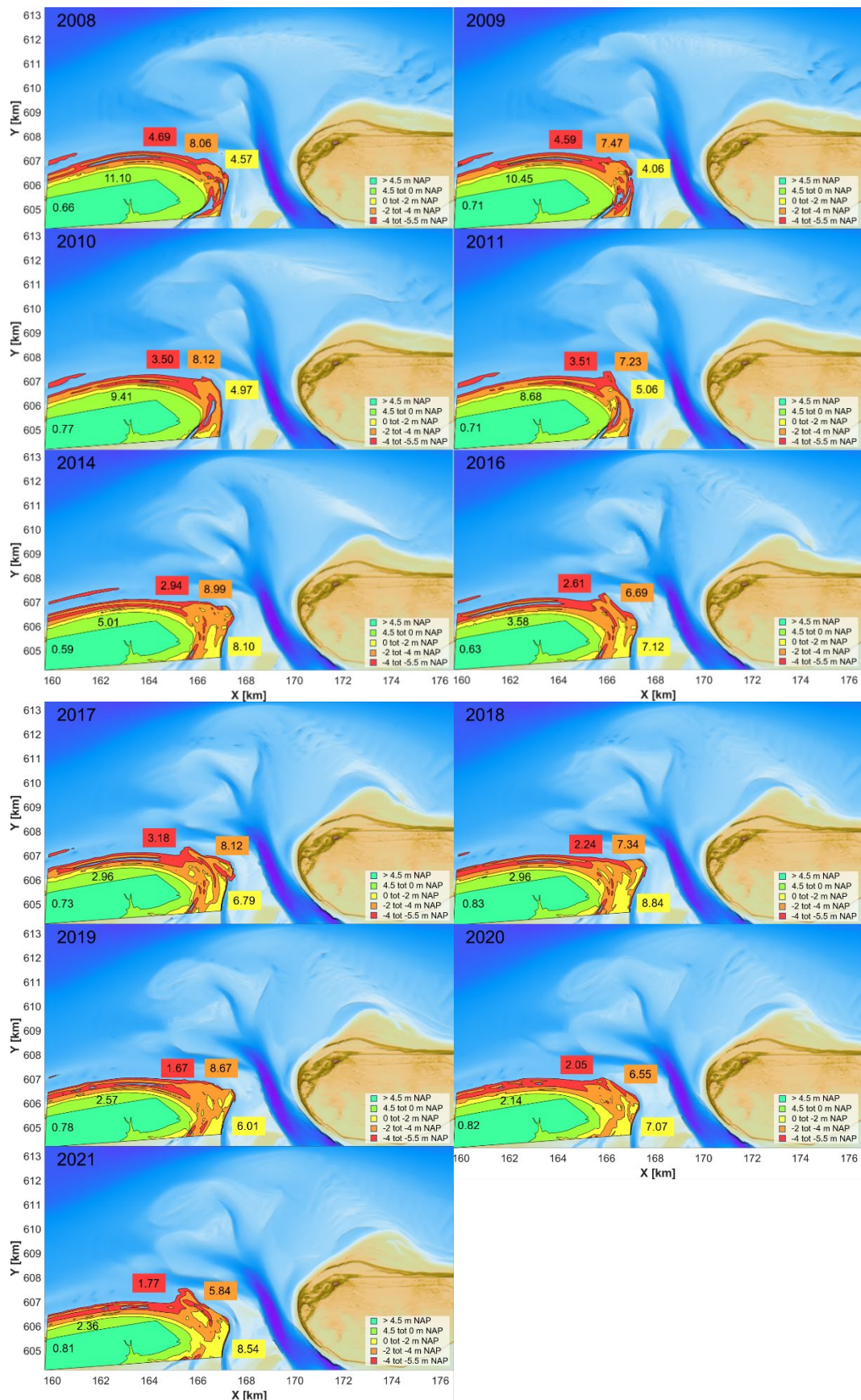
Over de gehele periode verliest de Boschplaat sediment. In 1989 was er in totaal 49 miljoen m³ aan actief sediment volume in de zone tussen de -5,5 m en +4,5 m aanwezig. Hiervan bevond zich 33 miljoen m³ boven de 0 m. Sinds 1989 zijn de volumes afgenomen. De grootste afname is zichtbaar in de volumes boven de 0 m. In totaal neemt het volume boven de -5,5 m contour met 29 miljoen m³ af. De verliezen vanaf de 0 m contour zijn echter met 30 miljoen m³ nog groter. Dit is een gemiddeld verlies van 0,9 miljoen m³/jaar. Het is zeer waarschijnlijk dat deze grote verliezen significant hebben bijgedragen aan de volumetoename van het westelijke deel van het bekken waar grote aanzanding terug te vinden is.

De volumes zijn vrijwel lineair afgenomen tussen 1994 en 2017 met een trendwaarde van -1,3 miljoen m³/jaar. Sinds 2017 zijn de erosiesnelheden met -0.22 miljoen m³/jaar veel kleiner. Of dit daadwerkelijk een kentering van de eroderende trend van de Boschplaat is, is op basis van deze analyse niet te zeggen. Het kan ook zijn dat de erosie van de Cupido's polder in het verleden voor een hogere volumeafname heeft gezorgd.

Deze verliezen zijn veel hoger dan de eerdere studies (zie bijv. H2.3). Dit komt met name omdat in het verleden de volumebalans op een bepaalde hoogte (vaak de GWL of GHW lijn) is afgekapt. De eilandkop wordt dan niet geheel meegenomen en in deze zone vindt juist het merendeel van de volumeverandering plaats.



Figuur 4-16: Actieve sedimentvolumes (10⁶ m³) aanwezig in de Boschplaat op basis van geselecteerde contourlijnen in de periode 1989-2007.



Figuur 4-17: Actieve sedimentvolumes (10^6 m^3) aanwezig in de Boschplaat op basis van geselecteerde contourlijnen in de periode 2008-2021.

Tabel 4-6: Actieve volumes in miljoen m³ binnen geselecteerde contourklassen van de Boschplaat over de periode 1989-2021. De volumes van eiland en totaal zijn gecorrigeerd voor de volumes binnen de "+4.5m contour".

Jaren	Contourklasse			Contour	
	-5,5 / -4 m	-4 / -2 m	-2 / 0 m	Eiland 0 m	Totaal > -5,5 m
1989	3.58	6.20	5.92	33.02	48.71
1993	4.88	7.35	7.50	31.74	51.46
1996	4.78	5.75	7.05	26.99	44.57
1999	4.29	6.20	9.52	21.74	41.75
2006	4.25	5.46	5.74	13.90	29.35
2007	4.07	7.97	5.05	13.90	30.98
2008	4.69	8.06	4.57	11.77	29.09
2009	4.59	7.47	4.06	11.16	27.29
2010	3.50	8.12	4.97	10.18	26.78
2011	3.51	7.23	5.06	9.39	25.19
2014	2.94	8.99	8.10	5.60	25.62
2016	2.61	6.69	7.12	4.20	20.63
2017	3.18	8.12	6.79	3.69	21.78
2018	2.24	7.34	8.84	3.79	22.21
2019	1.67	8.67	6.01	3.35	19.7
2020	2.05	6.55	7.07	2.96	18.63
2021	1.77	5.84	8.54	3.17	19.32

5 Conclusies en aanbevelingen

De doelstelling van deze rapportage is het beter begrijpen van de uitwisseling van sediment tussen de buitendelta van het Zeegat van Ameland en de aanliggende eilandkusten van Terschelling en Ameland. Hiervoor is een analyse van de actieve sedimentvolumes in het Amelander zeegat uitgevoerd. Om deze doelstelling te bereiken zijn een vijftal onderzoeksvragen opgesteld. Deze vormen de basis van de conclusies.

5.1 Conclusies

1. Hoe ziet de sedimenthuishouding van het gehele zeegat (buitendelta, bekken en eilandkoppen) eruit?

In totaal nemen het bekken en de buitendelta van het Amelander Zeegat met 72 miljoen m³ in sedimentvolume toe tussen 1989 en 2017. De grootste toename treedt op in het bekken (43 miljoen m³) door opvulling van geulen. De buitendelta neemt 29 miljoen m³ in volume toe. Erosie van de Boschplaat (30 miljoen m³) en de uitgevoerde suppleties (13 miljoen m³) vormen de grootste lokale zandbronnen voor deze aanzanding.

Erosie van de kust van Ameland treedt vooral op ter plaatse van het aanlandingsgebied van de Bornrif Strandhaak en het Bornrif Bankje. Na aanlanding lijkt dit sediment zich vooral oostelijk richting de eilandkust van Ameland te verplaatsen. Het lijkt waarschijnlijk dat er gemiddeld 1,0 miljoen m³ sediment per jaar vanaf de kust van Terschelling, de noordoostzijde van de buitendelta van het Vlie, wordt aangevoerd. Erosie treedt ook op ten westen van het aanlandingspunt (Jarkusraai 100-400). Hier zijn frequent terugkerende suppleties nodig om de BKL van de eilandkop te behouden.

2. Hoeveel aanlandingscycli zijn te onderscheiden op de Amelander buitendelta?

Sinds 1989 zijn er drie aanlandingscycli te onderscheiden:

(A). Aanlanding van de Bornrif Strandhaak (1985 – heden). De Bornrif Strandhaak verheelde waarschijnlijk rond 1985 met de kustlijn tussen Jarkusraaien 200-500. De kust van Ameland bouwt bij aanlanding sterk zeewaarts uit ter plaatse van dit aanlandingspunt. Na aanlanding vertoont de kust, in de periode 1989-2017 een continue, eroderende trend van gemiddeld 1,3 miljoen m³/jaar. In 2017 treedt een trendbreuk op omdat het Bornrif Bankje aanlandt.

(B). Aanlanding van het Bornrif Bankje. (2017 – heden). De vorming van het Bornrif Bankje is al vanaf 1989 te volgen in de bodemdata. In 1989 is er nog een relatief kleine bank aanwezig op het front van de buitendelta. Deze bank groeit sterk in omvang en volume. Het Bornrif Bankje landt in 2017 aan ter hoogte van Jarkusraai 700 en zorgt voor een sterke uitbouw van de kustvolumes. De kustvolumes blijven in het aanlandingsgebied tot op heden toenemen door aanvoer van sediment vanaf de buitendelta.

(C). Ebschilden. Een derde aanlandingscyclus start rond 2005 met de vorming van kleine ebschaartjes en schilden. Deze groeien in omvang en verplaatsen zeewaarts. In 2021 liggen deze banken al ver zeewaarts op de buitendelta.

Alle drie de geïdentificeerde aanlandingscycli hebben als overeenkomst dat het zand van west naar oost over de buitendelta beweegt: Het zand verplaatst vanaf het buitendeltafront, over het Bornrif platform, richting de kust van Ameland. In meer detail zijn de drie aanlandingscycli duidelijk verschillend. Zo wordt de aanlanding van het Bornrif Bankje vooral gedreven door golven en heeft het getij hier een beperkte invloed. De vorming en de ontwikkeling van de derde aanlandingscyclus werd tot nu toe sterk gestuurd door het getij.

3. *Wat zijn de volumes in de aanlandingsbanken binnen deze cycli?*

De aanlandingsvolumes zijn gekwantificeerd op basis van geselecteerde contourlijnen. Op basis van de -5,5 m contour kan het volume van de aangelande Bornrif Strandhaak in 1989 geschat worden op zo'n 50 miljoen m³. Dit volume is afgenomen tot 16 miljoen m³ in 2016. Aanlanding van het Bornrif Bankje zorgt ervoor dat het volume toeneemt tot 60 miljoen m³ in 2021. Het Bornrif Bankje was sinds 1989 sterk in volume toegenomen van 14 miljoen m³ tot 54 miljoen m³ net voor aanlanding.

4. *Wat zijn de volumes in de toekomstige aanlandingsbanken?*

De volumes in de ebschilden, de derde aanlandingscyclus, liggen op dit moment al op meer dan 45 miljoen m³. In potentie kunnen deze banken dan ook weer een grote aanlanding in de toekomst veroorzaken. De banken liggen nog wel ver zeewaarts op het platform, ongeveer vergelijkbaar met de positie van het Bornrif Bankje in de periode 1993-1996. Het lijkt dan ook waarschijnlijk dat een nieuwe aanlanding pas op een tijdschaal van een jaar of tien zal plaatsvinden.

5. *Wat was de respons van de eilandkoppen op de eerdere aanlandingen en in welke richting is het aangelande zand verplaatst (bekken of eilandkust)?*

De aanlandingen van de Bornrif Strandhaak en het Bornrif Bankje zorgen lokaal voor een sterke volumetoename en uitbouw van de kustzone in het aanlandingsgebied. De Bornrif Strandhaak nam sterk in volume af tot aanlanding van het Bornrif Bankje. Na aanlanding van het Bornrif Bankje blijft het volume nog doorstijgen. Deze toename is ook in 2021 nog zichtbaar. De vervorming van de Bornrif Strandhaak geeft een duidelijke aanwijzing dat het zand in oostelijke richting, naar de centrale eilandkust, wordt getransporteerd.

Op de eilandstaart van Terschelling doen zich geen bankaanlandingen voor in de beschouwde periode. Erosie van de Boschplaat heeft juist een belangrijk aandeel in de sedimentvolume toename van de buitendelta en het bekken. Op basis van de -5,5 m contourlijn wordt de erosie van de Boschplaat geschat op zo'n 30 miljoen m³ over de periode 1989 - 2021

5.2 Aanbevelingen

Op basis van de grootschalige analyse kan worden geconcludeerd dat het bekken sedimenteert. Het merendeel van deze sedimentatie doet zich voor in de geulen. De platen veranderen eigenlijk nauwelijks in volume. De reden achter deze verschillen is niet direct duidelijk. Waarschijnlijk is het opvullen van de westelijk gelegen geulen die vroeger een verbinding vormden met het Boschgat een belangrijk onderdeel. Met een soortgelijke aanvullende volumeanalyse van het bekken zou hier meer inzicht in verkregen kunnen worden. Een beter inzicht in de sedimentverdeling over het bekken is belangrijk. Ten eerste vormt het bekken een verliespost voor de kustzone en ten tweede geeft dit ook een beter begrip van het meegroeivermogen van de platen onder zeespiegelstijging.

Een beter begrip van de uitwisseling tussen buitendelta en naastgelegen eilandkusten is wenselijk. De hier uitgevoerde analyse bevestigt dat de zeegaten geen losgekoppelde systemen zijn, maar waarschijnlijk veel meer onderlinge uitwisseling hebben dan tot nu toe aangenomen. Waarschijnlijk vindt er een uitwisseling plaats vanaf de buitendelta van het Zeegat van het Vlie naar het Zeegat van Ameland, maar hoe deze uitwisseling tot stand komt is niet geheel duidelijk. De eilandkust van Ameland, ten oosten van de Strandhaak, kent zowel een groot natuurlijk sediment aanbod, en er zijn ook veel suppleties uitgevoerd. In totaal zou hier een sedimentoverschot van 50-75 miljoen m³ over de beschouwde periode aanwezig moeten zijn. Het is echter niet duidelijk waar dit sediment naartoe is verplaatst. Een deel zal bijgedragen hebben aan de opvulling van de bodemdalingsconus t.g.v. gaswinning, een deel is waarschijnlijk de duinen in verplaatst en een deel heeft bijgedragen aan de zandhuishouding

van het Pinkegat. Een nader onderzoek door bijvoorbeeld een grotere schaal volumeanalyse gericht op het beter begrijpen van de uitwisseling tussen de verschillende zeegaten en aangrenzende eilanden lijkt wenselijk.

De in deze studie toegepaste methodiek geeft veel nieuwe inzichten in de sedimenthuishouding van het Zeegat. Een doorontwikkeling van de techniek en verdere toepassing voor Ameland kan ons inzicht verder vergroten. De volgende aspecten dienen verder uitgewerkt te worden:

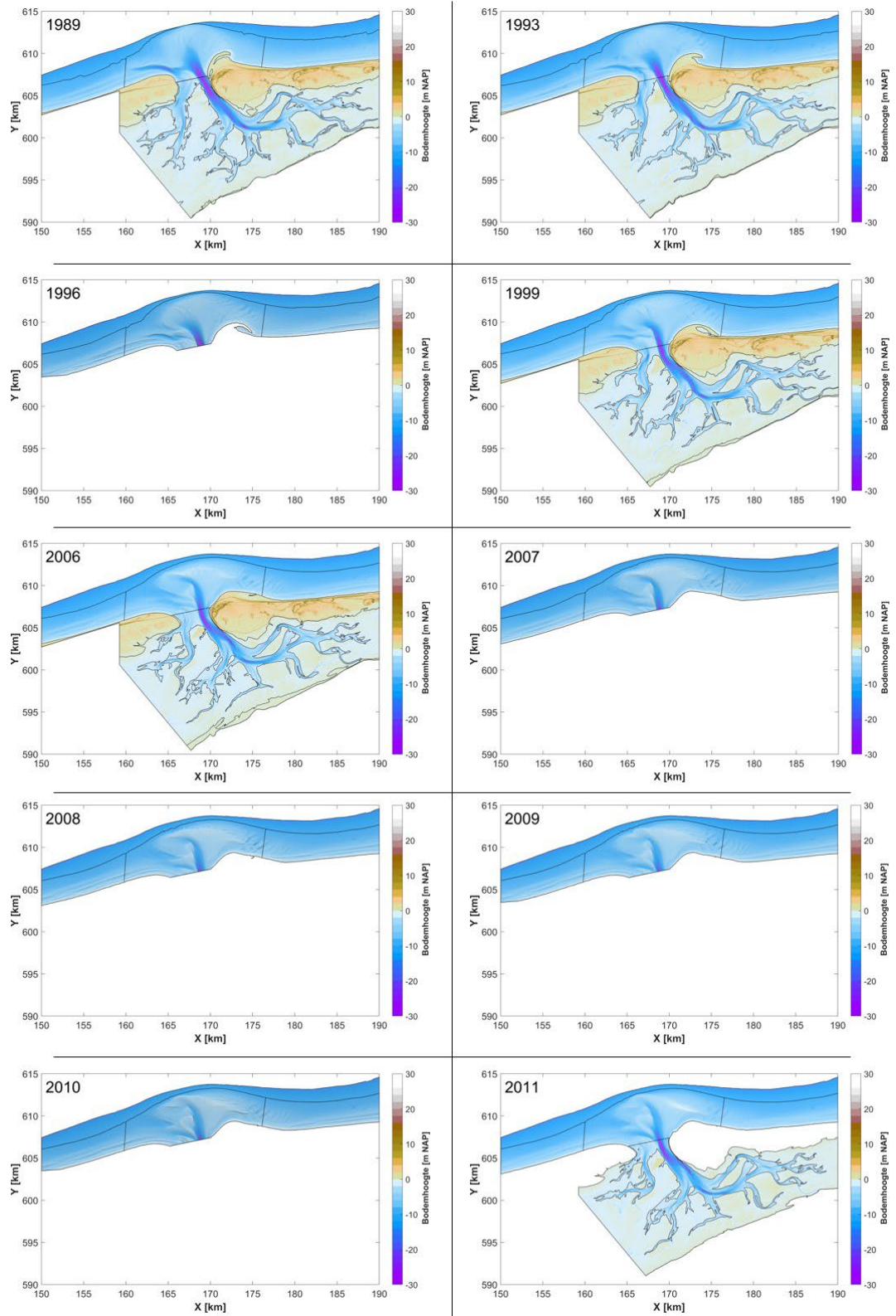
- (1) Actualisatie van de bodemmetingen met de juiste AHN cyclus ter verbetering van de schatting van de volumeveranderingen van de eilanden.
- (2) Detailanalyse van de volumeverandering van de eilandkop van Ameland.
- (3) Volledig analyse van de gehele buitendelta en niet alleen van de aanlandingsbanken.
- (4) Uitwerking van een conceptueel model van de zandhuishouding om de verbanden tussen de verschillende sedimentatie- en erosiegebieden te leggen.
- (5) Uitwerking van conceptuele modellen voor de sediment-bypassing cyclus.
- (6) Identificatie van meetfouten en (on)nauwkeurigheid van de berekende volumes.

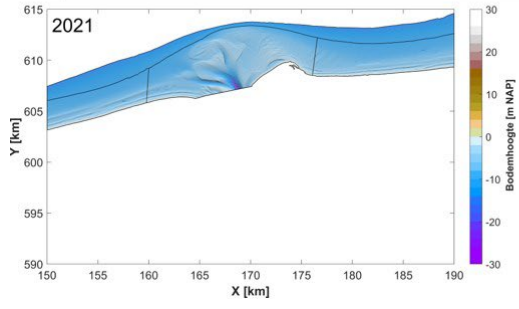
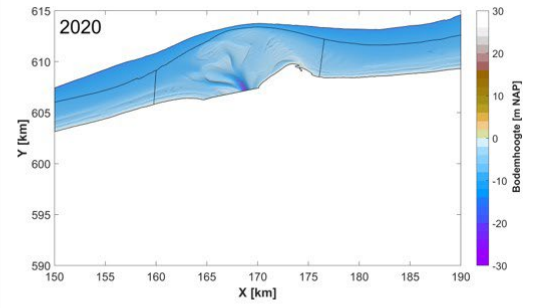
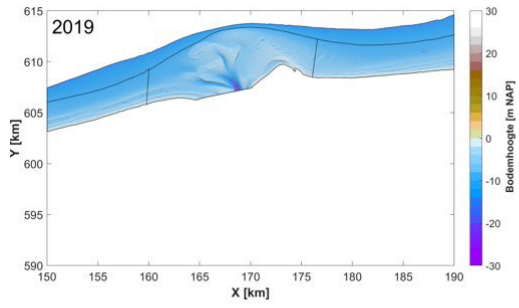
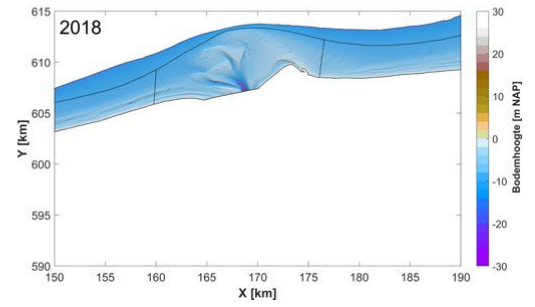
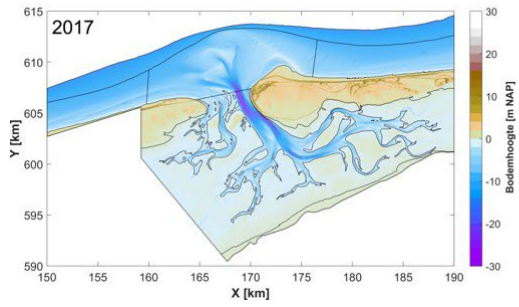
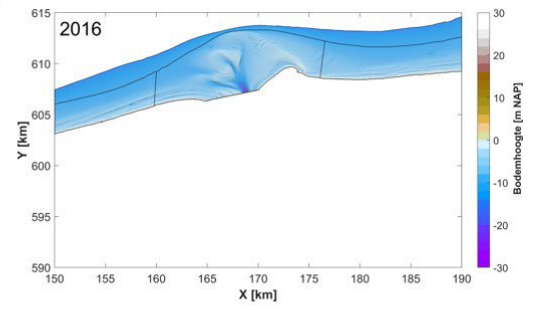
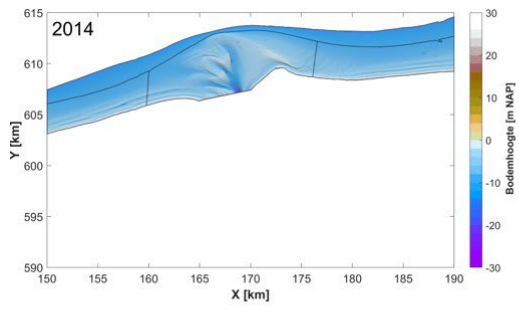
6 Referenties

- De Boer, M., Kool, G., Lieshout, M.F., 1991a. Erosie en Sedimentatie in de Binnendelta van het Zeegat van Ameland 1926-1984. Report ANVX-91.H202 (in Dutch), Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, Haarlem.
- De Boer, M., Kool, G., Lieshout, M.F., Ulm, D.L., 1991b. Erosie en Sedimentatie in de Buitendelta van het Zeegat van Ameland 1926-1982. Report ANVX-91.H205 (in Dutch), Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, Haarlem.
- Elias, E.P.L., 2022a. Aanlandingsbanken Schiermonnikoog. Rapport Deltares: 11208035-004-ZKS-0001, Delft, 45 pp.
- Elias, E.P.L., 2022b. Morfologische analyse buitendelta Ameland en de rol van de pilotsuppletie. Rapport Deltares: 11206794-004-ZKS-0006, Delft, 84 pp.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology* 415.
- Elias, E.P.L., Pearson, S.G., Van der Spek, A.J.F., Pluis, S., 2022. Understanding meso-scale processes at a mixed-energy tidal inlet: Ameland Inlet, the Netherlands – Implications for coastal maintenance, *Ocean and Coastal Management*, 222, 106125.
- Mastbergen, D., Nederhoff, K., Van der Valk, B., Maarse, M. (2018). Beheerbibliotheek Ameland. Deltares rapport: 11202190-000-ZKS-0009. 119 pp.
- Pearson, S. G., B. C. van Prooijen, E. P. L. Elias, S. Vitousek, and Z. B. Wang (2020), Sediment Connectivity: A Framework for Analyzing Coastal Sediment Transport Pathways, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(10), doi:10.1029/2020JF005595.
- Pearson, S. G., Elias, E. P., van Prooijen, B. C., van der Vegt, H., van der Spek, A. J., & Wang, Z. B. (2022). A novel approach to mapping ebb-tidal delta morphodynamics and stratigraphy. *Geomorphology*, 405, 108185.
- Rakhorst, H.D., Kool, G., Lieshout, M.F., 1993. Erosie en Sedimentatie in de Buitendelta van het Zeegat van Ameland en Aangrenzende Kuststroken 1926-1989. Report ANV-92.201 (in Dutch), Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, Haarlem.
- Van Prooijen, B.C., Tissier, M.F.S., de Wit, F.P., Pearson, S.G., Holzhauer, H., Gawehn, M., Antolínez, J.A.A., de Vet, P.L.M., Reniers, A.J.H.M., Wang, Z.B., den Heijer, C., Wilmink, R.J.A., & more authors (2020). Measurements of hydrodynamics, sediment, morphology and benthos on Ameland ebb-tidal delta and lower shoreface. *Earth System Science Data*. 12, 4, 2775-2786. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2775-2020>
- van Rhijn, M.W., (2019). Sediment transport during the execution of the pilot nourishment Ameland Inlet. MSc. Thesis, Delft University of Technology, Delft, 197 pp.
- Zijdeveld, A., Peters H., 2006. Measurement program Dutch Wadden Sea. Proceedings 30th International Conference on Coastal Engineering, San Diego, USA. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 404-410.

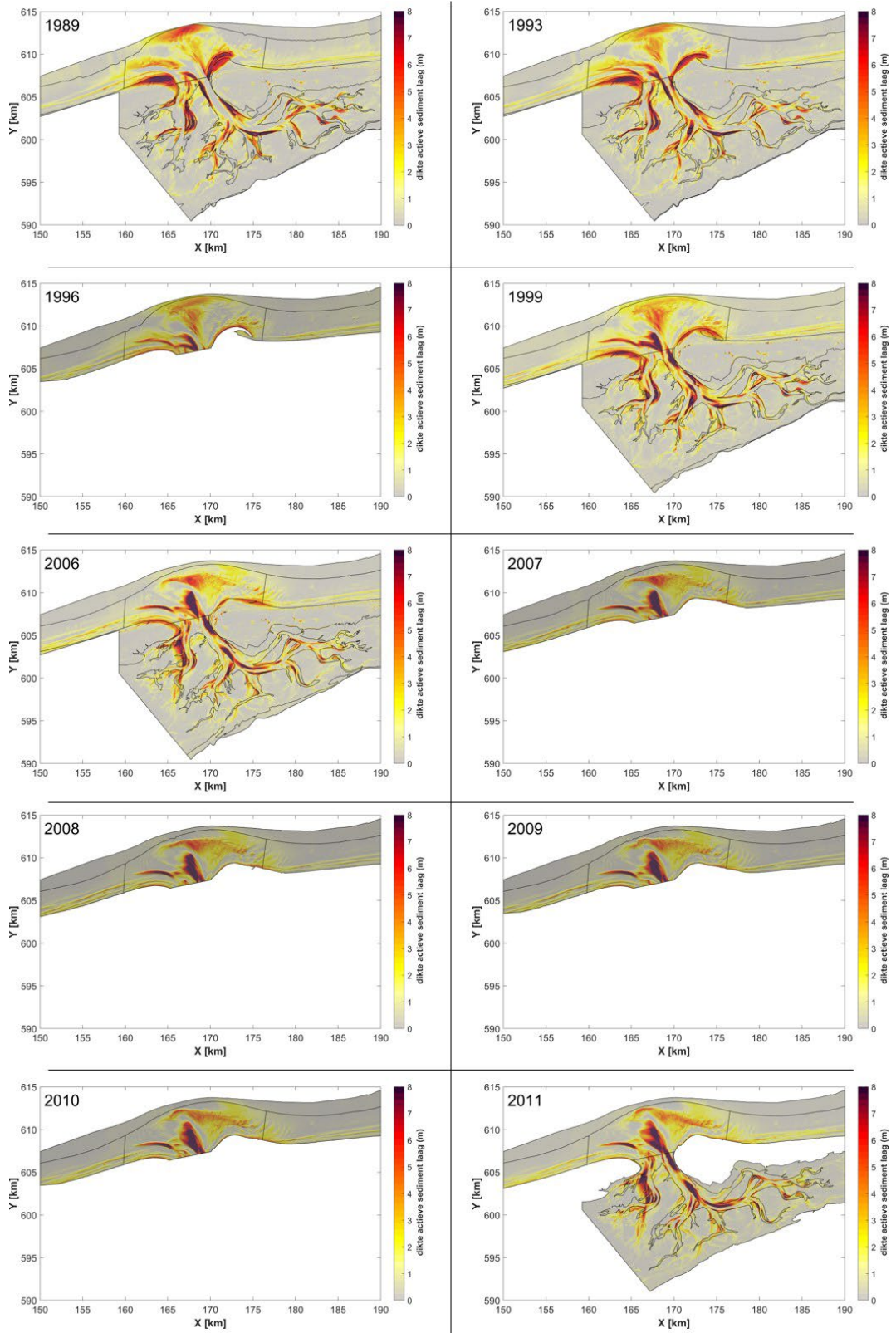
A Bodems en polygoenen allen jaren

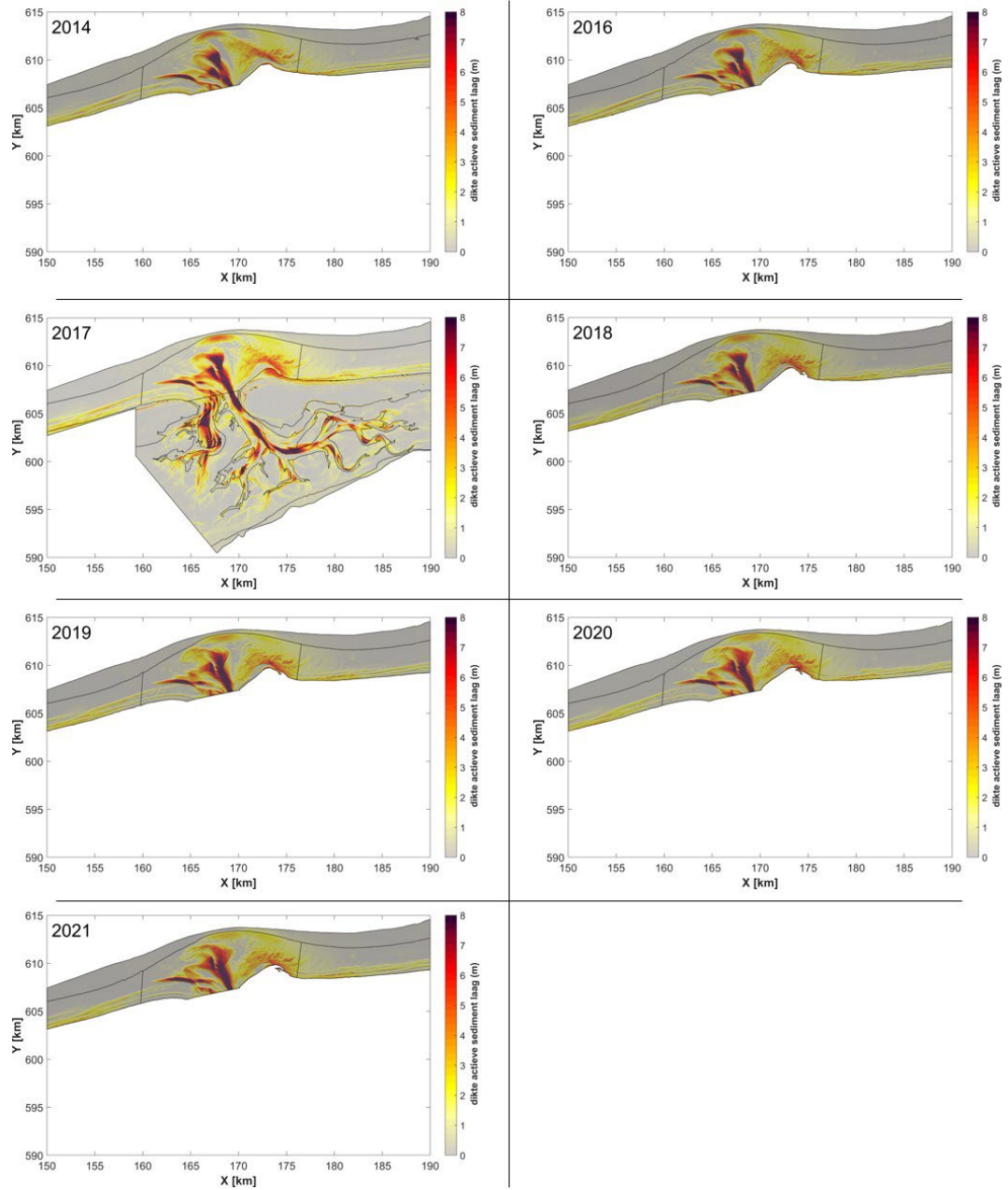
A.1 Bodemkaarten met analyse polygoenen



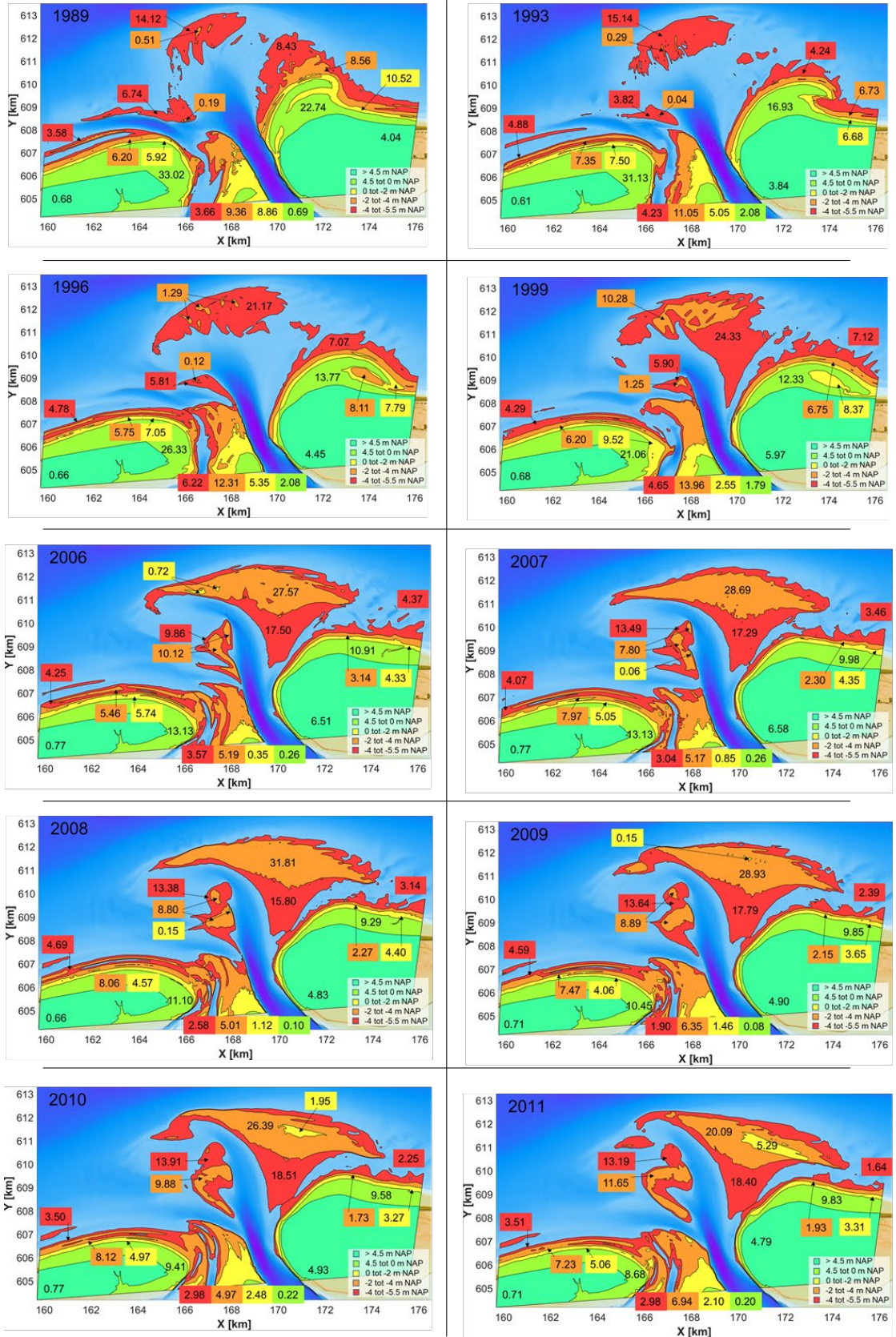


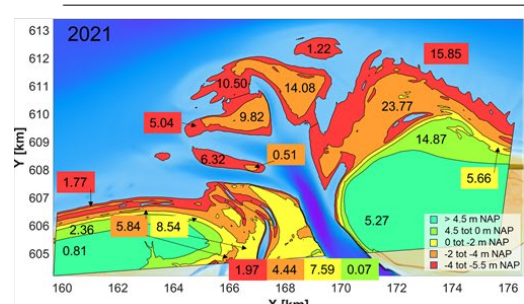
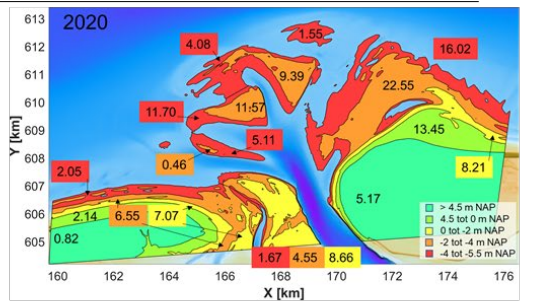
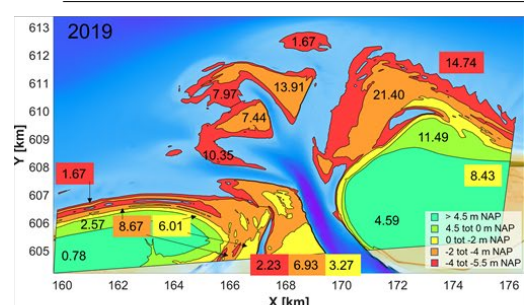
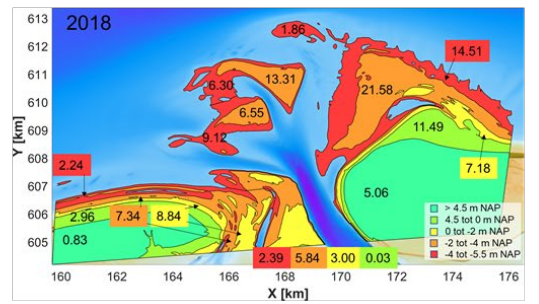
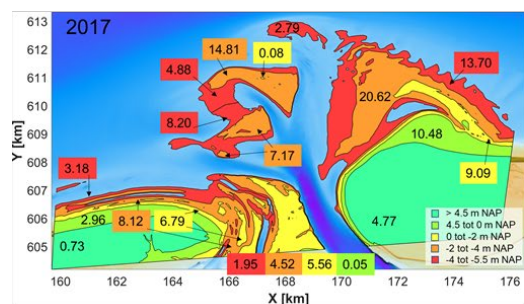
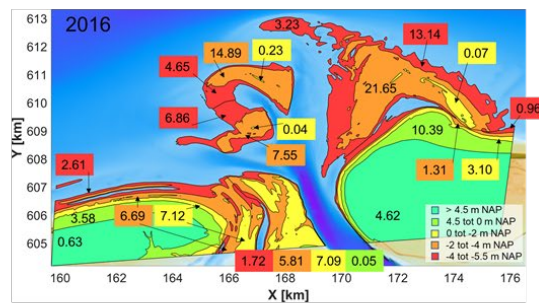
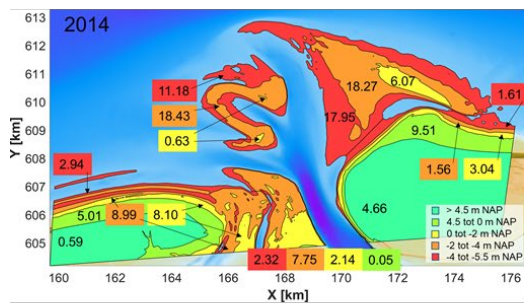
A.2 Actieve sedimentvolumen per jaar



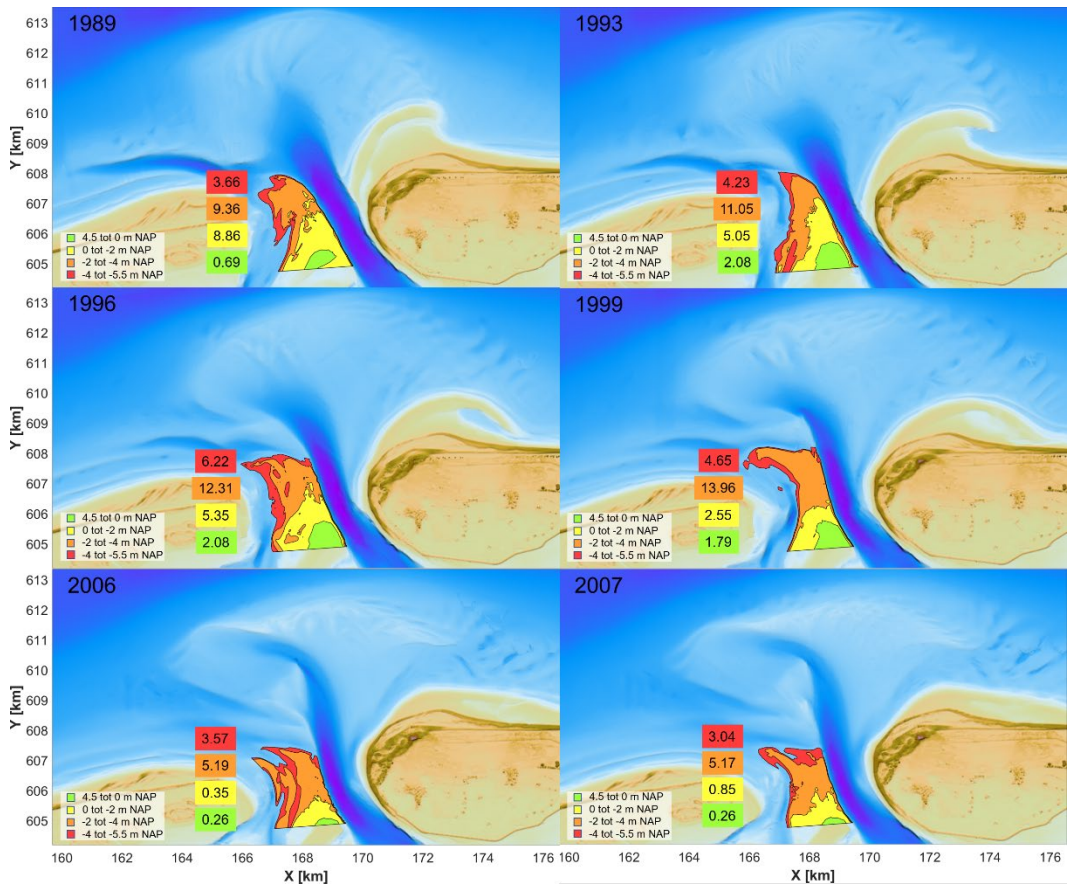
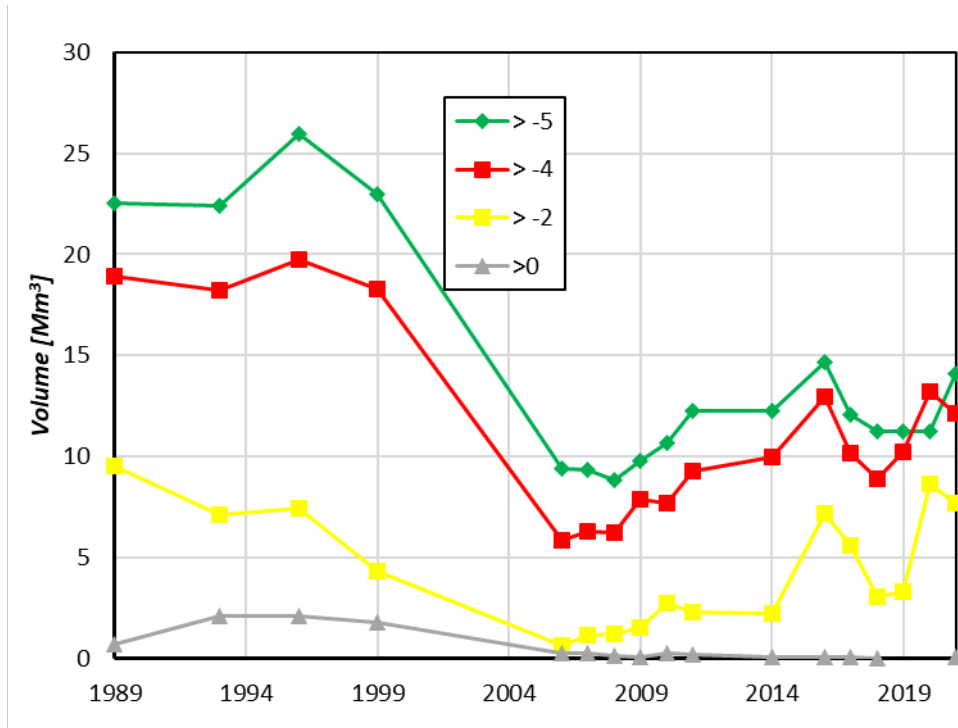


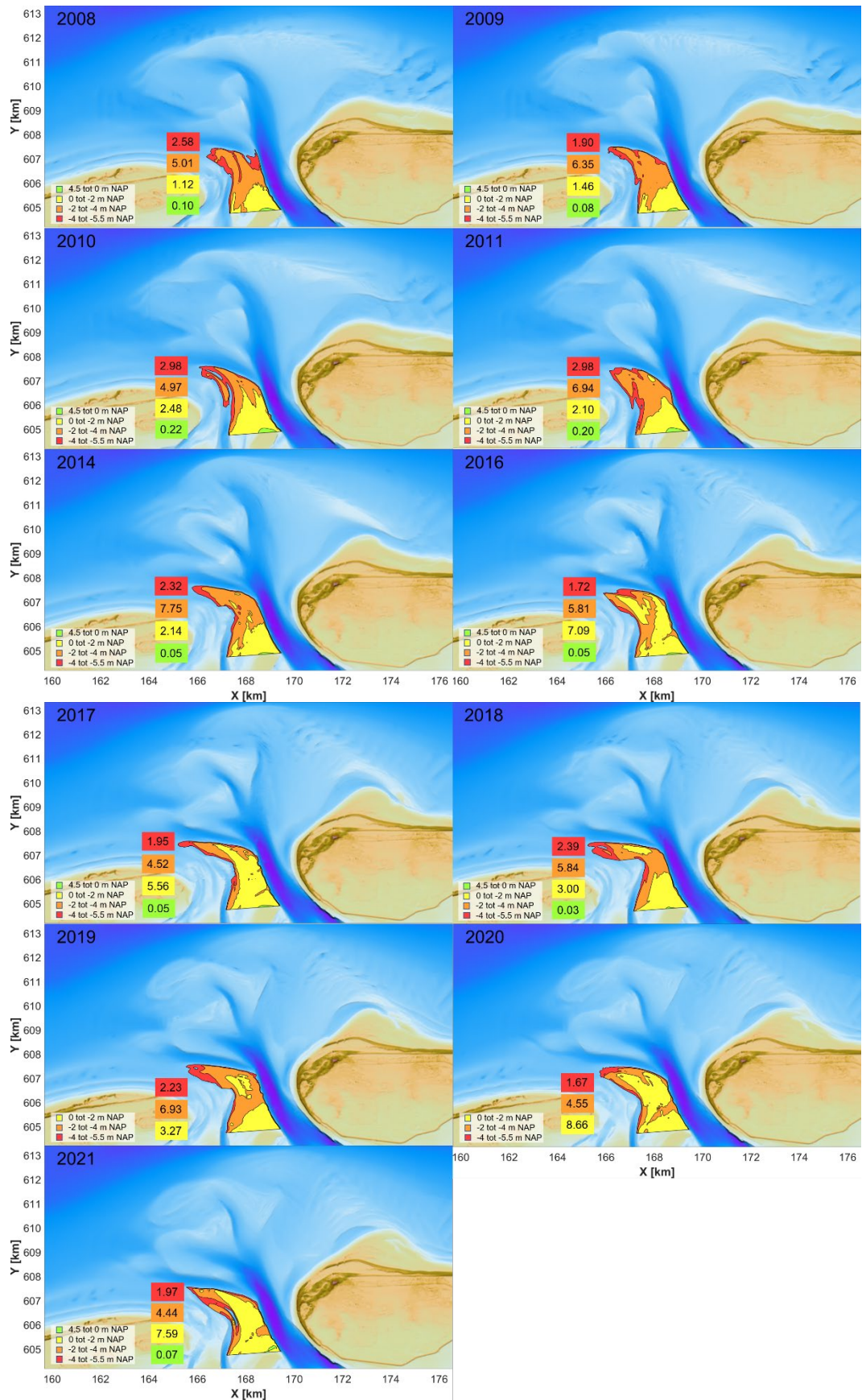
A.3 Contour-polygonen buitendelta per jaar (incl. volumes)





A.4 Volumeontwikkeling Zeehondenplaat





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