

**Een actuele sedimentbalans
van de Waddenzee**



Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee

Edwin Elias

Titel

Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee

OpdrachtgeverRijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving,
UTRECHT**Project**

11203683-001

Kenmerk

11203683-001-ZKS-0002

Pagina's

83

Trefwoorden


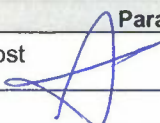
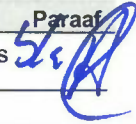
Zandbalans, Waddenzee, Volumeverandering

Samenvatting

In dit document wordt een fundament gelegd voor een beter begrip van de zandbalans van de Waddenzee. De basis van deze zandbalans wordt gevormd door een model waarin alle winst- en verliesposten zijn gedefinieerd. Een belangrijk onderdeel hierin vormen de volumeveranderingen. Een schatting van de volumeveranderingen op langetermijn en voor de huidige trends is gebaseerd op een nieuwe methode van trendlijnanalyse. Het meenemen van alle winst- en verliesposten in de zandbalans geeft een aanzienlijk verschil met de "klassieke" volumeberekeningen die hiervoor niet of slechts beperkt zijn gecorrigeerd. Deze posten vormen de basis van een zandbalansmodel waarin ook de samenhang tussen de verschillende kombergingsgebieden kan worden bepaald.

Op basis van de opgetreden bodemveranderingen in de Waddenzee worden de oostwaartse transporten over het Groninger Wad geschat op 0.20 miljoen m³/jaar. Uitwerking van de volumebalans geeft dan een totale netto zandimport door alle zeegaten van +4.5 Mm³/jaar. Door aannamen te maken van de uitwisseling over de individuele wantijen kunnen we een schatting maken van de bijdrage per zeegat. Deze aannamen van de transporten over de wantijen zijn gebaseerd op de lokale volumeveranderingen nabij het wantij en expert judgement. Uit het zandbalansmodel volgt dat de grootste sedimentimport optreedt door het Zeegat van Texel (+2,0 Mm³/jaar). Het Eierlandse Gat is een exporterend systeem (-0.3 Mm³/jaar). Transporten door het Zeegat van het Vlie worden geschat op +1.2 Mm³/jaar, door het Zeegat van Ameland +1.2 Mm³/jaar en door het Friesche Zeegat +0.5 Mm³/jaar.

In de gepresenteerde volumebalans is niet specifiek gekeken naar het aandeel zand versus slib. Schattingen van het slibpercentage in de Waddenzee bodemvolumina liggen tussen de 8 en 40% (Oost et. al., 2018). Als we uitgaan van het minimum percentage, dan reduceert de totale zandimport door de zeegaten van de Waddenzee tot 4.2 Mm³/jaar.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.1	Jul 2019	Edwin Elias		Albert Oost		Frank Hoozemans	

Status

definitief

Table of Contents

1	Inleiding	1
1.1	Inleiding en doelstelling	1
1.2	Leeswijzer	2
2	Een beknopte beschrijving van de Waddenzee	5
2.1	De Westelijke Waddenzee	5
2.2	De Oostelijke Waddenzee	8
3	Beschikbare data van bodems, ingrepen en transporten	11
3.1	Inleiding	11
3.2	Data beschikbaarheid Westelijke Waddenzee	11
3.3	Data beschikbaarheid Oostelijke Waddenzee	12
3.4	Bagger- en stortvolumes	14
3.5	Bodemdalingsgegevens	17
3.6	Een schatting van de langstransporten	18
4	Methode en bepaling van de winst- en verliesposten in het zandbalansmodel	21
4.1	Methode	21
4.1.1	Een conceptueel zandbalansmodel	21
4.1.2	Trendlijnanalyses van de geobserveerde volumeveranderingen	25
4.2	Berekende trends in de Westelijke Waddenzee	30
4.2.1	Trends in de kustzone	30
4.2.2	Het bekken	33
4.3	Berekende trends in de Oostelijke Waddenzee	35
4.4	Een vergelijking met bestaande studies.	37
4.5	Een overzicht van alle winst- en verliesposten	40
5	Invulling van het Zandbalansmodel Westelijke Waddenzee	43
5.1	Conceptuele uitwerking van de zandbalans Westelijke Waddenzee	43
5.2	Langetermijn sediment-balans model	44
5.2.1	Uitwerking grootschalige zandbalans Westelijke Waddenzee	44
5.2.2	Uitwerking zandbalans per kombergingsgebied met aanname slib percentage bekken is 0%	45
5.2.3	Uitwerking zandbalans per kombergingsgebied met een slib percentage bekken van 20%	48
5.2.4	Gevoeligheidsonderzoek lange-termijn zandbalans.	50
5.3	Huidige trends	53
5.3.1	Uitwerking grootschalige zandbalans Westelijke Waddenzee	53
5.3.2	Uitwerking zandbalans per kombergingsgebied met aanname slibpercentage bekken is 0%	55
6	Invulling van het zandbalansmodel Oostelijke Waddenzee	59
6.1	Conceptuele uitwerking van de zandbalans Oostelijke Waddenzee	59
6.2	Langetermijntrends	60
6.3	Huidige trends	65
7	Discussie	69
7.1	Schatting van de volumeverandering van de Waddenzee.	69

7.2	Schatting van de lange-termijn zandtransporten in de Zeegaten van de Waddenzee.	72
7.3	Schatting van de huidige zandtransporten in de Zeegaten van de Waddenzee.	76
8	Conclusies en Aanbevelingen	79
8.1	Conclusies	79
8.2	Aanbevelingen	80
9	Referenties	81
 Bijlage(n)		
A	Een overzicht van de bodemdata en kaarten	A-1
B	Onderliggende berekening van trends.	B-1
B.1	Berekende trends in de kustzone van de Westelijke Waddenzee	B-1
B.2	Berekende trends in de bekkens van de Westelijke Waddenzee	B-3
B.3	Berekende trends in het Zeegat van Ameland	B-6
B.4	Berekende trends in het Friesche Zeegat	B-12

1 Inleiding

1.1 Inleiding en doelstelling

Binnen de onderzoekprogramma's KPP B&O Kust (deelproject 'uitwisseling getijdebekken en morfodynamiek eilandkoppen'), KPP Morfologie Wadden en Kustgenese 2.0 werken Deltares en Rijkswaterstaat samen aan het vergroten van inzicht in de sedimenthuishouding van de kust en Waddenzee. Eén van de grote en meest belangrijke vragen betreft de sedimentbehoefte van de Waddenzee. Voor de kust is deze sedimentbehoefte van belang omdat dit een belangrijke bron van het zandverlies vormt. Dit zandverlies zou bijvoorbeeld door grootschalige suppleties kunnen worden gecompenseerd. Voor het behoud van de Waddenzee is een goede balans tussen vraag en aanbod van sediment van cruciaal belang is. Met het oog op de zeespiegelstijging is een te klein zandaanbod in de toekomst een realistisch scenario. Met een goed inzicht in de huidige sedimenthuishouding kunnen we het sedimentmanagement rond de Waddenzee beter plannen voor de toekomst.

Een realistische schatting maken van de huidige sedimentbehoefte van de Waddenzee lijkt eenvoudig, maar is geen triviale taak. Het is een groot gebied met beperkte beschikbaarheid van metingen, waarbinnen grootschalige morfologische veranderingen zijn opgetreden. De eerdere studies van bijvoorbeeld Elias et al. (2012) en Wang et al. (2018) presenteren de laatste inzichten in de sedimenthuishouding en morfologie van de Waddenzee, gebaseerd op een analyse over de periode 1926-2012. Deze studies laten zien er over de periode 1935-2005 ongeveer 650 miljoen m³ (Mm³) sediment de Waddenzee is in getransporteerd. Het merendeel van dit sediment werd geleverd door de buitendelta's die sterk in volume afnamen. De grootste volumeveranderingen, ongeveer 75%, werd geobserveerd in het Westelijke deel van de Waddenzee. Hier vulden de afgesloten geulen op en vond er grote sedimentatie plaats langs de kust van Friesland en Noord-Holland. De sedimentatie lijkt dan ook in belangrijke mate het gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee en niet primair een respons op bijv. de stijging van de zeespiegel. Een tekortkoming van deze studies is dat afzonderlijke bekkens, ofwel kombergingsgebieden, apart worden beschouwd. De eventuele uitwisseling tussen de bekkens wordt hierin niet expliciet meegenomen, terwijl diverse recente studies duidelijk maken dat dit wel een rol speelt. Als we puur naar de volumeveranderingen per deelgebied kijken en onder de aanname dat de geobserveerde trends zich ook in de toekomst doorzetten, dan maakt het in essentie ook niet uit waar het sediment vandaan komt. In dat opzicht zijn de voorgaande studies dan ook niet fout. Deze studies geven een goed beeld van wat er in het verleden is gebeurd. Het is echter zeer de vraag in hoeverre deze volumeveranderingen ook een representatief beeld geven van de huidige en toekomstige sedimentvraag. Om een betrouwbare voorspelling voor de toekomst te maken is het zaak om de zandtransportpaden en de resulterende volumeveranderingen veel beter te begrijpen. We moeten niet alleen de volumeverandering per kombergingsgebied kennen, maar ook de uitwisseling tussen de kombergingsgebieden en de daar achterliggende processen begrijpen.

De studie van Elias (2018a) geeft voor de Westelijke Waddenzee al een beter beeld van het morfologische gedrag. Op basis van een trendlijnanalyse is een schatting gemaakt van het lange-termijn gedrag (1935-2015) en ook expliciet voor het huidige gedrag. Op basis van de berekende trendlijnen, aangevuld met schattingen voor de verschillende winst- en verliesposten, wordt bevestigd dat er over de periode 1933-2015 een groot sedimentverlies (-8.6 mcm/jaar) is opgetreden in de kustzone. Dit verlies is afgenomen tot -6.1 miljoen m³/jaar voor de huidige situatie. De sedimentaanwas in het bekken is gereduceerd van 4.0 miljoen m³/jaar voor de lange-termijn trend tot 0.8 miljoen m³/jaar voor de huidige trend. In deze

rapportage hebben we de methode van trendlijnanalyse verder doorontwikkeld en breiden we de analyse uit door zowel de Westelijke Waddenzee als de Oostelijke Waddenzee te beschouwen. De berekende trends vormen cruciale input van een zandbalansmodel waarin ook de overige winst- en verliesposten (zoals bodemdaling, baggeren en storten) expliciet worden meegenomen. Met behulp van dit zandbalansmodel wordt getracht een onderbouwd antwoord te verkrijgen op de vraag: Wat is nu een realistische schatting van de huidige sedimentbehoefte van de Waddenzee?

Het zandbalansmodel geeft ons in principe een samenvatting van alle winst- en verliesposten per zeegat, als we deze uitwerken kunnen we de sedimentimport of -export in de zeegaten uitrekenen. Bij deze berekeningen is het van belang dat men zich realiseert dat er, door het zichtbaar maken van alle transportpaden (pijltjes) duidelijk wordt dat vrijwel elk gebied (m.u.v. kwelders en duinen) een groot aantal mogelijke transportpaden kent, waarlangs sediment kan worden aan- of afgevoerd. Het eindresultaat is een netto sedimentatie of erosie in het gebied. Daarmee wordt de berekening van wat er nu precies gebeurt via al deze paden een stuk lastiger, maar geeft wel een realistischer beeld. Bijvoorbeeld: onder de aanname dat er maar 1 transportpad (pijl) is, via het zeegat, naar een kombergingsgebied is het transport gelijk aan de in het kombergingsgebied bepaalde sedimentatie. Als er echter meerdere transportpaden zijn (nog 2 over de wantijen) dan ontstaat er, indien er geen additionele informatie beschikbaar is, een onder-gedefinieerd systeem (er zijn meer onbekenden dan vergelijkingen, wat leidt tot een grote suite aan mogelijke oplossingen). Een deel van deze onbekenden kunnen we oplossen door modelleringen, door metingen en expert-judgement. Zo zijn de verliezen naar de eilanden nog een ruwe schatting. Een grote onbekende is verlies naar diep water, maar ook de langstransporten blijken niet geheel bekend te zijn. Met schattingen van deze winst- en verliesposten kunnen de transporten tussen de verschillende balansgebieden (incl. de zeegaten) worden berekend. De meerwaarde van een dergelijke aanpak is dat we enerzijds veel meer grip krijgen op het functioneren van het systeem (nu en in de toekomst) en anderzijds ook zichtbaar wordt waar kennislacunes zijn die we moeten invullen, willen we gesteld staan voor de toekomst.

1.2 Leeswijzer

Deze rapportage behandelt met name de achtergrond, de uitwerking en de invulling van een zandbalansmodel van de Waddenzee. Het zandbalansmodel is een vereenvoudigde weergave van de verschillende winst- en verliesposten die optreden in de Waddenzee. Deze winst- en verliesposten zijn opgebouwd uit de gemeten volumeveranderingen en schattingen van de overige posten zoals zandwinning, suppleties, verliezen naar de duinen, bodemdaling en slibpercentage. Al deze posten zijn uitgedrukt in een trend ofwel een volumeverandering in $Mm^3/jaar$. Deze trends zijn bepaald door trendlijnen te berekenen over verschillende periodes welke representatief geacht worden voor de lange-termijn trends en de huidige trends.

In de analyses gepresenteerd in dit rapport proberen we een consistente en coherente analyse over de gehele Waddenzee uit te voeren. Toch worden de Westelijke en Oostelijke Waddenzee hierbij in de berekening van de trendlijnen apart beschouwd. De methode van trendlijnbepaling en de exacte periodes waarover deze bepaald zijn wijken voor de Westelijke en Oostelijke Waddenzee iets af. De beschikbaarheid en geschiktheid van de bodemdata speelt hierbij een rol. Daarnaast verschillen de Westelijke en Oostelijke Waddenzee aanzienlijk in gedrag, waardoor een iets andere methode van analyse is vereist. Voor de Westelijke Waddenzee worden de polygonen en inzichten uit de studie van Elias (2018a) als basis gebruikt. Vanwege consistentie met de analyse van de Oostelijke Waddenzee zijn de huidige trends wel opnieuw berekend over een iets langere periode (1997-2015). In de Oostelijke Waddenzee zijn de volumeveranderingen kleiner en vertonen meer variabiliteit. Hierdoor heeft een volumebepaling

gebaseerd op individuele sedimentatie-erosie patronen van de kleinere morfologische eenheden geen meerwaarde. Deze methode levert zoveel ruis op in de volumeveranderingen dat trendlijnen niet eenduidig en nauwkeurig(er) kunnen worden bepaald. Daarom is voor de Oostelijke Waddenzee gebruik gemaakt van grotere morfologische eenheden en zijn aanvullend trendlijnanalyses op de bruto sedimentatie en erosie volumes uitgevoerd.

Dit rapport beschrijft de technische uitwerking van de zandbalans en is gericht op de bepaling van de getallen en onderbouwing van de aannamen, maar geeft slechts een beperkte doorvertaling naar het kustbeleid. Deze opzet is gekozen om eerst een breed gedragen draagvlak voor de methode te ontwikkelen, voordat we belangrijke conclusies trekken. De aannamen onderliggend in de uitwerking van het zandbalansmodel zijn zorgvuldig gekozen, waar mogelijk gebaseerd op de literatuur maar ook op aannames en "expert judgement". Een doel van deze rapportage is de onderbouwing te delen met gebruikers, betrokkenen en experts. Gebaseerd op hun aanbevelingen kunnen we waar nodig de uitwerking verder verfijnen en verbeteren.

Er bestaat altijd onduidelijkheid over de begrippen sediment en zand. Ook hier worden beide begrippen naast elkaar gebruikt. De gemeten volumeveranderingen zijn in principe sedimentvolumes. Deze kunnen zowel uit zand als slib bestaan. In de kustzone is het aandeel slib waarschijnlijk beperkt en kunnen we waarschijnlijk wel over zandvolumes spreken. In het bekken lopen de schattingen van het slibpercentage sterk uiteen. In de rapportage van Oost et al. (2018) als schatting gegeven dat het slibpercentage tussen de 8-37% licht. In termen van sediment en zand, bestaat de analyse gepresenteerd in dit rapport eigenlijk uit 2 delen. Ten eerste brengen we de volumeveranderingen in kaart. Hier spreken we dan over sedimentvolumes. Deze sedimentvolumes vormen de basis en input voor het zandbalansmodel. Het zandbalansmodel brengt de zandtransportstromen in beeld. Als basisuitwerking nemen we aan dat het sedimentvolume gelijk is aan het zandvolume (0% slib). Daarnaast werken we het zandbalansmodel uit door het sedimentvolume van het bekken te reduceren. We gaan dan vanuit dat de gemeten volumeverandering voor een deel uit zand bestaat en voor een deel uit slib. Het gekozen volumepercentage slib is hier 8% en 20%. Het specifiek uitwerken van de slibbalans wordt in andere onderzoeksprogramma's opgepakt en in deze rapportage verder niet behandeld.

Om de leesbaarheid te vergroten hebben we de rapportage verdeeld in 8 hoofdstukken. Hoofdstuk 2 geeft een beknopte beschrijving van het systeem op basis van de nieuwste bodemkaart (2015-2017) en een beschrijving van de morfologische veranderingen sinds 1933. Dit hoofdstuk is vooral een samenvatting van eerdere studies, maar geeft een goede, beknopte achtergrond van het systeem voor de 'niet-expert'. Hoofdstuk 3 beschrijft de beschikbare bodem data en bevat een overzicht van alle ingrepen (zandwinning, suppleties baggeren en storten) en verliezen zoals bodemdaling. Deze data vormt de basis van de studie en de analyses uitgevoerd in H4, H5 en H6. Hoofdstuk 4 geeft een uitleg van het conceptuele zandbalansmodel en een overzicht van de berekende trends vanuit de trendlijnanalyses. De resultaten van deze analyses zijn hier samengevat in een serie vereenvoudigde figuren. De volledige resultaten worden gegeven in Appendix B. H5 en H6 geeft dan de invulling van het zandbalansmodel voor respectievelijk de Westelijke Waddenzee en de Oostelijke Waddenzee. In deze hoofdstukken wordt een "basis" uitwerking in detail uitgelegd. Deze methode wordt dan toegepast op een serie gevoeligheidsberekeningen waarin verschillende aannames voor bijv. langtransport en slibgehalte zijn gedaan. Op basis van deze resultaten kan dan een conclusie worden getrokken over de volumeveranderingen en zandtransporten in de Waddenzee (Hoofdstuk 7 en 8).

2 Een beknopte beschrijving van de Waddenzee

Als achtergrond bij de morfologische kenmerken van de Westelijke en Oostelijke Waddenzee worden in de volgende paragrafen de ligging van de belangrijkste geulen en platen beknopt beschreven. Deze beschrijvingen zijn gebaseerd op de eerdere rapportages van Elias (2018 a) en Elias (2018b).

2.1 De Westelijke Waddenzee

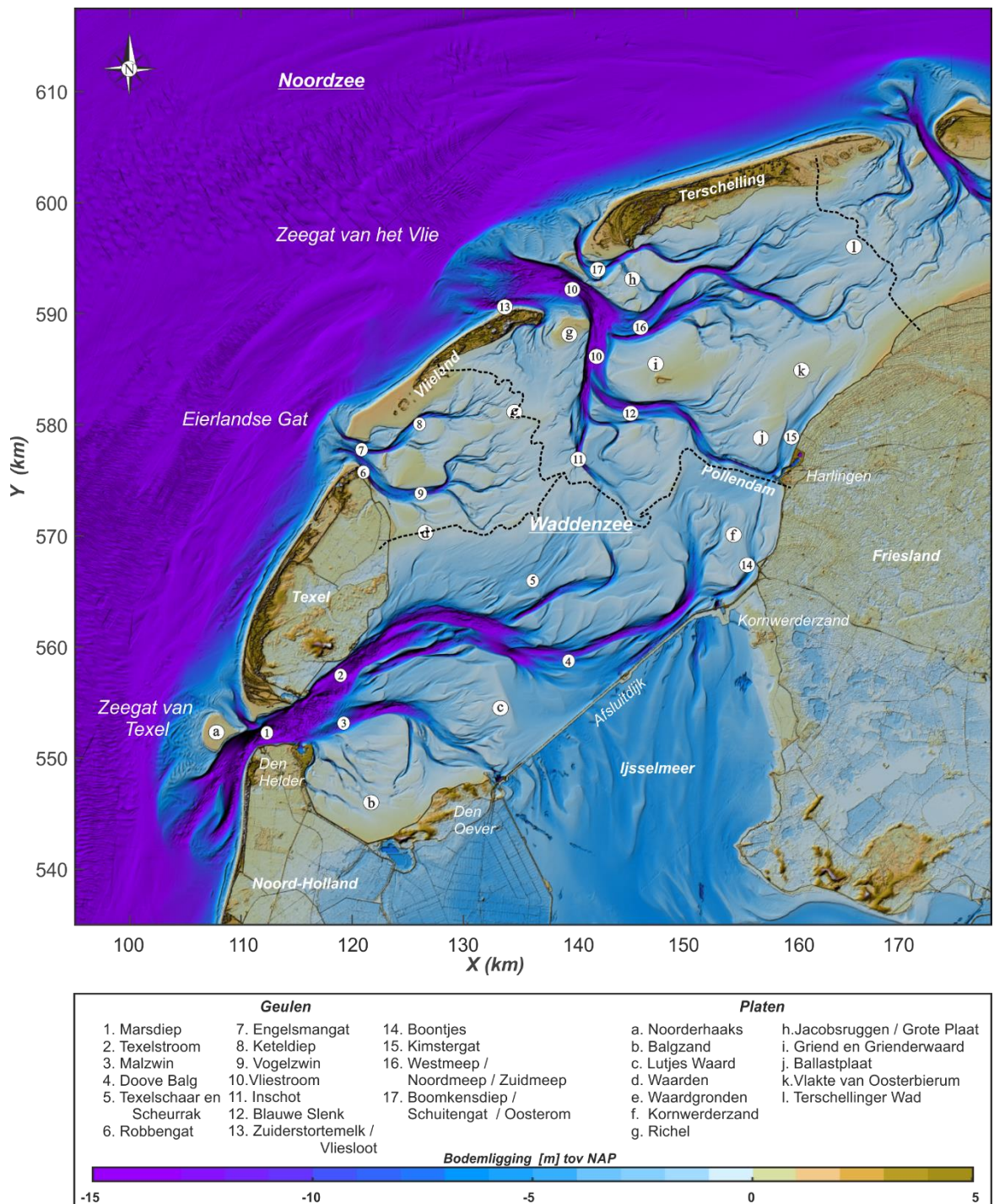
Het Westelijke deel van de Waddenzee wordt gevormd door drie zeegaten: het Zeegat van Texel, het Eierlandse Gat en het Zeegat van het Vlie (Figuur 2.1). Wantijen worden vaak gebruikt om een afbakening te maken tussen de verschillende zeegaten in de Waddenzee. Het idee is dat de ondiepten die gevormd worden de sedimentuitwisseling tussen de systemen beperkt houden, waardoor het mogelijk is de kombergingsgebieden morfologisch te scheiden. Het is de vraag of zo'n scheiding in werkelijkheid aanwezig is. Waarschijnlijk vormt de gehele Waddenzee, op een wat langere tijdschaal, een sediment-delend systeem. In het relatief ondiepe oostelijk deel van de Waddenzee vormen de wantijen duidelijke scheidingen, maar ook daar kan er sprake zijn van een netto reststroom van water en sediment. Vooral tijdens stormen zal er wel degelijk sprake zijn van een sterkere uitwisseling van water en sediment. De gestreepte lijnen in Figuur 2.1 geven een schatting van de ligging van de wantijen op basis van de minimale diepte en de oriëntatie/helling van de bodemvormen. Het relatief rechte wantij achter het eiland van Terschelling (Terschellinger Wad [l]) wordt gebruikt als Oostelijke afbakening van het studiegebied. In het Westelijke deel van de Waddenzee is een wantij eigenlijk alleen duidelijk te zien rond het Eierlandse Gat, waar de Waardgronden en Waarden een duidelijke drempel vormen tussen de zeegaten. Tussen de twee grootste zeegaten, Vlie en Texel, is de scheiding op basis van bodemligging moeilijker te definiëren. Vanaf de Waarden is er een zuidoostelijke ligging op basis van de geulliggingen en bijbehorende bodemvormen nog wel een redelijke scheiding tussen de 2 zeegaten te trekken. Deze scheiding heeft een duidelijk knippunt om het Kornwerderzand [f] heen. Ter plaatse van de Blauwe Slenk [12] is geen duidelijke scheiding te zien. Hier gaan de geulen van het Zeegat van Texel en Vlie in elkaar over. De Pollendam en het baggeren van de toegang tot Harlingen dragen hier mede aan bij. Het is niet geheel duidelijk of de Vlakte van Oosterbierum [k] tot het kombergingsgebied van het Vlie of dat van het Zeegat van Texel gerekend moet worden. Qua ligging zou het bij het Vlie gerekend moeten worden, maar het is echter wel waarschijnlijk dat het Kimstergat [15] verbinding maakt met de Boontjes [14]. Dit zou betekenen dat het sedimentatiegebied rondom het Kimstergat misschien wel bij het kombergingsgebied van het Zeegat van Texel behoort. In de analyses gepresenteerd in dit rapport gebruiken we de sedimentatiesnelheid van de Vlakte van Oosterbierum als indicatie van de transporten over het wantij.

Wat direct opvalt in Figuur 2.1 zijn de grote geulen in het bekken. Texelstroom [2] en Doove Balg [4], die zich vanaf het Marsdiep [1] in Oostelijke richting uitstrekken. Texelstroom ligt in eerste instantie langs de oostkust van Texel, maakt een scherpe bocht richting de Afsluitdijk en volgt dan als Doove Balg [4] de Afsluitdijk oostwaarts. Een ondiep gebied tussen Kornwerderzand [f] en Harlingen vormt de scheiding tussen de geulen van het Zeegat van Texel en de geulen van het Vlie. Een duidelijk wantij, in de vorm van hogere platen, is hier niet aanwezig.

Ten zuiden van de Texelstroom, vinden we de bankengebieden Balgzand (b) en Lutjeswaard (c). Deze banken worden gescheiden door de voormalige hoofdgeul Malzwin [3]. Malzwin is na aanleg van de Afsluitdijk voor een groot gedeelte opgevuld met sediment. Aan de noordzijde

van Texelstroom/Doove Balg vormt de bank Waarden [d] een duidelijke scheiding tussen het Zeegat van Texel en het Eierlandse Gat. Het Eierlandse Gat heeft in de keel twee min-of-meer door een ondiepe drempel gescheiden hoofdgeulen: het Robbengat [6] en het Engelsmangat [7]. Het Engelsmangat heeft een noordelijke ligging en sluit rechtstreeks aan op de geul Keteldiep [8] in het bekken en een kleinere geul langs Vlieland 'Geul onder de Vliehors'. Langs de kust van Texel, Bolwerk Eierland, ligt het Robbengat, deze geul gaat in het bekken over in het Vogelzwin [9], waarna deze vertakt in een drietal kleinere geultjes die uitstromen over de Waardgronden.

De noordelijke Waardgronden vormen de scheiding tussen het Eierlandse Gat en het Zeegat van het Vlie. De grootste geul in het Zeegat van het Vlie is de Vliestroom [10]. Deze geul heeft een NW-ZO oriëntatie. Direct langs de zuidwestkust van Terschelling vinden we de nevengeulen, Boomkensdiep, Schuitengat en Oosterom [17], die zich langs de eilandkop uitstrekken. Langs de noordzijde van Vlieland liggen de geulen Zuiderstortemelk en Vliesloot [13], gescheiden van de Vliestroom door de grote (hoge) plaat Richel [g]. In het bekken splitst de Vliestroom zich in een zuidelijke tak (Vliestroom) en een noordelijke tak (Westmeep en Noordmeep [16] die overgaat in de Zuidmeep). Een aantal kleine vertakkingen strekken zich vanuit de Zuidmeep richting het Terschellinger Wad uit. De Vliestroom en Westmeep worden gescheiden door de platengebieden Griend en Grienderwaard [i]. Richting Harlingen vertakt de Vliestroom in de geulen Inschot [11] en Blauwe Slenk [12]. De Blauwe Slenk vormt de toegangsgedul naar de haven van Harlingen. Het laatste stukje is daarbij vastgelegd door de Pollendam. Tussen Harlingen en Kornwerderzand vinden we nog de geul Boontjes [14]. Ten noorden van Harlingen strekt het Kimstergat [15] zich langs de kust van Friesland uit richting de Vlakte van Oosterbierum [k].



Figuur 2.1 Een overzicht van de drie zeegaten die de Westelijke Waddenzee vormen en de ligging van de belangrijkste platen en geulen op basis van de representatieve 2015 bodem. Gestreepte zwarte lijnen geven de locaties van de wantijen weer.

2.2 De Oostelijke Waddenzee

In deze studie richten we ons alleen op het gedeelte van de Oostelijke Waddenzee dat gevormd wordt door het Zeegat van Ameland en het Friesche Zeegat (Figuur 2.2 boven). Deze zeegaten worden gescheiden door het Pinke Wad. Het Friesche zeegat wordt aan de oostzijde begrensd door het Hornhuizer Wad. Ten oosten hiervan vinden we het Groninger Wad, dit stukje Waddenzee wordt in deze studie niet meegenomen. De belangrijkste reden hiervoor zijn dat de grote dynamiek van de buitendelta's, de uitwisseling met de Eems-Dollard en de vele ingrepen (bagger- en stort werkzaamheden) die hier uitgevoerd worden, het erg lastig maken een goede randvoorwaarde of begrenzing te trekken voor de zandbalans. Dit geeft een (te) grote onzekerheid in de zandbalansstudie. Zo'n afbakening is tussen het Friesche Zeegat en het Groninger Wad wel veel beter te definiëren. Voor een uitgebreide analyse van de recente volumeveranderingen van het Groninger Wad word verwezen Vermaas et al. (2017).

Een representatief beeld van de huidige geulen en platen in de zeegaten van de Oostelijke Waddenzee is te zien in Figuur 2.2 (onder) op basis van de 2009-2014 Vaklodningen. De keel van het zeegat van Ameland wordt gevormd door de hoofdgeul Borndiep [1]. Deze geul heeft een maximale diepte van meer dan 25 m. In het bekken splitst de geul zich in een Oostelijke tak Dantziggat [3] en een kleinere meer zuidwestelijk gerichte tak Kromme Balg [9]. Dantziggat strekt zich, via een stelsel van kleinere vertakkende geulen zoals Kikkertgat [4], Noorder Spruit [6] en Zuider Spruit [7], uit richting het wantij Pinke Wad. Ten noorden, direct langs het eiland Ameland, bevindt zich nog de geul Molengat [7]. Kleinere nevengeulen bevinden zich aan de zuidzijde van Dantziggat zoals Vaarwater vd Zwarte Haan [8].

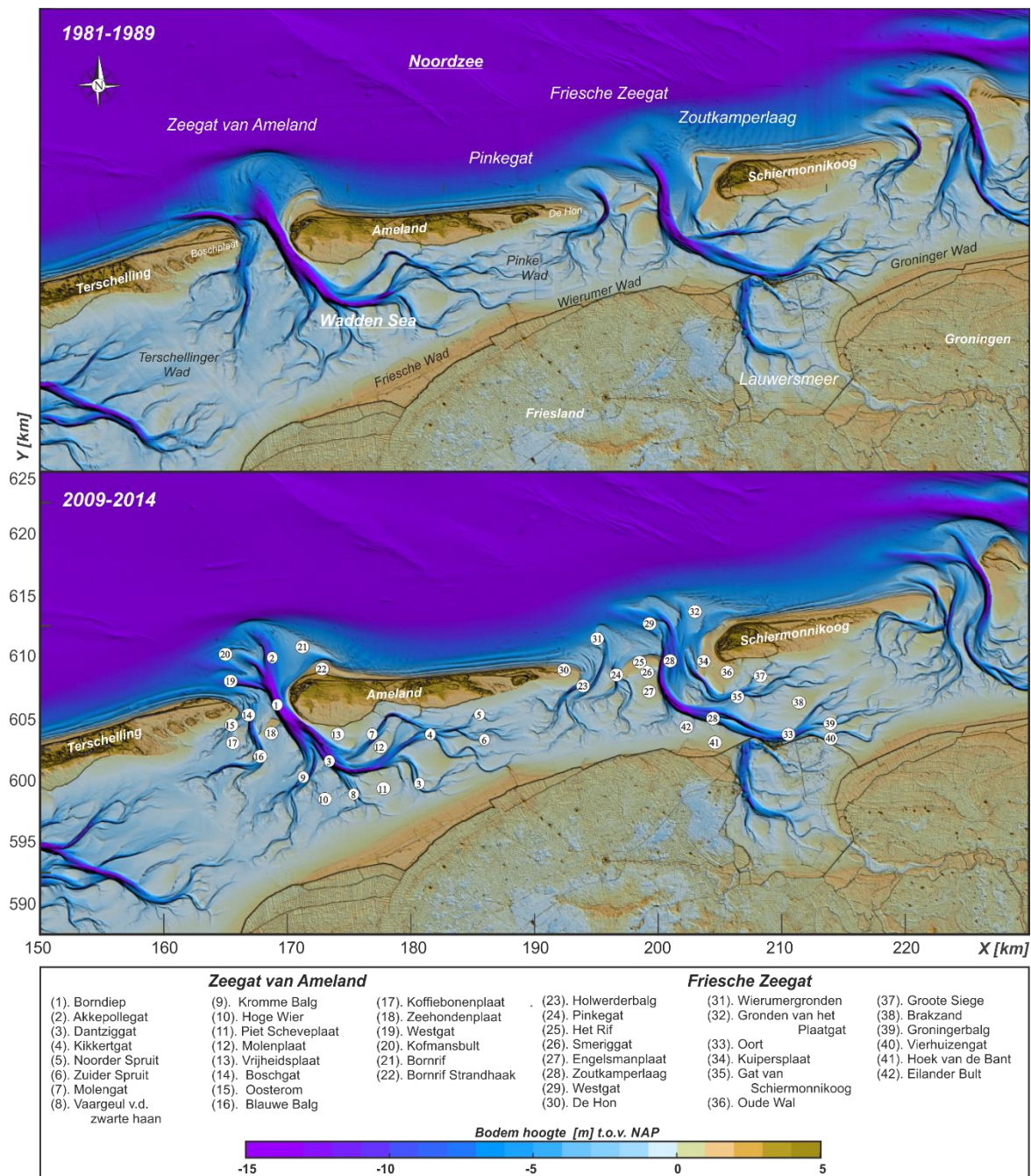
Tussen het Borndiep en de oostpunt van Terschelling (de Boschplaat) bevindt zich een ondiep gebied met verschillende kleinere geulen. Dit gebied verbindt de hoofdgeul in het bekken (Boschgat [14]) met de zeewaarts gelegen geul Westgat [19]. In het bekken gaat Boschgat over in de geul Blauwe Balg [16]. De Koffiebonenplaat [17] scheidt Blauwe Balg/Boschgat van de geul Oosterom [15] die direct langs de waddenkust is gelegen. In het bekken, tussen Blauwe Balg en Borndiep vinden we nog de Zeehondenplaat [25] een hoge (supra-getijde) plaat, waarvan het diepere gedeelte zich zeewaarts uitstrekt, langs de rand van Borndiep. De buitendelta bevat 3 grote plaatoppervlakten en 2 geulen. De uitstroming van Borndiep de buitendelta op wordt ook Akkepollegat [2] genoemd. Het Akkepollegat is in deze bodem nog een grote, dominante, geul op de buitendelta, maar is recentelijk sterk in omvang afgenomen (zie Elias et al. 2019 voor een uitgebreide analyse). Aan de westzijde ligt het Westgat [19], een vloedgeul die zich in Westelijke richting langs de kust van Terschelling uitstrekt. Zeewaarts hiervan vinden we het bankengebied Kofmansbult [20]. De Kofmansbult wordt in de huidige bodem gedomineerd door een sterk ontwikkelde ebschaar en ebschild. Aan de oostzijde van het Akkepollegat vinden we het plaatoppervlakte Bornrif [21]. Het Bornrif vormt het dominante platengebied van de buitendelta. Periodiek vormen en migreren er kleinere banken over het Bornrif naar de kust van Ameland. In de getoonde bodem is dit ook zichtbaar in de vorm van een ondiepte bank (het Bornrif Bankje) aan de oostzijde van de buitendelta. Langs de kust van Ameland vinden we nog de overblijfselen van de Bornrif Strandhaak [22] terug. De Bornrif Strandhaak is rond 1985 aangeland en heeft sindsdien de kust gevoed met zand als een natuurlijke "zandmotor".

Het Pinke Wad vormt de scheiding tussen de bekkens van het zeegat van Ameland en het Friesche Zeegat. Beide zeegaten vertonen eigenlijk een overeenkomstige configuratie van geulen en platen. De hoofdgeul bevindt zich aan de oostzijde van de keel van het zeegat en strekt zich in het bekken naar het oosten uit. Aan de westzijde vinden we bij beide zeegaten een wat kleiner geulen systeem. In het bredere Friesche zeegat is dit nevensysteem meer ontwikkeld. De Engelmansplaat [27], het zeewaartse deel wordt Het Rif [25] genoemd, vormt

een scheiding tussen het westelijke geulensysteem Pinkegat en de oostelijk gelegen Zoutkamperlaag. Het Pinkegat systeem bestaat eigenlijk uit enkele kleinere geulen, zoals Pinkegat [24] en Holwerderbalg [23]. De Holdwerderbalg strekt zich langs de punt van Ameland, de Hon [30], uit. De buitendelta wordt gevormd door het platengebied Wierumergronden [31].

Op het oostelijke deel van de buitendelta, de buitendelta van de Zoutkamperlaag, bevinden zich de geul Westgat [29] en aan de oostzijde hiervan het bankengebied Gronden van het Plaatgat [32]. In het bekken maakt de Zoutkamperlaag een bocht naar het oosten toe en gaat dan over in Oort [33] en splitst vervolgens in de geulen Groningerbalg [39] en Vierhuizengat [40]. Direct langs de kust van Schiermonnikoog bevindt zich het geulensysteem Gat van Schiermonnikoog en Groote Siege [35, 37]. Aan de westzijde van het eiland Schiermonnikoog bevindt zich een grote strandvlakte gevormd door Kuipersplaat [34] en de Oude Wal [36].

Het 2-geulen systeem Pinkegat en Zoutkamperlaag is eigenlijk over de gehele gemeten periode wel aanwezig geweest, maar grote veranderingen in de ligging en vorm van de geulen hebben zich voorgedaan (Figuur 2.2). Deze veranderingen zijn mede veroorzaakt door de afsluiting van de Lauwerszee voltooid in 1969.



Figuur 2.2 Een overzicht van het Amelander en Friesche Zeegat die samen een groot deel van de Oostelijke Waddenzee vormen. De bovenste figuur is gebaseerd op de 1981-1989 Vaklodingen, de onderste figuur is gebaseerd op de meest recente bodemopname, 2009-2014.

3 Beschikbare data van bodems, ingrepen en transporten

3.1 Inleiding

De basis van deze studie wordt gevormd door een analyse van de bodemveranderingen. Deze bodemveranderingen zijn berekend vanuit de Vaklodingen datasets. Vanaf 1985 heeft Rijkswaterstaat de bodemdata digitaal ingewonnen en opgeslagen. De data vóór 1985 zijn alleen beschikbaar als analoge kaartbladen van de voormalige Adviesdienst Hoorn. In het kader van een grootschalig onderzoek naar de sedimentatie en erosie van de Waddenzee zijn een aantal van de analoge kaartbladen gedigitaliseerd en min-of-meer dekkende kaarten voor de periode 1925-1985 gemaakt (zie de rapporten van Glim et al. 1986. 1987. 1988a,b, 1989 en 1990; Oost, 1995 voor details). De onderliggende data is daarbij zorgvuldig terug berekend naar een 250x250m grid. In de gridcellen met voldoende resolutie is hiervoor het meest representatieve punt gekozen. In gebieden met lage resolutie is daarvoor een interpolatie vanuit de omliggende punten uitgevoerd. In de studie van Elias (2018a) is geconstateerd dat er in de bodemdata van voor 1985 inconsistenties zijn tussen de verschillende databronnen die eigenlijk identieke data zouden moeten bevatten. Als basis voor de Westelijke Waddenzee zijn de bodems gebruikt zoals beschreven in Elias (2018a). De bodems voor de Oostelijke Waddenzee zijn vanuit de bestanden zoals beschikbaar in de Open-Earth database geconstrueerd. Alle dekkende bodemkaarten gebruikt in deze studie zijn gecreëerd m.b.v. het programma Quickin (Deltares, 2017).

Sinds 1985 wordt de bodemdata digitaal opgeslagen. Na inwinning van de dieptelodingen worden complete kaartbladen 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 grid en vervolgens opgeslagen als Vaklodingen kaartbladen. Van west naar oost wordt jaarlijks een bekken ingemeten, na 6-jaar is er dan een volledige opname van de Waddenzee. De kustzone wordt in 3-jaarlijks interval opgenomen.

3.2 Data beschikbaarheid Westelijke Waddenzee

Een uitgebreide beschrijving van de onderliggende bodemdata voor de Westelijke Waddenzee is gegeven in Elias (2018a). Op basis van de gedigitaliseerde bodemdata (zie Appendix A, A.1) zijn 6 dekkende kaarten gemaakt voor de voor de representatieve jaren: 1926. 1933. 1950. 1971. 1976 en 1981 (Appendix A, A.2). Uit deze kaarten blijkt wel dat de lange-termijn trends berekend worden over zeer beperkte data beschikbaarheid. De buitendelta's zijn nog wel een aantal keer bemeten, maar de kustzone heeft slechts een beperkte dekking.

Sinds 1985 wordt de bodemdata digitaal opgeslagen als Vaklodingen kaartbladen. De kustzone wordt in 3-jaarlijks interval opgenomen terwijl het bekken elke 6 jaar wordt bemeten. Met behulp van de kaartbladdata zijn 10 dekkende bodemkaarten opgebouwd voor de kustzone. Voor 6 kaarten is ook het achterliggende bekken beschikbaar is (Appendix A, A.3 en A.4). Over het algemeen zijn de getoonde jaren goed voor 90-100% invulling van de bodemkaart. Kleinere gebieden met missende data zijn op verschillende manieren aangevuld. De 1986 bodem vertoont enkele kleine gebieden met missende data, waar 'expert judgement' is gebruikt om de data volledig dicht te interpoleren op basis van de omliggende punten. Tabel 3.1 geeft een compleet overzicht van de gebruikte bodemdata zoals gebruikt in deze studie.

Tabel 3.1 Een overzicht van de gebruikte bodemdata voor het maken van representatieve jaren voor de Westelijke Waddenzee (ETD = ebb-tidal delta / buitendelta).

Rep. Jaar	Zeegat van Texel			Eierlandse Gat			Zeegat van het Vlie		
	Kust	ETD	Bekken	Kust	ETD	Bekken	Kust	ETD	Bekken
1926	1925	1925	1933	1925	1930	1933	1926	1930	1933
1933	1925	1933	1933	1925	1930	1933	1926-30	1933	1933
1950	-	1950	1951	-	-	1949	-	-	1951
1971	1971	1975	1972	1971	1971	1971	1972	1972	1972
1976	1971	1975	1977	1976	1976	1976	1976	1976	1978
1982	1980	1981	1982	-	1982	1982	1982-1988	1981	1982
1985	1987	1986	1985/86	1987	1987	1987	1988	1988	1988
1991	1991	1991	1991	1993	1993	1993	1992	1992	1991/92/93
1994	1994	1994	-	1996	1996	-	1995	1995	-
1997	1997	1997	1997	1999	1999	1999	1998	1998	1998
2000	1999	1999	-	2000	2000	-	2000	2000	-
2003	2003	2001	2003	2002	2002	2002/03/04	2002/03	2002	2002/03/04
2006	2005	2006	-	2005/06	2006	-	2007	2007	-
2009	2009	2009	2009	2011	2011	2011	2010	2010	2010
2012	2012	2012	-	2014	2014	-	2013	2013	-
2015	2015	2015	2015	2017	2017	2017	2016	2016	2016

3.3 Data beschikbaarheid Oostelijke Waddenzee

De bekkens in de Oostelijke Waddenzee vertonen een veel duidelijkere scheiding dan de bekkens in de Westelijke Waddenzee. De analyses van het Amelander en Friesche Zeegat zijn daarom afzonderlijk uitgevoerd. Voor het Zeegat van Ameland zijn 22 kaarten beschikbaar met verschillende dekking en nauwkeurigheid (zie Appendix A, A.5 – A.10). Overeenkomstig met de Westelijke Waddenzee is data van voor 1985 gereconstrueerd vanuit de analoge kaarten. Op basis van de Vaklodingen zoals deze zijn vastgelegd in de Open-Earth database zijn daar 5 kaarten van samen te stellen⁽¹⁾. Voor Ameland is besloten de Open-Earth data set te gebruiken omdat deze op een gelijkwaardige manier is geïnterpoleerd naar een 20x20m grid als de meer recente data. Hierdoor sluit de studie aan op het werk uitgevoerd in bijvoorbeeld Kustgenese 2 en worden interpolatiefouten voorkomen.

⁽¹⁾ De data die beschikbaar is via Open-Earth is niet geheel gelijk aan de data zoals beschreven door De Kruij (2001) en weergegeven in Appendix A, Figuur A.5. Dit is een aandachtspunt en wordt in een aanverwant, lopend onderzoek verder opgepakt.

Tabel 3.2 Een overzicht van de gebruikte bodemdata voor het maken van representatieve jaren voor het Amelander Zeegat.

Rep. jaar	Kust	ETD	Bekken	Opmerkingen	
(1)	1926	1930	1926	1926	
(2)	1948	-	-	1950	(niet gebruikt in deze studie)
(3)	1975	1971-74	1974	1973	kust – oostkant opvullen met 1971
(4)	1979	1979	1979	1978	kust aanvullen met Jarkus
(5)	1981	-	1982	1984	kust aanvullen met Jarkus
(6)	1989	1989	1989	1989	Vakloding
(7)	1993	1993	1993	1993	Vakloding
(8)	1996	1996	1996	-	Vakloding
(9)	1999	1999	1999	1999	Vakloding
(10)	2002	2002	2002	-	Vakloding
(11)	2005	2005	2005	2005	Vakloding
(12)	2006	2006	2006	2005	SBW, alleen geulen in het bekken
(13)	2007	2007	2007	2007	SBW (volledige dekking)
(14)	2008	2008	2008	2008	SBW (volledige dekking)
(15)	2009	2008	2009	2009-2008	SBW, beperkte dekking ETD. In het bekken alleen
(16)	2010	2010-2011	2010	2010-2011	geulen.
(17)	2011	2011	2011	2011	SBW, redelijke dekking, missende delen aangevuld met 2011 meting
(18)	2014	2014	-	-	Vakloding
(19)	2016	2016	-	-	Vakloding
(20)	2017	2017	2017	201701	Kustgenese 2.0
(21)	2017	2017	2018	-	Kustgenese 2.0 – voorjaar (gecombineerd met
(22)	2018	2018	-	-	vakloding)
					Kustgenese 2.0 – najaar (gecombineerd met vakloding)

Opmerkingen: (1). ETD = Ebb -Tidal Delta ofwel buitendelta

(2). De kaarten voor de jaren 1934 en 1950/58 zijn niet gebruikt in deze analyse vanwege de beperkte dekking.

De data van het Friesche Zeegat opgenomen voor 1991 is ook gedigitaliseerd van minuutbladen en aangevuld met bijv. landaanwinningsgegevens, kustmetingen en detailkaarten waar nodig. Dit is echter niet binnen hetzelfde project uitgevoerd als voor de andere zeegaten. Deze bodems zijn geconstrueerd in het kader van het eerste Kustgenese onderzoek, zie Oost en de Haas (1992, 1993) voor details. Hierdoor is de verwerking en uiteindelijke data afwijkend. De uiteindelijke gegevensbestanden van de dieptemetingen zijn gerasterd in een rooster met een celgrootte van 90*90 meter. Dit rooster is voor ieder jaar identiek, zodat ook hier vergelijkingen tussen de verschillende jaren mogelijk zijn. Appendix A, Figuur A.6 geeft een overzicht van de bodembestanden voor de periode 1926-1982. De data zijn met behulp van het programma Quickin (Deltares, 2017) omgezet naar een roosterresolutie van 20 m. In totaal zijn er over deze periode dan 8 dekkende kaarten geconstrueerd (Tabel 3.3 en Appendix A, Figuur A.11). Ten behoeve van de zandbalansberekeningen zijn missende datapunten zo nauwkeurig mogelijk ingevuld. Dit is vooral het geval langs de eilandkusten. Ook de diepere vooroever vertoont een incomplete dekking.

De bodems na 1987 zijn in 20m resolutie aanwezig in het Rijkswaterstaat Vaklodingen bestand en in de Open-Earth dataset. Appendix A, Figuur A.7 geeft een overzicht van de databeschikbaarheid. Met behulp van de digitale kaartbladdata zijn vervolgens 10 bodemkaarten voor het Friesche Zeegat opgebouwd (Tabel 3.3 en Appendix A, Figuur A.12). Voor de jaren 1989, 1994, 2000, 2005 en 2012 is het gehele zeegat inclusief bekken bemeten. Voor de jaren 1991, 1997, 2002, 2009 en 2015 is alleen de kustzone beschikbaar.

Kleinere gebieden met missende data zijn op verschillende manieren aangevuld. Waar mogelijk zijn aanvullende Lidar opnamen gebruikt om droogvallende gebieden in te vullen. Dit is met name gebeurd voor de Engelsmanplaat in 2004.

Tabel 3.3 Een overzicht van de gebruikte bodemdata voor het maken van representatieve jaren voor het Friesche Zeegat.

Rep. jaar	Kust	ETD	Bekken	Opmerkingen	
(1)	1926	1926-1927	1926-1927	1926-1927	kust opvullen met 1958
(2)	1948	1949/1950	1949/1950	1949/1950	kust opvullen met 1958
(3)	1958	1955-1960	1955-1960	1955-1960	Alles buiten de buitendelta = 1958
(4)	1967	1964-1968	1964-1968	1964-1968	ZKL – oostkant opvullen met 1967 +1971
(5)	1971	1970-1971	1970-1971	1970-1971	ZKL – oostkant opvullen met 1971 kust – oostkant opvullen met 1971
(6)	1975	1975	1975	1975	Zlaag – zuidoostpunt opvullen met 1967 kust - westzijde opgevuld met 1975 data
(7)	1979	1978-1979	1978-1979	1978-1979	Zlaag – opvullen zuidoostpunt 1981 data
(8)	1981	1981-1982	1981-1982	1981-1982	Zlaag – opvullen oostpunt 1975 – 1981 data opvullen oostpunt bekken (1987 data)
(9)	1987	1987	1987	1987	-
(10)	1991	1991/1989	1991	-	1989 – kustzone Ameland
(11)	1994	1994/1993	1994	1994	1993 – kustzone Ameland
(12)	1997	1997/1996	1997	-	1996 – kustzone Ameland
(13)	2000	2000/1999	2000	2000	1999 – kustzone Ameland
(14)	2002	2002	2002	-	-
(15)	2005	2005	2005	2005/2006	2006 - Zoutkamperlaag (oostzijde bekken)
(16)	2009	2009/2008	2009	-	2008 – kustzone Ameland
(17)	2012	2012/2011	2012	2012	2011 – kustzone Ameland
(18)	2015	2015/2014	2015	-	2014 – kustzone Ameland 2015/2014 – kusthoogte Engelsmansplaat

3.4 Bagger- en stortvolumes

De bagger- en stortvolumes in de Westelijke Waddenzee zijn gebaseerd op de resultaten van de studie van Elias (2018a). In deze studie zijn de getallen van Hoogervorst (2005) en Rakhorst (1982) gebruikt als basis. Elias concludeert dat er een inconsistentie tussen de 2 studies zit. In de periode tot 1980 zit er in de studie van Hoogervorst waarschijnlijk een overschatting van 29.5 Mm³ aan zandwinning. In het huidige rapport zijn daarom de waarden van Rakhorst gebruikt voor de periode tot 1980. In Tabel 3.4 worden de volumes voor zandwinning, bagger- en stortgegevens samengevat. De tabel is aangevuld met de waarden van Ameland en Friesche Zeegat gebaseerd op Hoogervorst (2005).

In de bagger en stortvolumes zijn de kustsuppleties niet meegenomen. Suppleties worden als extra term toegevoegd in de berekening. Een overzicht van de uitgevoerde suppleties is gebaseerd op de meest recente suppletie database. Deze database is op te vragen via:

<https://svn.oss.deltares.nl/repos/openearthrawdata/trunk/rijkswaterstaat/suppleties/raw/>

Tabel 3.5 geeft een overzicht van de volumes zoals gebruikt in deze studie. Het merendeel van de suppleties is na 1990 is uitgevoerd. Dit heeft tot gevolg dat de trendwaarde representatief voor de langetermijn veel lager uitvalt, dan die voor de huidige trend. Een vrijwel gelijk volume wordt immers over een langere periode gemiddeld.

Zeegat van Texel.

In het Zeegat van Texel is in de periode 1955 tot en met 2002 voortdurend gebaggerd en gestort. In hoofdzaak zijn de baggerhoeveelheden afkomstig uit de Marinehaven en de Veerhaven (beiden in Den Helder). In totaal is er hier 62 Mm³ gebaggerd en teruggestort in de Waddenzee. In het bekken is er nog een aanvullende 44 Mm³ gebaggerd en gestort. Hiervan is 21 Mm³ gebaggerd in de nabijheid van het zeegat (bijv. haven Oudeschild) en 22.5 Mm³ richting de Afsluitdijk. Tot 1982 is er in het Zeegat van Texel een hoeveelheid van 29.5 Mm³

aan zand onttrokken. Sinds 1979 is er respectievelijk 34.2 en 24.8 Mm³ gesuppleerd op de aanliggende kusten van Noord-Holland (km. 0-13) en zuidwest en midden Texel (km. 0-21).

Eierlandse Gat.

Bagger en stortvolumes in het Eierlandse Gat zijn relatief beperkt. Zand onttrekkingen ten behoeve van suppleties op de aanliggende kust van Texel hebben plaatsgevonden in de periode 1967-1985 waarbij er in totaal 11.5 Mm³ is gebaggerd. Daarnaast is er in de periode 1967-1980 3.9 Mm³ aan zand onttrokken voor de handel. Langs de eilandkust van Texel (vanaf km. 21 noordwaarts) is er sinds 1979 30.6 Mm³ gesuppleerd.

Vlie.

In verhouding tot Texel is het volume aan suppleties in het buitengebied van het Zeegat van het Vlie beperkt. Langs de noordwestkust van Vlieland (km. 40-54) is er 8.3 Mm³ gesuppleerd. Langs de kust van Terschelling is er in 1993 eenmalig 2.0 Mm³ aan zand aangebracht als onderdeel van een grootschalige studie (NOURTEC). Baggeren en storten vindt vooral plaats langs de zuidkust van Terschelling (in de vaargeulen naar de haven). Zandwinning heeft vooral tussen 1955 en 1980 plaatsgevonden. In totaal is er 20.5 Mm³ gewonnen. In de periode 1980-1999 heeft er geen winning plaatsgevonden. Vanaf 1999 is er nog 0.3 Mm³ aan zand gewonnen. Het merendeel van de zandwinning vond plaats in het gebied rond de Blauwe Slenk. Zo'n 3.5 Mm³ is gewonnen in (het verlengde van) de Boontjes, langs de kust van Friesland.

Amelander Zeegat

In het Amelander Zeegat is er 10.1 Mm³ gebaggerd en 9.4 Mm³ teruggestort. De overige 0.70 Mm³ is in het naastliggende Friesche Zeegat gestort. Door zandwinning is er in de periode van 1968 - 2002 in totaal 5.2 Mm³ onttrokken. In het bekken zijn kleine hoeveelheden gestort. Het gaat om totaal om 0.7 Mm³. Suppleties zijn aangebracht aan de Noordwest zijde van Ameland en langs de rechte eilandkust. In totaal gaat het hier om 34.8 Mm³. Een groot deel van deze suppleties is recentelijk (na 2010) uitgevoerd.

Friesche Zeegat

In de buitendelta Friesche Zeegat is beperkt gebaggerd en gestort (6.3 Mm³). Daarnaast heeft in 1980 een storting plaatsgevonden van 0.7 Mm³ met zand geleverd vanuit het Bornrif. Zandwinning was beperkt tot 0.1 Mm³ sinds 1974 (er zijn gegevens van vóór 1974). In het bekken is in de periode 1963-1980 3.1 Mm³ aan zand onttrokken.

Tabel 3.4 Een overzicht van de ingrepen (zandwinning, schelpenwinning, baggeren en storten) in de Waddenzee.

Locatie	Periode	Zandwinning [Mcm]	Schelpenwinning [Mcm]	Baggeren [Mcm]	Storten [Mcm]	
<u>Zeegat van Texel</u> <u>buiten</u> NH km.0 -13 Texel km. 0-21	1979-2017 1979-2017					
<u>Zeegat van Texel</u> <u>binnen</u> (A). Marsdiep (B). Malzwin (C). Boontjes	1948-2002 1955-1981 1960-1980	-29.5 -3.6	- - -	-61.8 -21.1 -22.5	+62.7 +21.1 +22.5	(1) (2)
<u>Eierlande Gat</u> <u>buiten</u> (km. 21 >) Eld dam	1979-1985 1985. 1995			-2.5		(3)
<u>Eierlande Gat</u> <u>binnen</u> (D). Molengat - -	1970-1976 1979-1985 1985-1995 1967-1980		-0.04	-9.0 -2.5 -3.9		(3)
<u>Vlie buiten</u> Vlie km. 40-54 Terschelling	1982-2001 1995-2017 1993			-0.1	+0.1	
<u>Vlie binnen</u> (E,F). Slenk - - (G). Schuitengat	1952-2002 1976-1980 1970-1980 1930-1955	-20.8	-0.5	-11.3	+0.006 +11.3	
<u>Ameland buiten</u>	1968-2015 1997-2015	-5.2		-10.1	9.4	
<u>Ameland binnen</u>	1997-2015			-0.1	0.8	
<u>Friesche Zeegat</u> <u>buiten</u>	1974-2015 1980-2015 1982-2015	-0.10		-6.3	7.0	
<u>Friesche Zeegat</u> <u>binnen</u>	1962-2015 1997-2015	-3.1		-0.41	0.4	
Totaal		-62.3	-0.54	-152.21	135.21	

(1). Baggeren en storten in gebied A en B., incl. havens op Texel en het Balgzand.

(2). Baggeren en storten bekken rond Afsluitdijk (C). (3). Zandwinning in Robbegat en storten op buitendelta

Tabel 3.5 Een overzicht van de zandsuppleties in volume (Mm³) en trend in Mm³/jaar uitgevoerd langs de kust van Noord-Holland en de eilandkusten van de verschillende zeegaten.

Volume in Mm ³		1935-2019	1990-2019	2000-2019	2010-2019
Texel	Noord-Holland	34.16	30.24	27.52	12.85
	Texel	24.76	24.76	19.97	11.01
Eierlandse Gat	Texel	30.55	21.59	12.88	2.20
	Vlieland				
Vlie	Vlieland	8.34	7.87	5.46	2.64
	Terschelling	0	0	0	0
Ameland	Terschelling	0	0	0	0
	Ameland	34.79	32.29	25.37	18.09
Friesche Zeegat	Ameland*	0	0	0	0
	Schiermonnikoog	0	0	0	0
Trend in Mm ³ /jaar		1935-2019	1990-2019	2000-2019	2010-2019
Texel	Noord-Holland	0.41	1.04	1.45	1.43
	Texel	0.29	0.85	1.05	1.22
Eierlandse Gat	Texel	0.36	0.74	0.68	0.24
	Vlieland	0.00	0.00	0.00	0.00
Vlie	Vlieland	0.10	0.27	0.29	0.29
	Terschelling	0.00	0.00	0.00	0.00
Ameland	Terschelling	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ameland	0.41	1.11	1.34	2.01
Friesche Zeegat	Ameland	0.00	0.00	0.00	0.00
	Schiermonnikoog	0.00	0.00	0.00	0.00

3.5 Bodemdalingsgegevens

In het zandbalansmodel worden de berekende volumetrends gecorrigeerd voor bodemdaling. Als schatting voor deze daling worden de waarden zoals berekend door Hijma en Kooi (2018a,b) gebruikt. De waarden hiervan zijn in Tabel 3.6 gegeven. De schattingen over de periode 1917-2017 zijn gebruikt om de lange-termijn volumeverandering te corrigeren. De periode 1987-2017 is als representatief gesteld voor de huidige trends.

Tabel 3.6 Een overzicht van de bodemdalingsgegevens voor lange-termijn (1917-2017) en huidige trend (1987-2017)

Zeegat	Periode : 1917-2017 ^(a)				Periode : 1987-2017 ^(b)			
	Kust		Bekken		Kust		Bekken	
	Mm ³	Mm ³ /jaar	Mm ³	Mm ³ /jaar	Mm ³	Mm ³ /jaar	Mm ³	Mm ³ /jaar
Texel	22.3	0.22	39	0.39	6.9	0.23	11.8	0.39
Eierlandse Gat	13.7	0.14	8.8	0.09	4.2	0.14	2.7	0.09
het Vlie	19.4	0.19	41.8	0.42	6.6	0.22	13.8	0.46
Ameland	18.5	0.19	17.6	0.18	5.9	0.20	6.1	0.20
Friesche Zeegat	29.9	0.30	15.2	0.15	17.3	0.58	9.2	0.31

(a) Hijma, M., Kooi, H., (2018b), zie pagina 45. Tabel 3.3.

(b) Hijma, M., Kooi, H., (2018b), zie pagina 46. Tabel 3.4.

3.6 Een schatting van de langtransporten

Figuur 3.1 en Tabel 3.7 geven een overzicht van gerapporteerde waarden voor de langtransporten die langs de Waddenkust optreden. Deze transporten zijn representatief voor de kustzone tot ongeveer de -20m NAP lijn. Wat opvalt is dat de verschillende studies een grote spreiding in langtransportwaarden geven. Gedeeltelijk zal die spreiding te maken hebben met de gebruikte rekenmethode, maar ook de exacte locatie waar de transporten berekend worden is van belang. Zo geeft de studie van Van Rijn (1995) een waarde van 0.385 Mm³/jaar als schatting voor de langtransporten nabij Callantssoog. Dit transport neemt toe tot 0.5 Mm³/jaar op de buitendelta nabij Den Helder.

Ook de langtransporten langs de eilandkust van Texel lijken gedomineerd te worden door een grote transportgradiënt langs het eiland. Ter hoogte van de Noorderlijke Uitlopers van de Noorderhaaks bevindt zich een divergentiepunt in de langtransporten. Transporten ten zuiden hiervan zijn richting het Zeegat van Texel gericht en ten noorden hiervan zijn ze noordwaarts gericht (Cleveringa, 2001; Elias en van der Spek, 2017). Op het midden van het eiland (nabij B) geeft Steijn (1997) een schatting van 0.30 Mm³/jaar. Deze waarde komt goed overeen met de waarde van 0.25 Mm³/jaar vanuit de studie van Rakhorst en Pwa (1993). Beide studies geven een grote toename van de langtransporten richting het Eierlandse Gat. Ten zuiden van de Slufter worden de transporten geschat op een 0.25 Mm³/jaar. Ter plaatse van km. raai 26 is het netto langtransport 0.47 Mm³/jaar en ter plaatse van km. raai 30 is dit al verder toegenomen tot 1.73 Mm³/jaar.

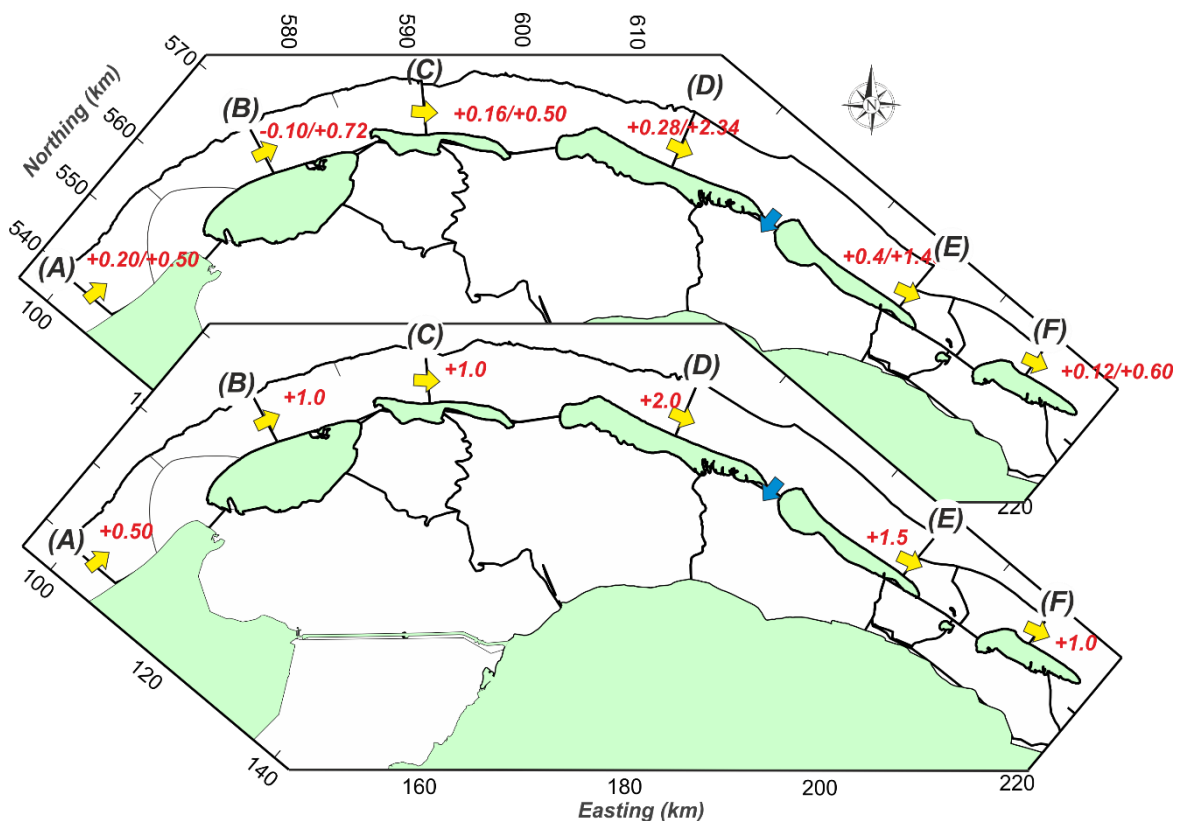
De methode gebruikt om de transporten te berekenen lijkt een belangrijke rol te spelen in de geobserveerde spreiding in voorspelling. De studie van Ridderinkhof (2016) geeft een schatting van de golfgedreven transporten door gebruik te maken van de CERC formule en informatie van de verschillende golfboeien. Over het algemeen nemen de transporten in oostelijke richting toe. Transporten nabij het Zeegat van Texel variëren tussen de -0.3 en +0.1 Mm³/jaar. Bij Eierland ligt het transport op -0.1 Mm³/jaar in zuidelijke richting. Dit transport lijkt onrealistisch gezien de waarden gevonden in eerdere studies. Langs Vlieland neemt het golfgedreven transport toe tot 0.3-0.5 Mm³/jaar en tot 0.8-1.2 Mm³/jaar nabij Terschelling. Een maximum transport van 1.4 Mm³/jaar wordt gevonden bij Ameland. Deze toename van de golfgedreven transporten is op zich wel logisch. Door de kromming van de kust dragen steeds meer golven bij aan een oostwaarts gericht transport en minder aan het westwaarts transport.

De langtransporten zoals gerapporteerd in de literatuur zijn significant kleiner dan een schatting op basis van de voorlopige Kustgenese 2 modelresultaten. Op basis van een realistische simulatie, een simulatie geforceerd met de waterstanden op de Noordzee en het gemeten wind- en golfklimaat van 2017, wordt een langtransport berekend van 2.34 Mm³/jaar langs de kust van Terschelling en 1.48 Mm³/jaar langs de kust van Ameland. Dit grote verschil tussen de transporten op deze twee eilanden, en het verschil met de eerdere studies roept wel de vraag op waar dit verschil vandaan komt. De studie van Ridderinkhof laat zien dat het golfklimaat op zich, geen verklaring geeft voor deze verschillen. De transporten bij Terschelling en Ameland zijn in zijn analyse vrijwel gelijk (1.2 versus 1.4). Een gevoeligheids simulatie van het Kustgenese 2 model met alleen getij als forcering geeft ook geen directe verklaring. De getijgedreven transporten zijn veel kleiner; respectievelijk 0.26 Mm³/jaar langs Terschelling en 0.02 Mm³/jaar bij Ameland. Deze getijsimulatie geeft ons echter wel twee belangrijke inzichten: (1) Getij is niet het dominante transportmechanisme en (2) er is een orde grootte verschil in netto getijgedreven transport op Terschelling versus Ameland.

Het combineren van bovenstaande inzichten leidt tot de hypothese dat de invloed van getij-golf interactie tot op heden niet goed is onderzocht en meegenomen in de zandtransport

voorspellingen. Golven drijven niet alleen direct een golfgedreven transport aan, maar opwoeling van sediment door de golven, zorgt er ook voor dat er meer sediment beschikbaar is, dat door de getijstrooming kan worden getransporteerd. Doordat de asymmetrie van het getij, hier gedefinieerd als de verhouding tussen de bruto oostelijk en westelijk gerichte stroming en transport, veel groter is langs de kust van Terschelling dan langs de kust van Ameland, nemen ook de totale transporten hier significant toe. Dit verschil is veel groter dan dat puur op basis van het golfklimaat zou worden gevonden. In alle voorgaande studies is deze bijdrage door getijasymmetrie waarschijnlijk niet direct meegenomen in de berekeningen of onderschat.

Als initiële schatting voor de maximale langtransporten die kunnen optreden gebruiken wij in deze studie daarom de verdeling zoals weergegeven in de onderste deelfiguur van Figuur 3.1. Het is wel duidelijk dat hier nog aanvullend onderzoek is vereist.



Figuur 3.1 Een schatting van de langtransporten op basis van literatuur (boven) en de waarden gebruikt in deze studie.

Tabel 3.7 Een overzicht van de langtransporten op basis van verschillende studies.

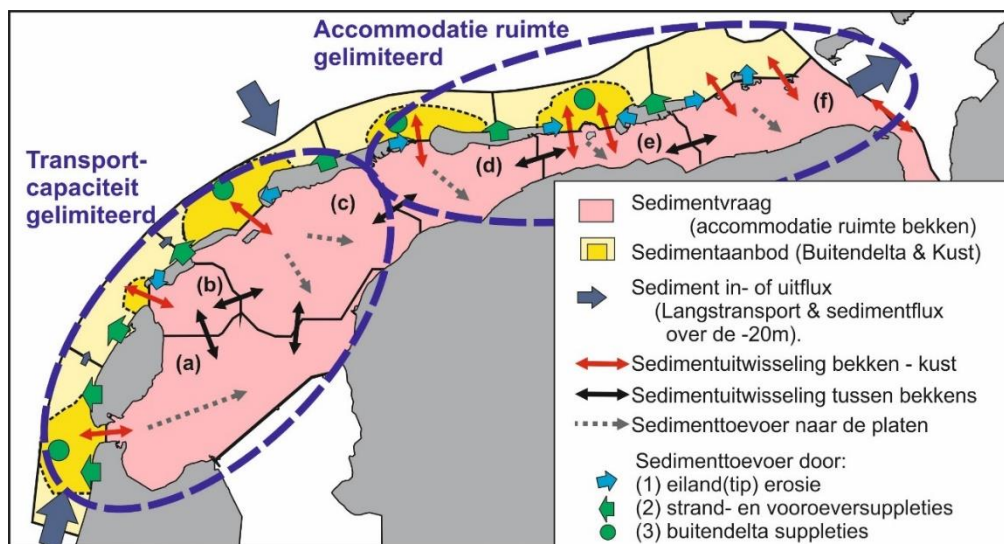
Studie	A. NH-kust	B. Texel	C. Vlieland	D. Terschelling	E. Ameland	F. Schier.
Kustgenese 2.0 (2019)	-	-	-	2.34	1.48	-
Ridderinkhof (2016)⁽¹⁾	-0.3 – 0.3	-0.100	0.3-0.5	0.8-1.2	1.4	
Van Rijn (1995)	0.385 – 0.50	-	-	-	-	-
Steijn (1997)	0.210	0.30 – 0.50				
Rakhorst en Pwa (1993)		0.25				
Spanhoff et al. (1997)				1.0		
Stive en Eysink (1989)	0.35-0.42	0.60-0.72	0.16-0.19	0.28-0.34	0.40-0.48	0.12-0.15
Tanczos et al. (2001)	0.20-0.30	0.20-0.30	0.40-0.50	0.50-0.60	0.50-0.60	0.50-0.60
Bandbreedte eerdere studies	0.20-0.50	-0.1-0.72	0.16-0.5	0.28-2.34	0.40-1.48	0.12-0.60
Gebruikte Schatting	0.50	1.00	1.00	2.00	1.50	1.00

4 Methode en bepaling van de winst- en verliesposten in het zandbalansmodel

4.1 Methode

4.1.1 Een conceptueel zandbalansmodel

De 'klassieke' methode van het bepalen van de zandbalans bestaat uit het in kaart brengen van de erosie- en sedimentatievolumes die binnen een vast balansgebied optreden. Hierop kan dan een correctie worden toegepast voor extra zandverliezen of toevoegingen zoals door bodemdaling, zandsuppleties en zandwinning. Deze methode is o.a. toegepast in de eerdere studies van Walburg (2001) en Elias et al. (2012). In deze studies werd het effect van bodemdaling niet rechtstreeks in de volumes verwerkt. Dit laatste is wel gedaan in de studie van Wang et al. (2018).



Figuur 4.1 Schematisch overzicht van de elementen, sedimentbron en -verlies termen en uitwisseling tussen het zanddelend systeem van de Waddenzee. ETD staat voor ebb-tidal delta ofwel buitendelta. De bekkens zijn respectievelijk: Zeegat van Texel ofwel Marsdiep (a), Eierlandse Gat (b), Zeegat van het Vlie (c), Zeegat van Ameland (d), het Friesche zeegat (e) en het Groninger Wad en Eems estuarium. De Westelijke Waddenzee (a,b,c) is hier beschreven als een transport gelimiteerd systeem: de jaarlijkse sediment import is onafhankelijk van de beschikbare accommodatie ruimte. De Oostelijke Wadden Sea (d,e,f) is accommodatie-ruimte gelimiteerd. Er is weinig accommodatie ruimte voor sediment depositie met een kleine netto sedimentimport als gevolg.

In deze studies werden de afzonderlijke bekkens, kombergingsgebieden, apart beschouwd. De eventuele uitwisseling tussen de bekkens word hierin dan niet expliciet meegenomen. Dat deze aanname eigenlijk niet geldig is, is wel bekend, maar het is niet per definitie een probleem. Als we puur naar de volumeveranderingen per deelgebied kijken en onder de aanname dat de geobserveerde trends zich ook in de toekomst doorzetten, dan maakt het in essentie niet uit waar het sediment vandaan komt. Wat we observeren geeft een beeld van de toekomst. Het probleem in de Waddenzee is echter dat de volumeveranderingen zoals geobserveerd in het verleden waarschijnlijk niet de juiste trend geven voor de toekomst. Zo is de volumeverandering in met name de Westelijke Waddenzee gedomineerd door de effecten van de afsluiting van de Zuiderzee. Deze effecten dempen langzaam uit en zullen in de toekomst dan ook niet meer of

in veel mindere mate te zien zijn. Om een betrouwbare voorspelling voor de toekomstige sedimentbehoefte te verkrijgen is het daarom een noodzaak om de achterliggende processen verantwoordelijk voor de volumeveranderingen veel beter te begrijpen. Dit betekent dat we het sediment-delend systeem, zoals bijvoorbeeld conceptueel beschreven in Figuur 4.1, zowel kwalitatief als kwantitatief beter moeten invullen.

Een geschematiseerde weergave van het sediment-delend systeem wordt gegeven in Figuur 4.2 en vormt de basis voor het zandbalansmodel zoals gebruikt in deze studie. De Waddenzee en de kustzone wordt hierin nog steeds onderverdeeld in de afzonderlijke kombergingsgebieden en bijbehorende kust polygonen van de zeegaten (bovenste figuur). De reden hiervoor is dat deze gebieden ruwweg overeenkomen met de opname van de bodemdata en zo de best mogelijke dekking per jaar geeft zonder al te veel interpolaties.

De kombergingsgebieden zijn hier wel gebaseerd op de ligging van de huidige wantijen. Deze ligging volgt Elias (2018a,b) en wijkt dus af van de polygonen die o.a. gebruikt zijn in Elias et al. (2012) en Wang et al. (2018). Metingen van de kweldergebieden van het Friesche Wad, Wierumer Wad en Groninger Wad (zie Figuur 2.2) zijn slechts beperkt aanwezig. Deze gebieden zijn niet meegenomen in de volumebepalingen en zullen als extra verliespost moeten worden toegevoegd. In de kustzone gebruiken we het midden van de “rechte” eilandkusten als scheiding tussen de zeegaten. De polygoon Marsdiep heeft zijn zuidelijke grens ruwweg ter hoogte van Callantsoog, ruim ten zuiden van de buitendelta. Aan de Noordzee-zijde is de exacte begrenzing enigszins bepaald door de aanwezige bodemdata. Er is getracht een zo volledig mogelijke dekking te verkrijgen. Langs de Westelijke Waddenzee ligt die begrenzing op ruwweg de -20 m contour. Een analyse van deze -20 m contour laat zien dat die in zowel de oudste (1933) als de nieuwste bodem (2015) qua ligging goed overeenkomt (Elias, 2018a). De -20 m NAP contour geeft ons een goede databeschikbaarheid en omvat alle dominante bodemveranderingen die op de buitendelta's optreden. In de Oostelijke Waddenzee is het diepere deel van de vooroever slechts beperkt aanwezig. Hier volgt kustpolygoon ongeveer de -15 m contour om beter aan te sluiten op de beschikbare meetdata (Elias, 2018b).

Het conceptueel model geeft ons een samenvatting van alle winst- en verliesposten per zeegat, als we deze uitwerken kunnen we de zandimport of -export in de zeegaten (blauwe pijlen) uitrekenen. Dit is voor 1 zeegat in detail uitgewerkt in de onderste 2 deelfiguren van Figuur 4.2. Als we alle pijlen kunnen invullen dan volgt de zandimport of -export door het zeegat. Eigenlijk vormt de kust + bekken een zand-delend systeem, maar in onze uitwerking is de winst- en verliesrekening voor zowel het gecombineerde systeem, alsmede het kust en bekken apart op te stellen. Door zowel vanuit de kust als het bekken de mogelijk import of export te berekenen geeft dit een extra controle op de getallen. Als de getallen significant afwijken dan weten we dat we de onderliggende aannamen en berekeningen kritisch moeten controleren.

De gemeten bodemverandering in de kustzone (dV_K) is in principe een simpele optelsom van de verschillende winst- en verliesposten zoals samengevat in onderstaande vergelijking:

$$dV_K = (dV_{SUB} + dV_{SUB_GAS/ZOUT}) + V_{IN} - V_{UIT}$$

met

$$V_{IN} = V_{LT_IN} + V_{DT_IN} + V_{STORTEN} + V_{SUPPELTIES}$$

$$V_{UIT} = V_{ZG} + V_{LT_UIT} + V_{DT_UIT} + V_{DUIN} + V_{BAGGEREN} + V_{ZANDWINNING} + V_{SCHELPEWINNING}$$

Hierin is:

dV_K	= gemeten volumeverandering van de kustzone.
dV_{SUB}	= subsidence of bodemdaling in het betreffende deel van het kustvak. Deze bestaat uit de natuurlijke bodemdaling, maar ook de extra bijdragen door o.a. de winning van gas en zout ($dV_{SUB, GAS/ZOUT}$).
V_{ZG}	= netto transport door het zeegat (in of uit).
$V_{LT,IN/UIT}$	= netto langstransport balansgebied in of uit.
$V_{DT,IN/UIT}$	= netto dwarstransport balansgebied in of uit.
V_{DUNE}	= volumeverlies naar de duinen.
$V_{STORTEN}$	= volumetoename door storten van sediment.
$V_{SUPPELTIES}$	= volumetoename door uitgevoerde suppleties.
$V_{BAGGEREN}$	= volumeverlies door baggeren van sediment.
$V_{ZANDWINNING}$	= volumeverlies door zandwinning.
$V_{SCHELPEWINNING}$	= volumeverlies door schelpenwinning.

In het bekken kan de balans worden geschreven in de vorm:

$$dV_B = (dV_{SUB} + dV_{SUB, GAS/ZOUT}) + V_{IN} - V_{UIT}$$

met

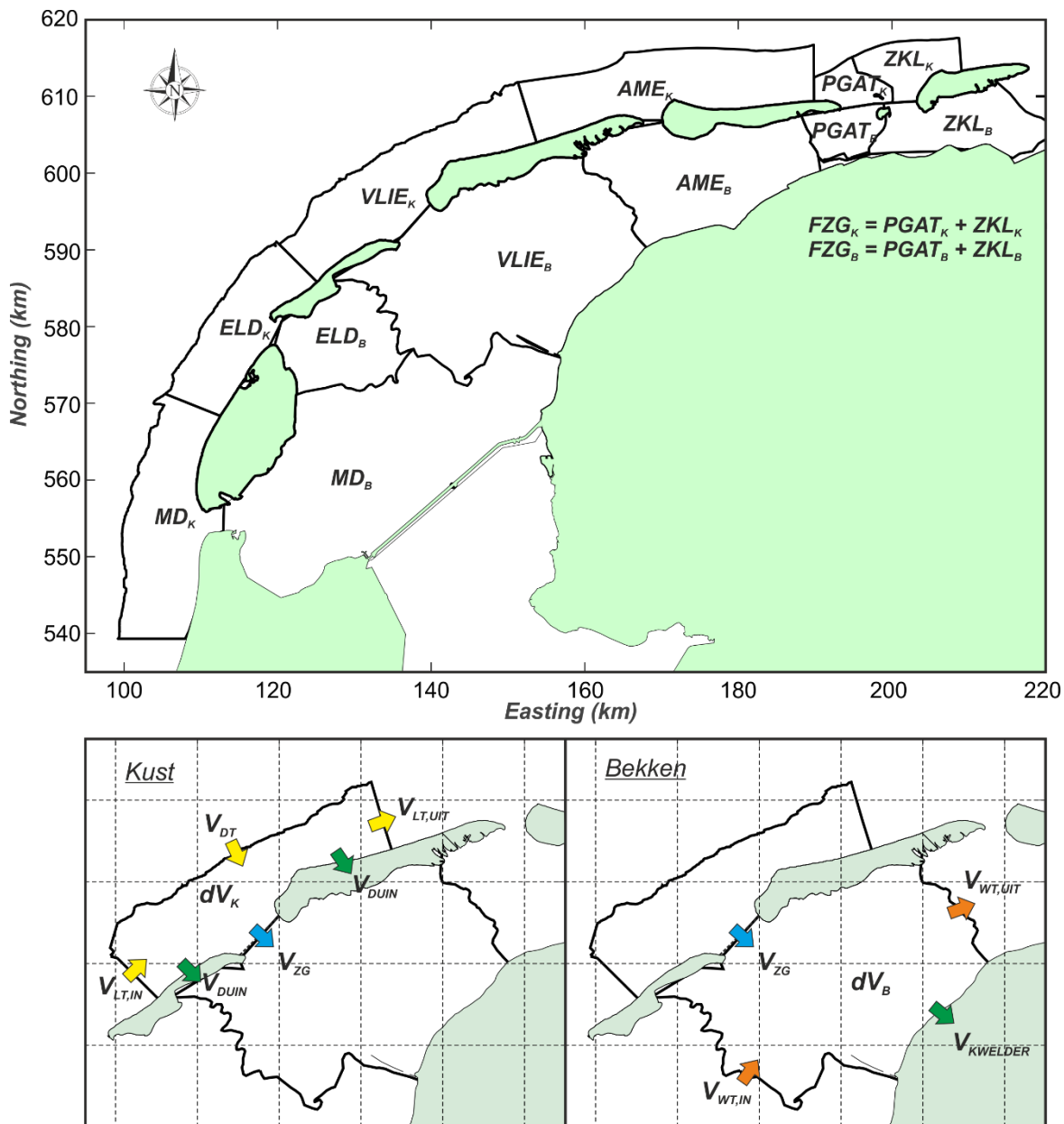
$$V_{IN} = V_{ZG} + V_{WT,IN} + V_{STORTEN}$$

$$V_{UIT} = V_{WT,UIT} + V_{BAGGEREN} + V_{ZANDWINNING} + V_{SCHELPEWINNING} + V_{KWELDER}$$

Hierin is:

dV_B	= gemeten volumeverandering van het bekken.
dV_{SUB}	= subsidence of bodemdaling in het betreffende deel van het kustvak. Deze bestaat uit de natuurlijke bodemdaling, maar ook de extra bijdragen door o.a. de winning van gas en zout.
V_{ZG}	= netto transport door het zeegat (in of uit).
$V_{WT,IN / UIT}$	= netto transport (in of uit) over de wantijen.
$V_{STORTEN}$	= volumetoename door storten van sediment.
$V_{SUPPELTIES}$	= volumetoename door uitgevoerde suppleties.
$V_{BAGGEREN}$	= volumeverlies door baggeren van sediment.
$V_{ZANDWINNING}$	= volumeverlies door zandwinning.
$V_{SCHELPEWINNING}$	= volumeverlies door schelpenwinning.

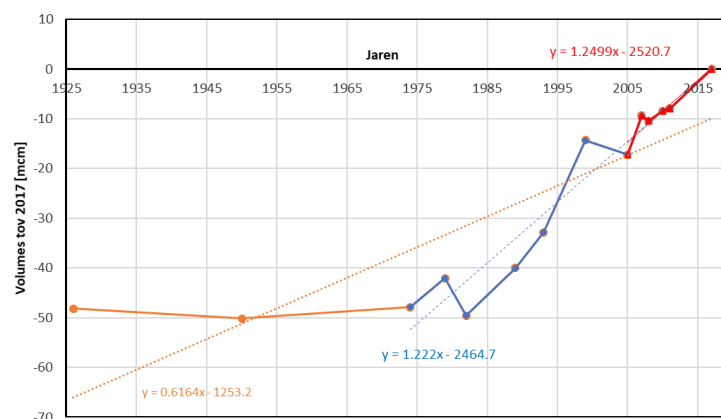
Het doel van deze studie is niet het oplossen van de slibbalans van de Waddenzee, daarvoor is deze studie niet toereikend. De focus ligt hier op de zanduitwisseling tussen de kustzone en de Waddenzee. De volumeveranderingen in de kustzone zijn voornamelijk zand. In het bekken bestaat de volumeverandering zowel uit zand als slib. In onze uitwerking corrigeren we voor slib door aannamen te maken van het % slib dat in het berekende volume zit. In de basis uitwerking gaan we uit van 0% slib m.a.w. de geobserveerde volumeverandering is de zandvolumeverandering. Daarnaast gebruiken we een reductie van de bekkenvolumes met 8% en 20% als schatting voor het volumeaandeel slib. Deze percentages zijn gebaseerd op de studie van Oost et al. (2018), waarin een aandeel tussen de 8 en 37% werd benoemd. De consensus van een expert meeting is dat 37% aan de hoge kant is. Als hoogste schatting gebruiken we daarom 20%.



Figuur 4.2 Conceptuele beschrijving van de parameters in het zandbalansmodel. Boven: indeling van de Waddenzee in kombergingsgebieden en kustpolygoonen. Onder, schematische weergave van de elementen per kombergingsgebied (rechts) en kustpolygoon (links).

4.1.2 Trendlijnanalyses van de geobserveerde volumeveranderingen

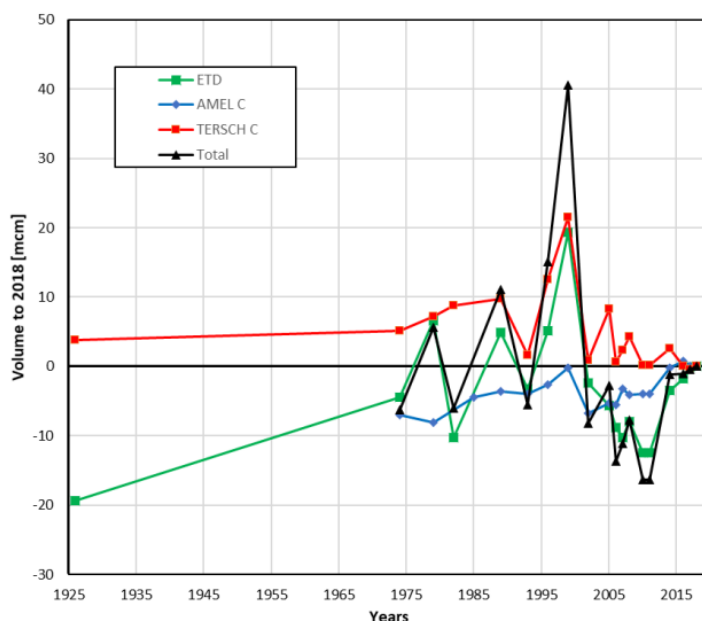
De belangrijkste termen in het zandbalans model zijn de volumeverandering per zeegat voor de deelpolygoon van de kust en bekken (dV_c en dV_b). In de eerdere studies (Elias et al. 2012, Wang et al. 2018) werden deze twee termen berekend door de totale volumeverandering te delen door de tijd. In deze studie gebruiken we hiervoor trendlijnanalyses. De methode die hierin gevolgd wordt volgt de beschrijving van Elias (2018a). Hierbij worden de bekken en kustpolygoon ingedeeld in kleinere deelpolygoon die de karakteristieke deelgebieden van het bekken en de kust beschrijven. Voor iedere deelpolygoon worden de volumes per representatief jaar bepaald. Dit resulteert in een tijdserie van volumeontwikkeling; zie Figuur 4.3 als voorbeeld, waarvan de trendlijnen over verschillende tijdsintervallen worden bepaald. Een voordeel van deze trendlijnanalyse is dat eventuele fouten of fluctuaties in individuele metingen niet direct de trendlijnwaarde significant beïnvloeden. We corrigeren de individuele volumes dus niet voor eventuele meetfouten, maar onze aanname is dat meetfouten de trendwaarde niet significant beïnvloeden. Hierbij wel de opmerking dat bij het opstellen van de bodems er wel degelijk goed gekeken is naar uitschieters of onrealistische punten. Deze zijn al uit de bodems verwijderd.



Figuur 4.3 Een voorbeeld van de trendlijnanalyse voor het totale bekken van het Zeegat van Ameland.

De in Figuur 4.3 getoonde tijdserie vertoont het volumeverloop van het bekken van het Zeegat van Ameland. De 3 trendlijnen geven de trends bepaald over verschillende perioden. Alhoewel deze trends in principe objectief te bepalen zijn door het gebruik van vaste perioden, is de uiteindelijke uitwerking niet triviaal. De schatting van de huidige trend is in dit voorbeeld zonder veel onzekerheid te maken. Zowel voor de meest recente metingen als over de middellangetermijn (in dit geval sinds 1975) worden vrijwel gelijke trendwaarden van $+1.2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ sedimentatie gevonden. Het afwijkende volume in de 1997 meting lijkt te duiden op een meeton nauwkeurigheid.

De trendwaarde voor de lange-termijn vertoont echter een grote onzekerheid. Op langetermijn halveert de trend tot $0.62 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ t.o.v. de huidige trend. Deze halvering komt echter alleen doordat de volumes over de periode 1925-1975 vrijwel onveranderd zijn gebleven. De vraag is echter wel of deze ontwikkeling klopt. Deze 2 metingen zijn de oudste metingen in de dataset met waarschijnlijk de grootste onzekerheid. Het is hier de vraag of de langetermijntrend beter geschat wordt door de trend over de periode 1974-2015 te nemen of door die van de periode 1925-2015 te nemen. Deze afweging zal voor elke trendlijn op basis van expert-judgement genomen moeten worden. In de samenvattende tabellen wordt daarom een extra kolom "beste schatting" toegevoegd. Deze kolom geeft onze inschatting van de beste trend voor het huidige gedrag.



Figuur 4.4 Netto volumeveranderingen t.o.v. 2018 in de kustpolygoon van Ameland. De volumes zijn opgesplitst in buitendelta (ETD), kustzone Ameland (AMEL C) en kustzone Terschelling (TERSCH C).

Bovenstaande methode werkt goed voor de Westelijke Waddenzee waar duidelijk waarneembare trends per deelgebied optreden (Elias et al., 2018a). In de Oostelijke Waddenzee is de methode minder efficiënt. Hier zijn de volumeveranderingen grilliger met veel kleinschaligere gebieden van sedimentatie en erosie (Elias et al. 2018b). De trendlijnanalyse is nauwkeurig en goed uit te voeren als er een continue, dominante trend aanwezig is, maar is minder geschikt als de volumeveranderingen grote fluctuaties vertonen. Deze fluctuaties zijn niet per definitie fout. Het kunnen zowel natuurlijke trends zijn (bijv. het meanderen van geulen), maar gedeeltelijk zijn het zeker ook data onnauwkeurigheden. Als voorbeeld is hier de netto volumebalans van de kustzone van Ameland toegevoegd (Figuur 4.4). Door de grote fluctuaties is het vrijwel onmogelijk hier een betrouwbare trendwaarde te bepalen. Om de onzekerheid te verkleinen worden er voor de Oostelijke Waddenzee aanvullende trendlijnanalyses uitgevoerd. Deze aanvullende analyses gebruiken niet de netto veranderingen, maar de instantane bruto veranderingen als basis. Figuur 4.5 geeft een voorbeeld van de methode. In deze figuur worden de gemeten instantane netto volumeveranderingen weergegeven door de zwarte lijn, de totale sedimentatievolumes door de blauwe lijnen en de totale erosievolumes zijn rood. Wat hierbij duidelijk naar voren komt is dat de kleine netto volumeverandering in de periode 1926-1950 juist het resultaat is van grote bruto veranderingen. De trendlijnen van deze (cumulatieve) bruto veranderingen vertonen een veel duidelijker verloop dan de netto waarde. Hierdoor is de trendlijn van de bruto verandering met meer zekerheid te bepalen (zie Figuur 4.5b en waarde B in tabel 4.1). Daarnaast is het mogelijk uitschieters of “onnauwkeurigheden” te identificeren. Hierbij wordt opgemerkt dat een trendlijnanalyse van de zwarte lijn gelijk is aan de oorspronkelijke methode zoals gehanteerd voor de Westelijke Waddenzee (waarde A in de tabel).

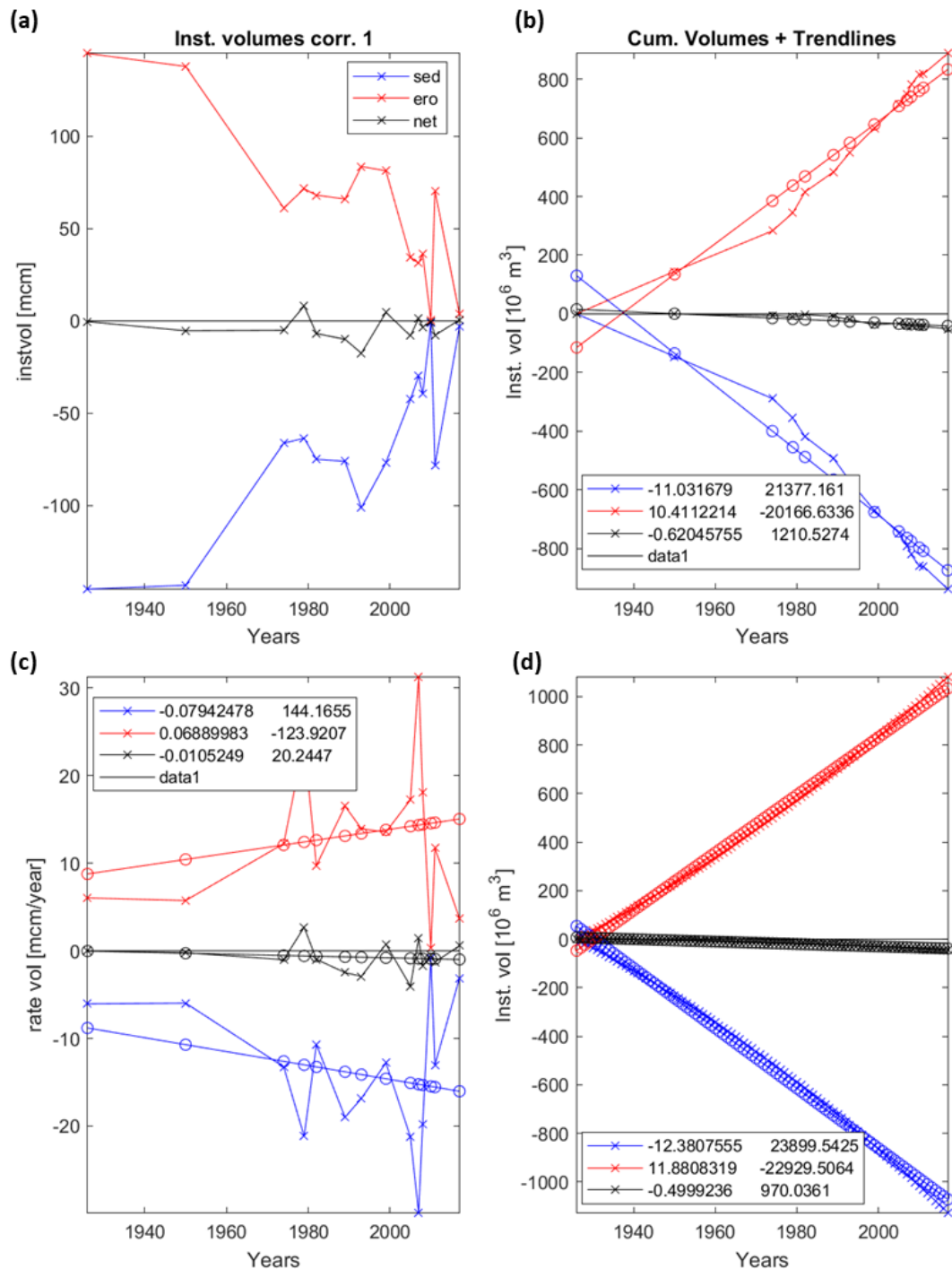
In Figuur 4.5c is dit nog iets verder uitgewerkt. Hier zijn de instantane volumeveranderingen teruggerekend naar een veranderingssnelheid per jaar. Voor de afzonderlijke sedimentatie en erosiesnelheden wordt hiervan de trend bepaald. Met behulp van deze trends worden dan de volumes en cumulatieve volumes opnieuw uitgerekend (Figuur 4.5d) en de trendlijnwaarden nogmaals bepaald. Dit geeft waarde C in onze tabel.

De instantane veranderingssnelheid (Figuur 4.5c) geeft een zeer duidelijk beeld van de uitschieters in de dataset. De volledige berekening wordt daarna nogmaals uitgevoerd op een gecorrigeerde tijdserie waarin de (extreme) uitschieters niet worden meegenomen (Figuur 4.6). Dit geeft ons waarde D en E in onderstaande (Tabel 4.1). In deze tabel zijn de berekeningsmethode voor waarde B – D, en C - E gelijk. Het enige verschil is hier het wel (B,C) of niet (D,E) meenemen van de extreme uitschieters. In totaal geeft ons dit 5 schattingen van de trend per deelpolygoon. De trends worden samengevat in een aanvullende tabel en gelabeld als trends A-E:

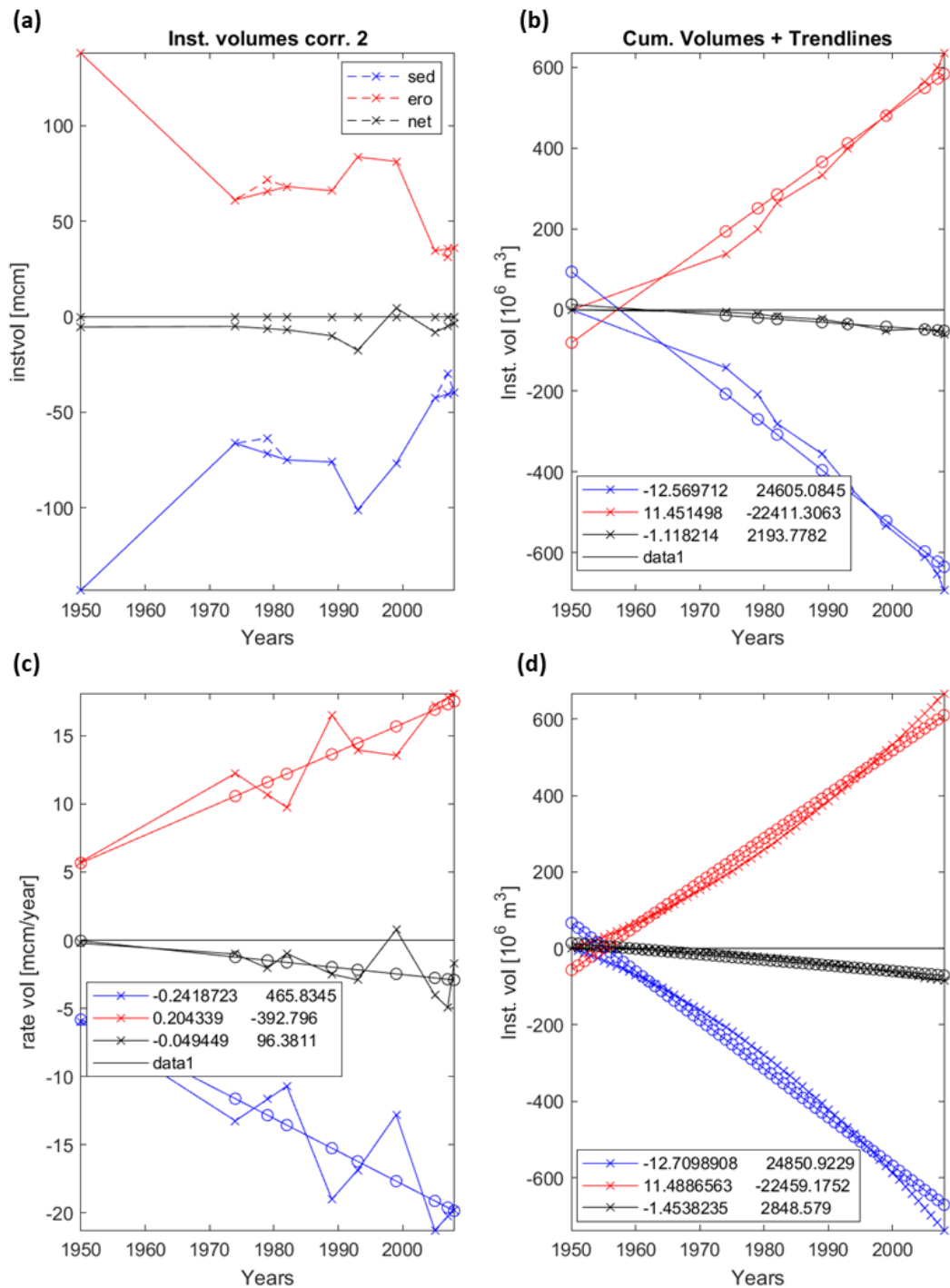
Tabel 4.1 Overzicht van de verschillende trendwaarde berekeningen.

Methode	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	trend [Mm³/jaar]
Uitleg	Trendlijn gemeten cumulatief netto volume t.o.v. eindjaar (Figuur 4.5a)	Trendlijn gemeten instantaan bruto volume (Figuur 4.5b)	Trendlijn cumulatief berekend uit trendlijn instantane bruto volumes (Figuur 4.5d)	Idem aan B maar met correctie van "onrealistische" trends (Figuur 4.6b).	Idem aan E maar met correctie van "onrealistische" trends (Figuur 4.6d).	Gekozen waarde (expert judgement)

De uiteindelijk gekozen trend is gebaseerd op expert judgement, waarbij het uitgangspunt is dat we waar mogelijk de trend kiezen met de minste correctie. De verschillen in trendlijn waarden tussen de methode A - E geeft ons een mate van onzekerheid. Geven alle analyses ongeveer gelijke waarden, dan hebben we veel vertrouwen in de trend; blijkbaar zijn er dan weinig uitschieters/fluctuaties. Wijken de trends significant af, dan is er een grotere onzekerheid. Over het algemeen vertonen de bruto en netto volumes hier dan grote, onrealistische schommelingen en kiezen we voor de gecorrigeerde trendlijnen (C of E) als beste trend.



Figuur 4.5 Een voorbeeld van de aanvullende trendlijnanalyse, met (a) geobserveerde instantane volumeverandering voor sedimentatie (blauw), erosie (rood) en de netto verandering (zwart), (b) berekende cumulatieve veranderingen en trendlijnen op basis van a, (c) de instantane snelheden van volumeverandering (dV/dt) en trendlijnen van deze snelheden, (d) de berekende bruto en netto volumeverandering op basis van de trendlijnen uit c.



Figuur 4.6 Een voorbeeld van de aanvullende trendlijnanalyse, gecorrigeerd voor "extreme" uitschieters, met (a) geobserveerde instantane volumeverandering voor sedimentatie (blauw), erosie (rood) en de netto verandering (zwart), (b) berekende cumulatieve veranderingen en trendlijnen op basis van a, (c) de instantane snelheden van volumeverandering (dV/dt) en trendlijnen van deze snelheden, (d) de berekende bruto en netto volumeverandering op basis van de trendlijnen uit c.

4.2 Berekende trends in de Westelijke Waddenzee

4.2.1 Trends in de kustzone

Als basis voor de Westelijke Waddenzee gebruiken we de polygoon zoals afgeleid in de studie van Elias (2018a) en weergegeven in Appendix B, Figuur B.1. Op basis van deze polygoon worden de trendlijnen berekend voor de lange termijn (1933-2015), de middellange termijn (1991-2015) en de huidige trends (1997-2015). Het jaar 1991 is gebruikt als beginjaar voor de middellange termijn, omdat er een meeton nauwkeurigheid geconstateerd is in de bodems opgenomen rond 1985. Door 1991 als beginbodem te nemen voorkomen we dat deze foute waarde de resultaten beïnvloedt. De berekende waarden worden weergegeven in Appendix B, Tabel B.1 en samengevat in Tabel 4.2 en Figuur 4.7. Doordat de trendwaarden over vaste intervallen bepaald worden, wijken deze enigszins af van de waarden zoals gegeven in Elias (2018a). Over de gehele periode zijn deze verschillen beperkt. De trendwaarde van de gehele kustzone van de Westelijke Waddenzee van $-8.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ berekend in deze rapportage komt goed overeen met de waarde van $-8.5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ berekend in de 2018 studie. De recente trends geven een vergelijkbare waarde van $-6.1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Tabel 4.2 Samenvatting van de trendwaarden per kustpolygoon. Voor Lange Termijn (LT), Middellange Termijn (MT) en Huidige Trend (HT)

Kust polygoon	Trends [Mm^3/jaar]		
	LT 1933 - 2015	MT 1991 - 2015	HT 1997 - 2015
MD	-4.73	-3.21	-1.93
ELD	-0.78	-1.14	-0.32
Vlie	-2.48	-3.61	-3.85
Totaal	-7.99	-7.96	-6.10

Zeegat van Texel / Marsdiep

In Figuur 4.7 zijn de volumeontwikkelingen samengevat. Voor de interpretatie zijn hier de detailpolygoon terug gegroepeerd in grotere representatieve gebieden. Op de lange termijn (A) overheerst erosie in het deelgebied Marsdiep. Alleen het zuidelijke (zeewaartse deel van de buitendelta) neemt in volume toe. Zowel de buitendelta en de kustzones verliezen hier sediment. Deze erosie neemt wel sterk af van $-4.73 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ voor de langetermijntrends tot $-1.93 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ voor de huidige (1997-2015) trends. De grootste verschillen doen zich eigenlijk voor in de hoofdgeulen. Deze werden initieel veel dieper, maar tegenwoordig zijn deze stabiel. Het zuidelijke deel van de buitendelta vertoont sinds 1991 vrijwel geen verandering. De trend over de periode 1997-2005 van $-1.93 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ komt goed overeen met de schatting van $-2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ uit Elias en Van der Spek (2017). In deze studie werd geconcludeerd dat er sinds 2001 een stabilisatie van de het zuidelijke deel van de buitendelta optreedt. De grootschalige zandsuppleties compenseren hier waarschijnlijk de natuurlijke zandverliezen.

De bulk van de buitendelta (Noorderhaaks) blijft eigenlijk onverminderd zand verliezen met een snelheid van ongeveer $3.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Op lange termijn was deze waarde lager ($1.68 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$), wat zou impliceren dat de erosie sterk toegenomen is. Dit laatste is echter de vraag. Waarschijnlijk speelt hier de meetnauwkeurigheid een rol. Vergelijken we de 1926 en 1933 opname van de buitendelta dan zien we hier een onverklaarbare fluctuatie, waarbij de volumes tijdelijk sterk toenemen. Het is mogelijk dat er als eerste response op de afsluiting van de Zuiderzee veel zand vanuit de geulen de buitendelta is opgeduwd waardoor het volume tijdelijk toenam. Sindsdien treedt er dan een vrijwel continue erosie op van rond de $3.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Een gebrek aan data maakt het niet mogelijk het exacte omslagpunt te bepalen, maar omdat we

voor de bepaling van de langetermijntrend de gehele periode nemen geeft dit een lagere erosie snelheid van het front.

Opmerkelijk zijn de grote verliezen van de downdrift kustzone (het deel buiten de buitendelta) die op de lange termijn veel groter (factor 3) zijn dan de recente trends. Een soortgelijke observatie kan ook gemaakt worden in de kustzone van het Eierlandse Gat. Een nadere inspectie van de tijdseries geeft eigenlijk geen onrealistische trends. Initieel vond er vooral een grote erosie plaats langs de kust van Texel (deelpolygoon 16). Dit is in overeenstemming met de historisch geobserveerde grote erosie van de kust. Deze erosie is sterk afgenomen en in de meer recente data overheerst een trend van sedimentatie. Deze wordt mede veroorzaakt door de vele suppleties. De grote veranderingen van de buitendelta kunnen zeker bijgedragen hebben aan de erosie van de naastgelegen polygoon.

Eierlandse Gat

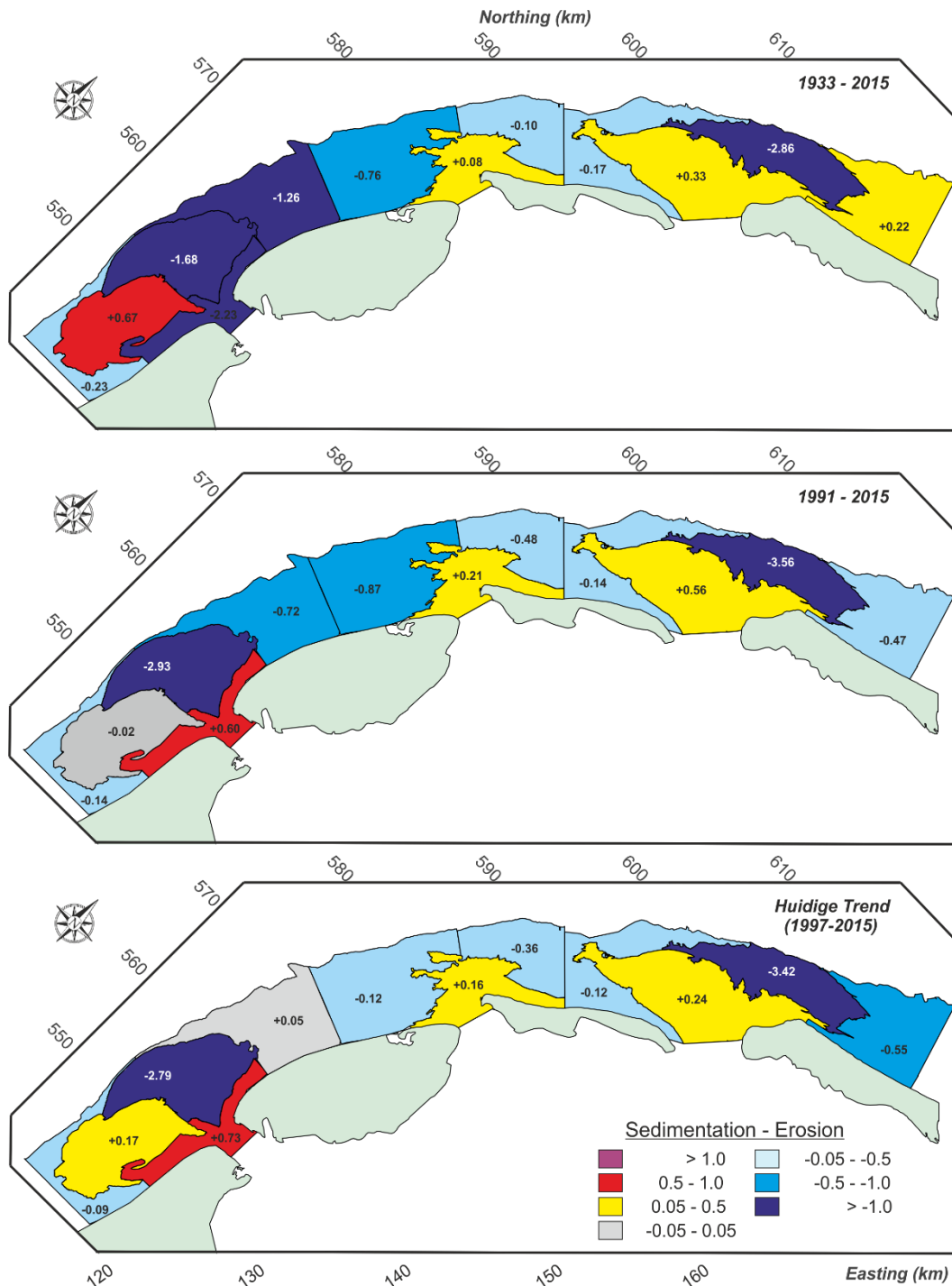
De volumeveranderingen van het Eierlandse Gat vertonen een consistent gedrag over alle perioden. De updrift en downdrift kustzones verliezen zand, terwijl de buitendelta zelf iets in volume toeneemt. Deze volumetoename is over de lange-termijn en voor de huidige trend gelijk aan $+0.08 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. De verliezen in de kustzone zijn echter significant hoger dan deze toename, dit heeft als gevolg dat de deelpolygoon in zijn geheel met $-0.78 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (lange termijn) en $-0.32 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (1997-2015) afneemt. De grote erosiewaarden van de naastgelegen kustzones zijn verdacht, maar een nadere inspectie van de tijdseries geeft geen uitzonderlijke uitschieters. Ook hier lijken de trends aannemelijk. Aan de downdrift zijde is de hogere erosiewaarde gerelateerd aan de erosie van het buitendelta front. Zand verplaatst van het front landwaarts de buitendelta op. De hogere erosie waarden van de kustzone komen dan gedeeltelijk terug in toegenomen sedimentatie op de buitendelta. Gedeeltelijk zullen ook de transporten richting het Vlie zijn toegenomen.

Zeegat van het Vlie

Het Zeegat van het Vlie vertoont relatief consistente waarden. Alleen de updrift kustzone wijkt sterk af. Op de buitendelta vindt een herverdeling van zand plaats. Grote erosie overheerst op het buitendelta front met een waarde van $-2.9 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ voor de lange-termijn en $-3.42 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ voor de huidige trends. Ook hier is de ontwikkeling waarschijnlijk gelijk aan die van het Zeegat van Texel. Het duurt enige tijd voor de erosie inzet, waardoor de langetermijntrends wat lager uitvallen. De erosie van het buitendelta front is veel groter dan de aanzanding op het landwaartse deel van de buitendelta. Het is waarschijnlijk dat een deel van het zand richting het bekken is verplaatst en een deel zal door de langstransporten richting Ameland zijn afgevoerd. Het is ook mogelijk dat een deel zeewaarts buiten het balansgebied terecht is gekomen. De -20m contour grenst hier rechtstreeks aan de erosiepolygoon. De sedimentatie-erosie kaart geeft een gebied van aanzanding zeewaarts hiervan.

Opmerkelijk zijn echter de zeer grote verliezen in de kustzone van Terschelling. Hier geeft de recente trend een erosie van $-0.55 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Deze erosie wordt met name veroorzaakt door een verdieping van deelpolygoon 34 en 35 (zie Appendix A, Figuur A.1). De geobserveerde volumeverandering van polygoon 35 lijkt hierbij wel consistent. Wat vooral opvalt is de omslag van een aanzandende polygoon (1925-1990), naar een eroderende trend sindsdien. Deze trend lijkt zich in alle datapunten door te zetten. De berekende waarde van $-0.44 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ lijkt hier realistisch. In deelpolygoon 34 is er een grotere onzekerheid. Over de gehele tijdserie lijkt er inderdaad een licht eroderende trend op te treden. Deze is ongeveer $-0.11 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. In de periode 1980-2000 zijn er grote fluctuaties in deze deelpolygoon te observeren, nemen we deze mee in de analyse dan krijgen we een verlies van $-0.94 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Deze waarde lijkt niet

realistisch. In onze verdere uitwerking veronderstellen we daarom dat de langetermijnwaarde van $-0.11 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ ook representatief is voor de recente ontwikkelingen.



Figuur 4.7 Een samenvatting van de trends (in Mm^3/jaar) in de kustzone van de Westelijke Waddenzee voor de periode: (a) 1933-2015. (b) 1991-2015 en (c) 1997-2015.

4.2.2 Het bekken

De trendwaarden voor het bekken zijn in deze studie ook gebaseerd op de gedetailleerde polygoon zoals weergegeven in Appendix B, Figuren B.2 tot B.4. In Figuur 4.8 en Tabel 4.3 worden de volumeveranderingen samengevat.

Tabel 4.3 Samenvatting van de trendwaarden per bekkenpolygoon.

Bekken polygoon	Trends [$Mm^3/jaar$]		
	LT 1933 - 2015	MT 1971 - 2015	HT 1991 - 2015
MD	2.75	0.27	0.84
ELD	-0.38	-0.27	-0.41
Vlie	1.62	2.36	0.97
Totaal	3.98	2.35	1.40

Zeegat van Texel / Marsdiep

De volumeveranderingen in het Marsdiep vertonen een overeenkomstig beeld voor de lange termijn en over de periode 1971-2015. Wel neemt de totale aanzanding sterk af. Van $2.75 Mm^3/jaar$ naar $0.84 Mm^3/jaar$. Deze afname komt vooral doordat de sedimentatie iets afneemt en de erosie juist sterk toeneemt. Op zich is dat wel begrijpelijk. Direct na afsluiting van de Afsluitdijk is de afwijking van het evenwicht het grootst en zullen ook de grootste volumeveranderingen optreden. De afgesloten geulen sedimenteren dan snel met grote volumeveranderingen tot gevolg. Na deze initiële snelle aanpassing komt er een lange-termijn respons waarin de veranderingen wat geleidelijker zijn. De periode 1971-2015 geeft dan waarschijnlijk ook een wat beter beeld van deze lagere termijn respons dan de trendlijnen op basis van 1933-2015. De patronen van sedimentatie en erosie zijn voor beide perioden echter overeenkomstig. We zien een grote aanzanding in het zuidelijke deel van het bekken. Hier nemen het Balgzand en de Lutjeswaard sterk in volume toe. Het middendeel van het bekken (inclusief Texelstroom) verdiept met grote erosiewaarden tot gevolg. Deze verdieping en met name die van de centraal gelegen Waarden lijkt zich over de periode 1971-2015 te versterken. Waarschijnlijk nemen dan ook de transporten richting het bekken van het Vlie sterk toe en dragen zo bij tot de grotere aanzanding op de Vlake van Oosterbierum.

De meest recente bodem vertoont grotere verschillen met de lange- en middel-langetermijntrends. De trend van sedimentatie van met name Balgzand is sterk afgenomen tot ongeveer $1.00 Mm^3/jaar$. Doordat hier de erosiesnelheden ook sterk afnemen is juist de netto aanzanding met $0.86 Mm^3/jaar$ iets hoger dan op middellangetermijn.

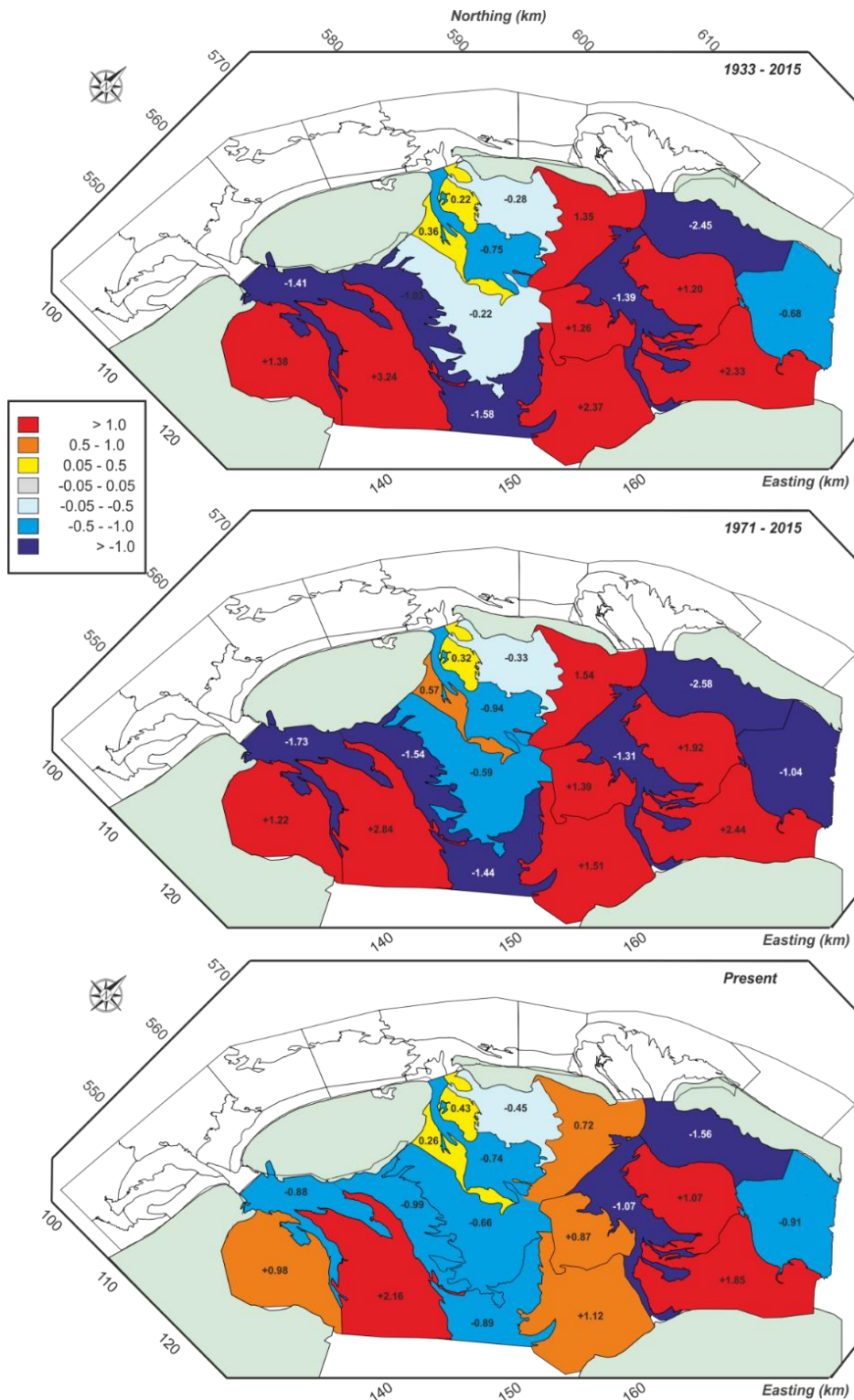
Eierlandse Gat

De volumeveranderingen van het Eierlandse Gat vertonen een consistent gedrag van erosie over alle perioden. De totale erosie ligt hier op -0.30 tot $-0.40 Mm^3/jaar$. Alleen de Waarden en de centraal gelegen plaat Hengst nemen consistent in volume toe. In eerdere studies werd er vanuit gegaan dat er geen uitwisseling tussen het Marsdiep en Eierlandse Gat optrad. Echter, de consistente erosie van de Waarden in het deel van het Marsdiep en de toename richting Eierlandse Gat worden waarschijnlijk wel veroorzaakt door een oostelijk verplaatsen van de Waarden.

Zeegat van het Vlie

De sedimentatie erosie patronen van het Vlie vertonen eigenlijk een vrijwel gelijk beeld als die van het Marsdiep: het patroon blijft gelijk alleen nemen de volumeveranderingen af. De aanzanding neemt af van $1.62 Mm^3/jaar$ over de periode 1935-2015 tot minder dan $1 Mm^3/jaar$

voor de huidige periode. De grootste reductie treedt hier op in het centrale gedeelte van het bekken op het Kornwerderzand en de Waardgronden.



Figuur 4.8 Een samenvatting van de trends (in Mm^3/jaar) in het bekken van de Westelijke Waddenzee voor de periode: (a) 1933-2015. (b) 1971-2015 en (c) de huidige trend (1991-2015).

4.3 Berekende trends in de Oostelijke Waddenzee

De trendwaarden voor de Oostelijke Waddenzee worden samengevat in Tabel 4.4 en Figuur 4.9, Figuur 4.10 en Figuur 4.11. De trendwaarden voor het Amelanders Zeegat zijn hierbij gebaseerd op de analyse van 18 deelpolygoon op de buitendelta en 13 deelpolygoon van de kust (zie Appendix B, Figuur B.8 en Tabellen B.5 – B.7).

Voor het Friesche Zeegat is er geen detailanalyse van de buitendelta uitgevoerd. Deze is onderverdeeld in 3 delen: (1) een westelijk (Pinkegat –PGAT- gedeelte), (2) een oostelijk deel (Zoutkamperlaag – ZKL) en (3) de diepere kust. In Appendix B.3 en B.4 worden de veranderingen van respectievelijk het Amelanders Zeegat en Friesche Zeegat in meer detail besproken. Voor het Friesche zeegat zijn de 2012 metingen het meest recent. Het heeft hierdoor geen zin een trendlijn te bepalen vanaf 2005.

Tabel 4.4 Samenvatting van de trendwaarden voor de Oostelijke Waddenzee

	Trends [Mm ³ /jaar]		
	1926/ 1948 - 2015	1989 - 2015	Recente trend (2005 – 2018)
Kust polygoon			
Ameland	-0.30	-0.14	0.49
Pinke Gat	+0.28	-0.30	-
Zoutkamperlaag	-0.95	-0.50	
Kust (ZKL)	-0.63	-0.47	
Bekkenpolygoon			
Ameland	+1.04	+1.43	+1.42
Pinke Gat	+0.46	-0.28	-
Zoutkamperlaag	+1.37	+0.21	-

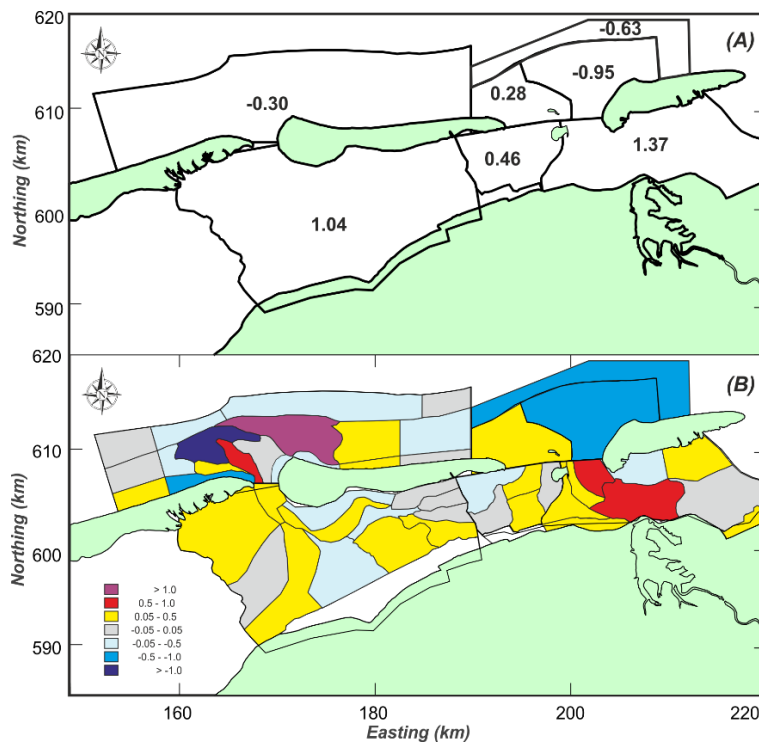
De meest kenmerkende morfologische veranderingen zijn:

Ameland

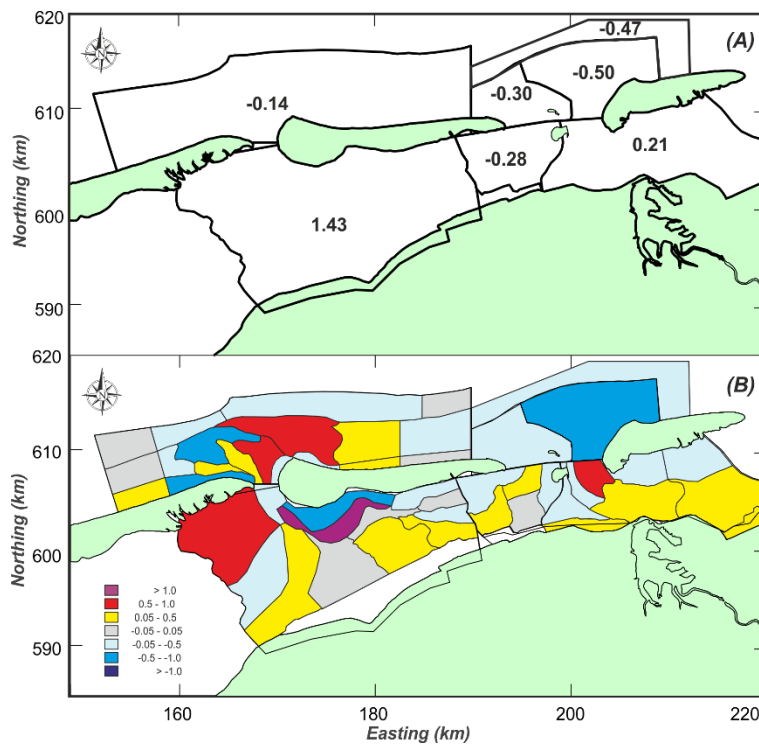
- (1) Volumeverandering van de kustpolygoon Ameland is beperkt.
- (2) Herverdeling van zand op de buitendelta van Ameland. Erosie van het buitendelta front en de west (updrift) zijde van de buitendelta en aanzanding aan de oost (downdrift) zijde.
- (3) Een verandering van een eroderend naar een stabiel/aanzandend systeem.
- (4) Bekken vertoont netto aanzanding. Aanzanding treedt vooral op nabij het wantij van het Vlie en de kust.
- (5) Kleine verdieping in het centrale gedeelte, waar de geulen liggen.

Friesche Zeegat

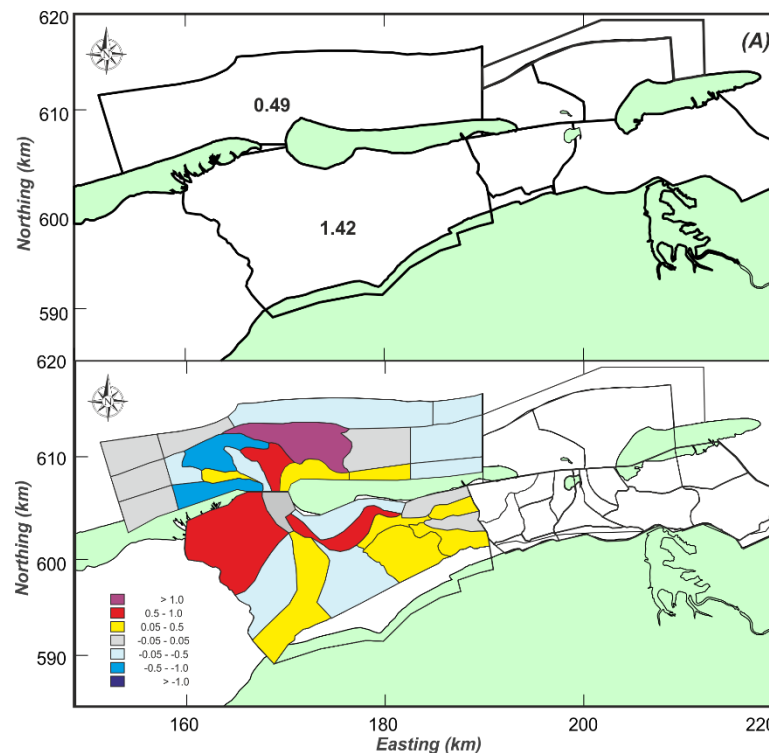
- (1) Op lange termijn vertoont het westelijk deel van de buitendelta een toename in volume, het oostelijke deel vertoont significante erosie van buitendelta en aanliggende kust.
- (2) Recentelijk recent erodeert de gehele buitendelta.
- (3) Langetermijntrend van aanzanding in het bekken. Grootste veranderingen treden op in Zoutkamerlaag (sedimentatie o.a. door afsluiting van de Lauwerszee).
- (4) Recentelijk (kleine) erosie van het Pinkegat. Doorgaande sedimentatie in Zoutkamerlaag langs de kust van Groningen.



Figuur 4.9 Een samenvatting van de trends (in Mm^3 /jaar) in het bekken van de Oostelijke Waddenzee voor de periode: (a) 1933-2015.



Figuur 4.10 Een samenvatting van de trends (in Mm^3 /jaar) in het bekken van de Oostelijke Waddenzee voor de periode: (b) 1989-2015.



Figuur 4.11 Een samenvatting van de trends (in $Mm^3/jaar$) in het bekken van de Oostelijke Waddenzee voor de huidige trend.

4.4 Een vergelijking met bestaande studies.

De laatste inzichten in de sedimenthuishouding van de Waddenzee zijn samengevat in de studie van Wang et al. (2018). Het zandbalans gedeelte van deze studie is daarin gebaseerd op de getallen zoals berekend in Elias et al. (2012) en voor het bekken aangevuld met recentere gegevens. Voor de Westelijke Waddenzee en het Friesche Zeegat zijn recentelijk al nieuwe analyses uitgevoerd (Elias 2018a,b). De resultaten van deze studie en voorgaande studies zijn in Figuur 4.12 samengevat. Wat in deze figuur direct opvalt is dat in alle studies net iets andere getallen worden gevonden. De verschillen tussen de Elias (2018a,b) en de huidige studie zijn relatief beperkt. In beide studies zijn de onderliggende data identiek en zijn de trendwaarden bepaald door een soortgelijke trendlijnanalyse. De opgetreden verschillen zijn hier vooral te verklaren door de verfijnde methode in deze studie en de gebruikte periode van trendlijn bepaling. In Elias (2018a) werd voor iedere deelpolygoon de optimale trendlijn geconstrueerd. Dit betekent dat de periode van analyse niet voor alle polygoon gelijk is. Met name in polygoon die in de meest recente metingen een afvlakking geven, geeft dit dan een wat lagere trendwaarde. In de huidige studie zijn per bekken vaste perioden gebruikt. De verschillen in het Friesche Zeegat zijn wat groter. Deze afwijking komt door de nieuwe, aanvullende methoden van trendlijn bepaling.

De resultaten voor de studie van Wang et al. (2018) en de huidige resultaten vertonen grotere verschillen. Deze verschillen zijn een combinatie van een verschil in bronbestanden, de periode van analyse en ook de methode van analyse. Als we in meer detail naar de verschillende deelpolygoon kijken, dan kunnen we concluderen dat verschillen in de kustpolygoon te verklaren zijn voor het:

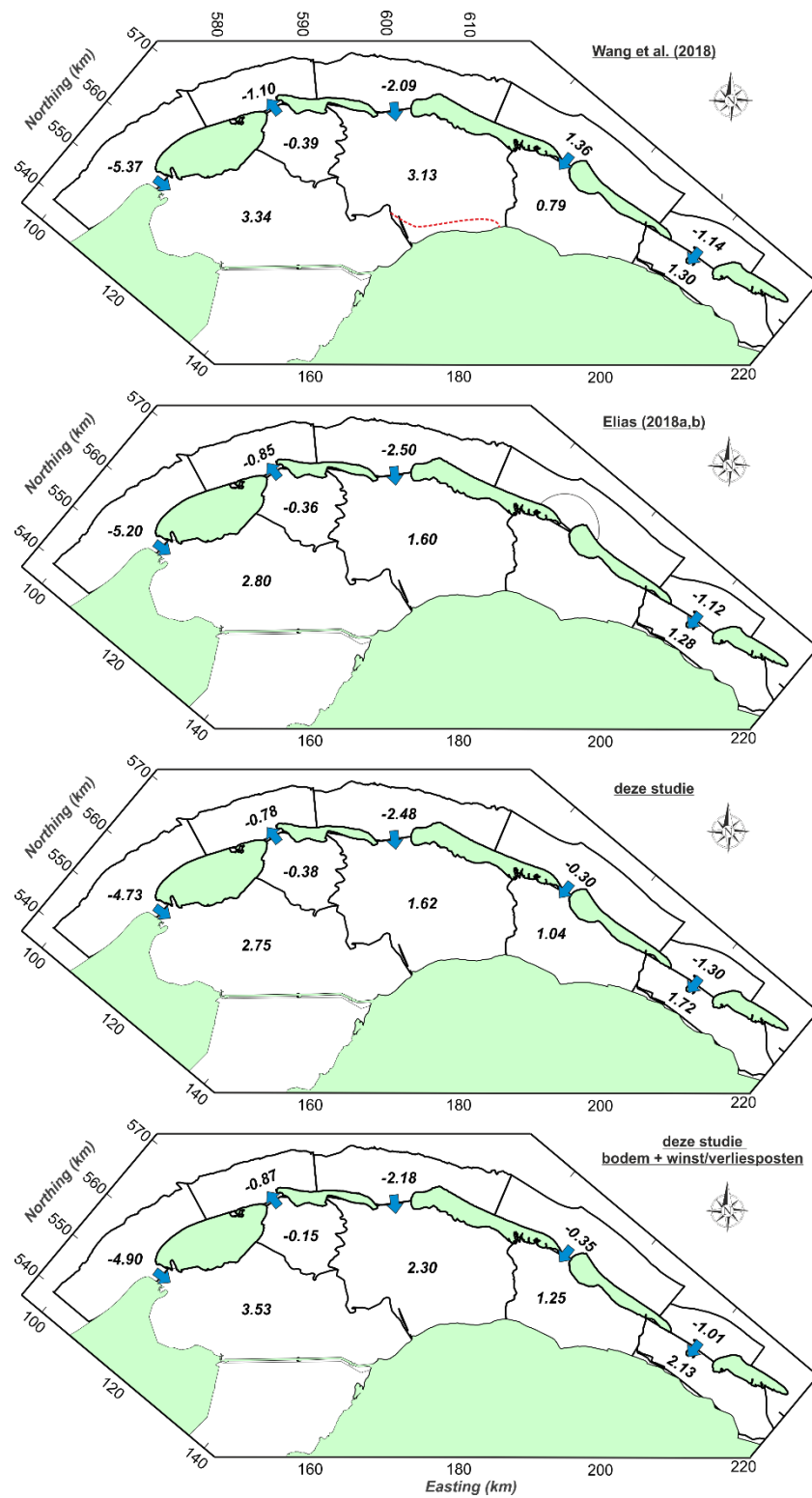
- (1) Zeegat van Texel. De lagere erosiesnelheid wordt hier vooral veroorzaakt door de methode. In de studies van Wang (2018) is de volumeverandering berekend door de

totale volumeverandering te delen door de tijd en niet op basis van een trendlijn. Als we in de huidige studie de berekende volumeverandering zouden delen door de tijd, dan zouden we zelfs op een waarde van $-5.70 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ komen. Door de niet lineaire afvlakking van de erosiesnelheid, met een relatief grote erosie in de oude periode en kleinere recente waarden, geeft een trendlijnanalyse hier per definitie een iets lagere waarde.

- (2) Eierlandse Gat. Het verschil komt hier vooral door kleinere erosiewaarden. Dit verschil treedt met name op in het diepe gedeelte. Deze data is slechts beperkt bemeten waardoor verschillen in interpolatie methode (dus bodemligging) tussen de studies waarschijnlijk zijn.
- (3) Vlie. Dit verschil lijkt een combinatie van methode en iets andere bodemligging te zijn.
- (4) Ameland. Hier zit een groot verschil tussen de verschillende studies. In plaats van $1.36 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ sedimentatie, vinden we zelfs $-0.30 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ aan erosie. Dit verschil wordt veroorzaakt door de beginbodem. Voor Ameland zijn slechts enkele oude metingen beschikbaar, die vooral langs de rand van de buitendelta zeer onnauwkeurig lijken te zijn. De grote verliezen net ten noorden van de buitendelta zijn in de huidige studie niet in de trendlijn bepaling meegenomen. Daardoor zijn de verschillen met de eerdere studie groot. Als we puur kijken naar de buitendelta, waar we meer vertrouwen in de metingen hebben, dan zijn de verschillen tussen de studies beperkt.
- (5) Friesche Zeegat. Dit verschil wordt veroorzaakt door de methode van trendlijnbepaling:

Verschillen in de bekken polygonen:

- (1) In de Westelijke Waddenzee is er een significant verschil. Dit verschil in Marsdiep wordt veroorzaakt door de polygoon definitie, waardoor er een kleinere sedimentatie wordt toegekend aan Marsdiep. In het Vlie wijken de getallen sterk af, met significant lagere waarden. Een mogelijke oorzaak is het vrijwel constante volume in de periode tot 1970. dit geeft in de trendlijnanalyse een significante verflauwing van de trendlijnen.
- (2) Verschillen in het Eierlandse Gat, Amelander Zeegat en het bekken van het Friesche Zeegat worden veroorzaakt door de methode van trendlijnbepaling. Over het algemeen zit er in de 2 oudste bodems een relatief kleine volumeverandering. In de trendlijnbepaling is ook geconstateerd dat dit niet overal juist lijkt te zijn. Door het niet meenemen van deze verflauwing word de trendlijn per definitie wat steiler en zijn de voorspelde waarden ook hoger.



Figuur 4.12 (van boven naar beneden): Een overzicht van de volumeveranderingen (in Mm^3 /jaar) voor de resultaten zoals weergegeven in Wang et al. (2018), Elias (2018a,b) en de huidige studie zonder en met correcties.

4.5 Een overzicht van alle winst- en verliesposten

In onderstaande tabellen worden alle winst- en verliesposten per zeegat samengevat. De bepaling van deze getallen is gebaseerd op de uitwerking zoals beschreven in Hoofdstuk 4 en vanuit de literatuur (Hoofdstuk 3). Onderstaande tabellen vormen de basisgegevens voor het zandbalansmodel zoals gepresenteerd in paragrafen 5.1.2 tot 5.1.5. In deze uitwerking hebben we de middel-langetermijn verder niet gebruikt.

Tabel 4.5 Volumetrends voor invulling in het zandbalansmodel voor de kust – langetermijntrends (Mm³/jaar).

Parameter		MD	ELD	VLIE	AME	PGAT	ZKL
Periode		1933-2015	1933-2015	1933-2015	26/33-2018		
dV _c	Updrif	-0.23	-0.76	-0.17	-0.3	0	0
	Downdrift	-1.26	-0.1	0.22	-0.12	0	-0.63
	ETD	-3.24	0.08	-2.53	0.12	0.28	-0.95
DD	Updrif	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Downdrift	0.00	-0.03	0.00	-0.08	0.01	0.00
NOUR	Updrif	0.4	0.36	0.10	0.02	0.00	0.00
	Downdrift	0.29	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00
SUB	Updrif	0.03	0.04	0.02	0.03	0.00	0
	ETD	0.12	0.03	0.14	0.1	0.15	0.12
	Downdrift	0.07	0.02	0.05	0.06	0.00	0.03
DUNE	Updrif	-0.16	-0.15	-0.08	-0.06	0.00	0.00
	Downdrif	-0.14	0.00	-0.11	-0.05	0.00	-0.005
Sc _{in}	schatting	0.50	1.00	1.00	2.00	1.50	-
Sc _{out}	schatting	1.00	1.00	2.00	1.50	-	1.00
Sc _{cross}	schatting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

*duinverliezen zijn gebaseerd op de trends van volumeverandering van de Jarkus raaien over de periode 2009-2018.

Tabel 4.6 Volumetrends voor invulling in het zandbalansmodel voor het bekken – langetermijntrends (Mm³/jaar).

Parameter		MD	ELD	VLIE	AME	PGAT	ZKL
Periode		1933-2015	1933-2015	1933-2015	1925-2018	1926-2012	1926-2012
dV _b		2.75	-0.38	1.62	1.04	0.46	1.26
dd		-0.39	-0.14	-0.26	0.01	-0.04	0
sub		0.39	0.09	0.42	0.18	0.07	0.08
dV _{add}	kwelder	0.00	0.00	0.00	0.04*	0.05	0.06
Sb _{in}	Wantij1	0.00	max 0.25	max 1.5	max 0.5	max 0.5	max 0.5
Sb _{out}	Wantij2	max 1.5	max 0.25	max 0.5	max 0.5	max 0.5	max 0.5

berekend	uit literatuur	"best guess" initiële schatting
----------	----------------	------------------------------------

De verliezen naar de kwelders zijn berekend volgens de regel 0.05 cm/jaar * kwelderoppervlakte. Dit oppervlakte is gebaseerd op de polygonen zoals weergegeven in Bijlage B. In het Pinkegat en de ZKL gebruiken we tevens de volumes zoals berekend voor polygoon 13 als schatting. Deze volumes zijn significant lager dan zoals bepaald door Cleveringa (2018). In deze studie wordt een waarde gevonden van 0,39-1,17 Mm³/jaar. Een significant deel van deze volumes zal slib zijn, dit wordt in onze balansstudie niet meegenomen. Door kwelderverliezen als aparte term in te voegen is het makkelijk dit later te corrigeren met een betere schatting.

Tabel 4.7 Volumetrends voor invulling in het zandbalansmodel voor de kust – middel-langetermijntrends (Mm³/jaar).

Parameter		MD	ELD	VLIE	AME	PGAT	ZKL
Periode		1991-2015	1991-2015	1991-2015	1991-2018	1989-2018	1989-2018
dV _c	Updrif	-0.14	-0.87	-0.14	-0.17	0	0
	Downdrift	-0.72	-0.48	-0.47	0.24	0	-0.47
	ETD	-2.35	0.21	-3	-0.21	-0.3	-0.5
DD	Updrif	0	0	0	0	0.04	0
	Downdrift	0	0	0	0	0	0
NOUR	Updrif	1.04	0.74	0.27	0.00	0	0
	Downdrift	0.85	0.00	0.00	1.11	0	0
SUB	Updrif	0.03	0.06	0.02	0.03	0	0
	ETD	0.13	0.05	0.15	0.11	0.2	0.3
	Downdrift	0.07	0.03	0.05	0.06	0	0.08
DUNE	Updrif	-0.16	-0.15	-0.08	-0.06	0	0
	Downdrift	-0.14	0	-0.11	-0.05	0	-0.005
Sc _{in}	schatting	0.50	1.00	1.00	2.00	1.50	-
Sc _{out}	schatting	1.00	1.00	2.00	1.50	-	1.00
Sc _{cross}	schatting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

*duinverliezen zijn gebaseerd op de trends van volumeverandering van de Jarkus raaien over de periode 2009-2018.

Tabel 4.8 Volumetrends voor invulling in het zandbalansmodel voor het bekken – langetermijntrends (Mm³/jaar).

Parameter		MD	ELD	VLIE	AME	PGAT	ZKL
Periode		1971-2015	1971-2015	1971-2015	1974-2015	1989-2012	1989-2012
dV _b		+0.27	-0.27	+2.36	+1.25	-0.28	0.27
dd		0	0	0	0	0	0
sub		0.39	0.09	0.46	0.20	0.13	0.18
dV _{add}	kwelder	0	0	0	0.01	0	0
Sb _{in}	wantij1	0	max 0.25	max 1.5	max 0.5	max 0.5	max 0.5
Sb _{out}	wantij1	max 1.5	max 0.25	max 0.5	max 0.5	max 0.5	max 0.5

berekend	uit literatuur	"best guess"
----------	----------------	--------------

Tabel 4.9 Volumetrends voor invulling in het zandbalansmodel voor de kust – huidige trends (Mm³/jaar).

Parameter		MD	ELD	VLIE	AME	PGAT	ZKL
dV _c	Updrif	-0.09	-0.12	-0.12	-0.17	0	0
	Downdrift	0.05	-0.36	-0.55	0.24	0	-0.47
	ETD	-1.89	0.16	-3.18	-0.21	-0.3	-0.5
DD	Updrif	0	0	0	0	0.04	0
	Downdrift	0	0	0	0	0	0
NOUR	Updrif	1,43	0,24	0,29	0	0	0
	Downdrift	1,22	0	0	2,01	0	0
SUB	Updrif	0.03	0.06	0.02	0.03	0	0
	ETD	0.13	0.05	0.15	0.11	0.2	0.3
	Downdrift	0.07	0.03	0.05	0.06	0	0.08
DUNE	Updrif	-0.16	-0.15	-0.08	-0.06	0	0
	Downdrif	-0.14	0	-0.11	-0.05	0	-0.005
Sc _{in}	schatting	0.50	1.00	1.00	2.00	1.50	-
Sc _{out}	schatting	1.00	1.00	2.00	1.50	-	1.00
Sc _{cross}	schatting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

*duinverliezen zijn gebaseerd op de trends van volumeverandering van de Jarkus raaien over de periode 2009-2018.

Tabel 4.10 Volumetrends voor invulling in het zandbalansmodel voor het bekken – huidige trends (Mm³/jaar).

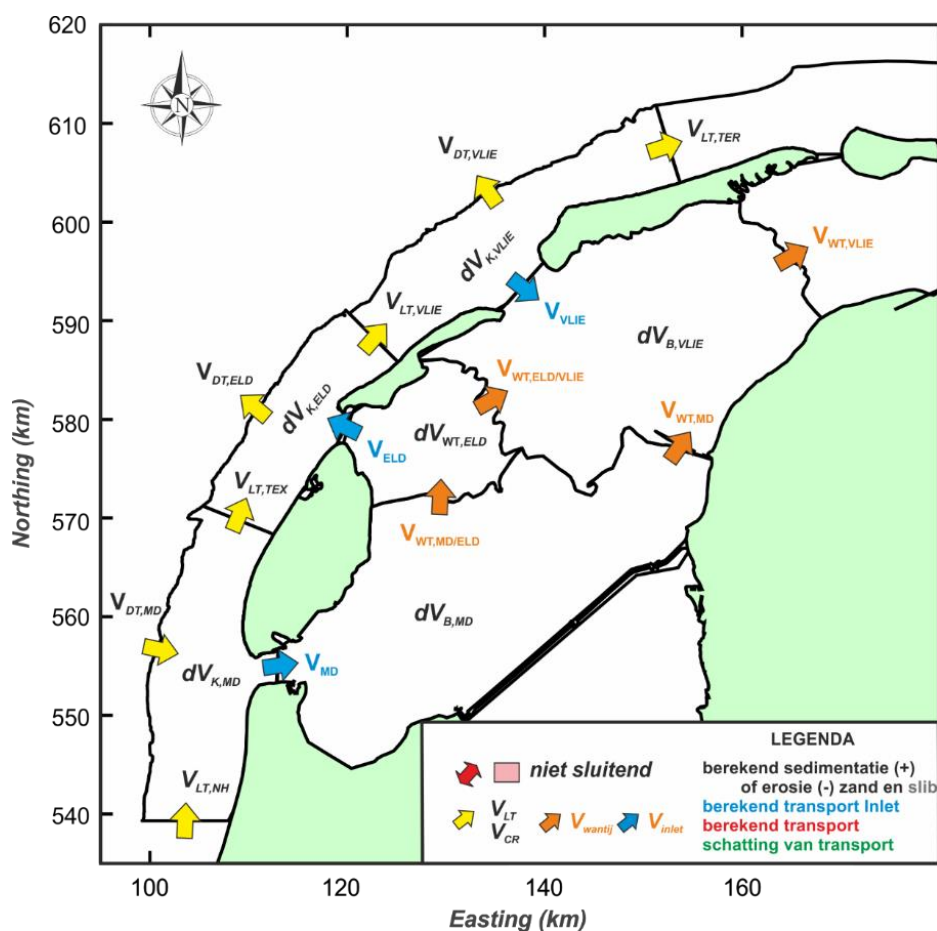
Parameter		MD	ELD	VLIE	AME	PGAT	ZKL
Periode		1991-2015	1991-2015	1991-2015	1989-2015	1989-2012	1989-2012
dV _b		0.84	-0.41	0.97	1.43	-0.28	0.27
dd		0	0	0	0	0	0
sub		0.39	0.09	0.46	0.20	0.13	0.18
dV _{add}	kwelder	0	0	0	0.04	0.05	0.06
Sb _{in}	wantij1	0	max 0.25	max 1.5	max 0.5	max 0.5	max 0.5
Sb _{out}	wantij1	max 1.5	max 0.25	max 0.5	max 0.5	max 0.5	max 0.5

berekend	uit literatuur	"best guess"
----------	----------------	--------------

5 Invulling van het Zandbalansmodel Westelijke Waddenzee

5.1 Conceptuele uitwerking van de zandbalans Westelijke Waddenzee

In deze uitwerking gebruiken we de verschillende schaalniveaus van volumeveranderingen om de onbekende variabelen van het zandbalansmodel op te lossen (zie Figuur 5.1). De benaming Marsdiep is voor het Zeegat van Texel gebruikt om verwarring tussen het eiland Texel en het zeegat te voorkomen. We beschrijven het bekken en de kust afzonderlijk en berekenen de transporten door het zeegat dan vanuit 1 van de 2 vergelijkingen. Deze keuze is afhankelijk van de (on)zekerheid van de aanname die we moeten doen. We geven voor de meest waarschijnlijke uitwerking een uitgebreide beschrijving. In de bijgevoegde tabellen staan dan varianten van deze uitwerking met iets andere startwaarden of aannames.



Figuur 5.1 Samenvatting van de variabelen in het zandbalansmodel van de Westelijke Waddenzee.

Als basis aannames voor onderstaande zandbalansen geldt:

1. Sedimentvolume is gelijk aan zandvolume (slibpercentage = 0%)
2. Er vindt initieel geen uitwisseling plaats richting diep water ($V_{DT} = 0$).
Alle volumes zijn gecorrigeerd voor winst- en verliesposten zoals weergegeven in Tabel 4.5 - Tabel 4.10.
3. Als aanname voor de langtransporten gebruiken we dat er een maximaal transport is dat varieert over de eilanden volgens Tabel 4.5.

5.2 Langetermijn sediment-balans model

5.2.1 Uitwerking grootschalige zandbalans Westelijke Waddenzee

Gekeken vanuit het bekken, weten we dat de totale sedimentatie plus het verlies over het wantij van het Vlie gelijk moet zijn aan de import door de zeegaten (Figuur 5.2).

$$V_{MD} + V_{ELD} + V_{Vlie} = 5.68 + V_{WT,VLIE}$$

Vanuit de volumeverandering van de kustzone weten we dat het transport door de zeegaten gelijk is aan de optelsom van de totale volumeverandering en de netto langs- en dwarstransporten:

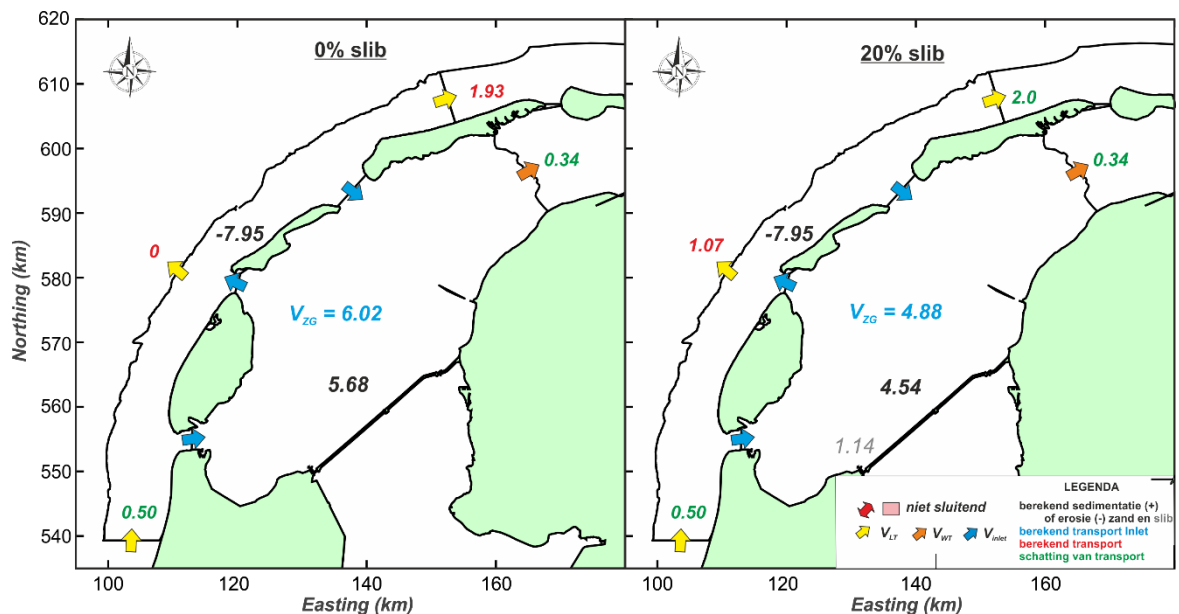
$$5.68 + V_{WT,VLIE} = 7.95 + (V_{LT,NH} - V_{LT,TER}) + (V_{DT,NH} + V_{DT,ELD} + V_{DT,VLIE})$$

Een eerste conclusie die we hieruit kunnen trekken is er in potentie genoeg erosie is in de kustzone (-7.95 Mm³/jaar) om de sedimentatie in het bekken (5.68 Mm³/jaar) te verklaren.

Door schattingen te maken van de langs- en dwarstransporten of de transporten over het wantij van het Vlie kunnen we deze zandbalans oplossen. De schatting voor het transport over het wantij is gebaseerd op de gedetailleerde volumeveranderingen. Nabij het wantij is er een erosie trend van -0.68 Mm³/jaar te zien. Gedeeltelijk zal het vrijgekomen sediment herverdeeld zijn in het bekken van het Vlie, gedeeltelijk heeft dit waarschijnlijk bijgedragen aan de aanzanding van het bekken van Ameland. We gaan er hier als schatting vanuit dat 50% is herverdeeld en 50% is verplaatst richting het kombergingsgebied van Ameland. Dit sediment heeft hier bijgedragen aan de aanzanding van met name de zone langs het Friesche Wad ($V_{WT,VLIE} = 0.34 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$). Invullen in de vergelijking voor het bekken geeft ons als schatting voor de totale sedimentimport door de 3 zeegaten:

$$\begin{aligned} V_{MD} + V_{ELD} + V_{Vlie} &= 5.68 + 0.34 \\ V_{MD} + V_{ELD} + V_{Vlie} &= \mathbf{6.02 \text{ Mm}^3/\text{jaar}}. \end{aligned}$$

Als initiële schatting van de langtransporten langs de kust van Noord-Holland gebruiken we een waarde van $V_{LT,NH} = 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Uitwerking van deze balans geeft dan dat de langsverliezen langs Terschelling ($V_{LT,TER}$) maximaal $1.93 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ kunnen bedragen. Deze waarde voldoet aan de langtransportverdeling zoals geschetst in Figuur 3.1. Met toenemende bijdrage van slib nemen de zandtransporten door de zeegaten af. Voor een percentage van 8% bedraagt de totale zandimport nog $5.23 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Met een percentage van 20% reduceert dit zelfs tot $4.88 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Deze laatste uitwerking betekent dat de gecombineerde langs- en dwarsverliezen uit de kustzone oplopen tot $3.07 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Met een maximaal langtransport van $V_{LT,TER} = 2.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ zou dit betekenen dat de dwarsverliezen gemiddeld $1.07 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ bedragen.



Figuur 5.2 Uitwerking van het grootschalig zandbalansmodel van de Westelijke Waddenzee op basis van de lange-termijn trends onder de aanname van 0% silt (links) en een silt percentage van 20% (rechts).

5.2.2 Uitwerking zandbalans per kombergingsgebied met aanname silt percentage bekken is 0%

De verdeling van de zandtransporten over de zeegaten kan worden verkregen door het zandbalans per kombergingsgebied op te lossen (Figuur 5.3). Op kombergingsniveau weten we dat de volumeverandering per kombergingsgebied gelijk is aan de gecorrigeerde volumeverandering plus/min de transporten over de wantijen.

$$V_{MD} + (V_{WT,MD} - V_{WT,MD/ELD}) = 3.53$$

$$V_{ELD} + (V_{WT,MD/ELD} - V_{WT,ELD/VLIE}) = -0.15$$

$$V_{VLIE} + (V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD} - V_{WT,VLIE}) = 2.30$$

Marsdiep

Een gedeelte van de missende variabelen kunnen we afschatten door de informatie van de gedetailleerde volumeveranderingen te gebruiken. We beginnen hiervoor bij het Marsdiep. Als aanname gebruiken we hier dat de sedimentvraag van het bekken alles overheersend is, er vindt geen sediment-bypassing over de buitendelta plaats en er zijn geen verliezen zeewaarts. Deze keuze lijkt gerechtvaardigd gezien de grote verliezen en geobserveerde landwaartse verplaatsing van het front van de buitendelta. We weten ook dat er een divergentiepunt in langtransport langs de kust van Texel aanwezig is, ongeveer ter hoogte van de Noorderlijke Uitlopers van de Noorderhaaks (Cleveringa, 2001). Als tweede aanname gebruiken we dan ook, dat de kustzone ten noorden van het divergentiepunt bijdraagt aan de noordwaartse langtransporten, terwijl de verliezen ten zuiden hiervan bijdragen aan de invulling van het bekken. Uit deze redenering volgt dat het zandaanbod vanaf de buitendelta richting het zeegat en dus ook de transporten door het zeegat berekend kunnen worden als:

$$V_{MD} = - (dV_{K,ETD_MD} + dV_{K,updrift_MD}) + V_{LT,NH}$$

Waarin $V_{LT,NH}$ alleen kan worden geschat. Als basis schatting gebruiken we hiervoor $0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Deze waarde is gebaseerd op de berekende transporten uit Van Rijn (1995). Uitwerking van deze balans geeft dan:

$$V_{MD} = 3.56 + V_{LT,NH}$$

$$V_{MD} = 4.06 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

De langtransporten langs de kust van Texel zijn gelijk aan de verliezen aan de downdrift zijde van het kustvak

$$V_{LT,TEX} = dV_{K_downdrift_MD}$$

$$V_{LT,TEX} = -1.34 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

De berekende langtransportwaarde van $1.34 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (uit) is hoger dan de geschatte waarde gebaseerd op de literatuur (zie Figuur 3.1). In uitwerkingsvariant 2 word deze waarde afgekapt op $1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ onder de aanname dat het overgebleven deel van het transport het bekken in wordt getransporteerd.

De volumebalans van het bekken van het Marsdiep kan nu verder worden ingevuld.

$$V_{MD} + V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} = dV_{B,MD}$$

$$V_{MD} + V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} = 3.53 \quad (\text{variant 1})$$

$$V_{MD} + V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} = 3.87 \quad (\text{variant 2})$$

Dit geeft dan als uitwerking

$$V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} = 0.53 \quad (\text{variant 1})$$

$$V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} = 0.87 \quad (\text{variant 2})$$

Onder de aanname dat $V_{WT,MD/ELD}$ maximaal $0.25 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ kan zijn geeft dit $V_{WT,MD} = 0.28 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Voor variant 2 zijn deze getallen dan $V_{WT,MD/ELD} = 0.25 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en $V_{WT,MD} = 0.62 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Beide schattingen voor het transport over het wantij tussen de bekkens van het Marsdiep en Vlie lijken aan de lage kant. Op basis van de aanzanding van de Vlakte van Oosterbierum werd in Elias (2018) geconcludeerd dat de transporten over dit wantij ongeveer $1 - 1.5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ kan bedragen.

Eierlandse Gat.

De buitendelta van het Eierlandse Gat strekt zich veel minder ver uit dan de buitendelta van het Zeegat van Texel. De variabiliteit van de geulen en platen en de geobserveerde plaataanlandingen laten hier zien dat er hier wel degelijk sediment-bypassing optreedt over de buitendelta. Redenerend vanuit de kustzone is het hier eigenlijk niet mogelijk de transporten door het zeegat af te schatten. Als schatting voor de transporten door het zeegat gebruiken we daarom eerst de bekken informatie.

$$V_{ELD} + (V_{WT,ELD/MD} - V_{WT,ELD/VLIE}) = -0.15$$

Op basis van de geobserveerde volumeverandering weten we dat er netto $0.15 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ aan erosie is opgetreden. In eerdere schattingen werd de uitwisseling met de naastliggende

bekken hier op nul gezet. Echter de geobserveerde erosie van de zuidelijk gelegen Waarden en de sedimentatie aan de noordzijde op de Waardgronden laat eigenlijk zien dat er waarschijnlijk wel een uitwisseling optreedt. Onze beste schatting hier is dat de uitwisseling over de twee wantijen gelijk is en er netto geen verandering optreedt.

$$V_{WT,ELD/MD} = V_{WT,ELD/VLIE}$$

Dit geeft dan als uitwerking dat het transport door het Eierlandse gat zeewaarts gericht is met een waarde van $V_{ELD} = -0.15 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (export) en als we de balans verder uitwerken geeft dit een langtransport bij Terschelling van:

$$(V_{ELD} + dV_{K,ELD}) = V_{LT,VLIE} - V_{LT,TEX} + V_{DT,ELD}$$

$$(-0.15 - 0.87) = 1.34 - V_{LT,TEX} + V_{DT,ELD} \quad (\text{variant 1})$$

$$(-0.15 - 0.87) = 1.00 - V_{LT,TEX} + V_{DT,ELD} \quad (\text{variant 2})$$

$$V_{LT,VLIE} = 2.36 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ als } V_{DT,ELD} = 0 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \quad (\text{variant 1})$$

$$V_{LT,VLIE} = 2.02 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ als } V_{DT,ELD} = 0 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \quad (\text{variant 2})$$

Dit langtransport lijkt erg hoog en is significant hoger dan de schatting van $1.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ gebaseerd op de literatuur. Als we terugkijken waar deze waarde eigenlijk vandaan komt is dit vooral de erosie van de vooroever van Texel. Het is niet geheel duidelijk of dit een realistische trend is. Als we over de verschillende perioden kijken dan zien we wel dat ook op de middellangetermijn en voor de huidige trends hier een aanzienlijke erosie optreedt. Het is hier mogelijk dat de vooroever inderdaad erodeert, maar dat de transporten juist zeewaarts zijn gericht. Dit zou betekenen dat er een extra verliespost in dit kombergingsgebied meegenomen moet worden.

In variant 2 rekenen we verder met een maximaal langtransport van $1.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Dit geeft dan als uitwerking:

$$V_{LT,VLIE} = 1.00, V_{LT,TEX} = 1.0 \text{ en } V_{DT,ELD} = -1.02 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

Zeegat van het Vlie.

De transporten door het Zeegat van het Vlie kunnen worden berekend vanuit het bekken:

$$V_{VLIE} = dV_{B,VLIE} - (V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD} - V_{WT,VLIE})$$

en vanuit de kust:

$$V_{VLIE} = -dV_{K,VLIE} + (V_{LT,VLIE} - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER}$$

Voor beide uitwerkingen zijn aannamen en de schattingen vanuit de naastliggende zeegaten benodigd. Gebruiken we als basis de berekende transporten over de wantijen ($V_{WT,VLIE} = 0.34 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$), dan geeft dit als uitwerking:

$$V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD/ELD} - V_{WT,VLIE/AME} = 0.25 + 0.28 - 0.34 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \quad (\text{variant 1})$$

$$V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD/ELD} - V_{WT,VLIE/AME} = 0.25 + 0.68 - 0.34 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \quad (\text{variant 2})$$

En invulling hiervan geeft:

$$V_{VLIE} = 2.30 - (0.25 + 0.28 - 0.34) \quad (\text{variant 1})$$

$$V_{VLIE} = 2.11 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{VLIE} = 2.30 - (0.25 + 0.68 - 0.34) \quad (\text{variant 2})$$

$$V_{VLIE} = 1.77 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

Met behulp van deze waarde kunnen we de zandbalans van de kustzone weer verder uitwerken.

$$V_{VLIE} = -dV_{K,VLIE} + (V_{LT,VLIE} - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER}$$

$$-dV_{K,VLIE} + (V_{LT,VLIE} - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER} = 2.11 \quad (\text{variant 1})$$

$$2.18 + (2.36 - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER} = 2.11$$

$$V_{LT,TER} = 2.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}, \quad V_{DT,TER} = -0.43 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$2.18 + (1.00 - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER} = 1.77 \quad (\text{variant 2})$$

$$V_{LT,TER} = 1.41 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ en } V_{DT,TER} = 0.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

5.2.3 Uitwerking zandbalans per kombergingsgebied met een slib percentage bekken van 20%

In onze basisuitwerking, zoals hierboven uitgewerkt, maken we geen onderscheid tussen zand of slib. In deze paragraaf gaan we ervan uit dat 20% van het sedimentatievolume in het bekken bestaat uit slib. Dit wordt weergegeven door de grijze getallen. De slibbalans wordt verder niet uitgewerkt. Alle andere getallen (uitwisselingen) zijn dus zandvolumes.

Concreet betekend dit dat de zandbalansen per kombergingsgebied reduceren tot:

$$V_{MD} + V_{ELD} + V_{Vlie} = 4.54 - V_{WT,VLIE}$$

En de slibbalans zou dan zijn

$$V_{MD,slib} + V_{ETD,slib} + V_{VLIE,slib} = 1.14 - V_{WT,VLIE_slib}$$

De zandbalansen per kombergingsgebied zijn nu gelijk aan:

$$V_{MD} + V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} = 2.82$$

$$V_{ELD} + (V_{WT,MD/ELD} - V_{WT,ELD/VLIE}) = -0.12$$

$$V_{VLIE} + (V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD} - V_{WT,VLIE}) = 1.84$$

In de kustzone is de aanname dat alle volumeveranderingen zand zijn. Dit betekent dat hier de zandbalans van Marsdiep ongewijzigd blijft.

$$V_{MD} = 4.06 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \quad (\text{variant 1})$$

en

$$V_{LT,TEX} = 1.34 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$\begin{aligned} V_{MD} &= 4.40 \text{ Mm}^3/\text{jaar} && \text{(variant 2)} \\ \text{als } S_{LT_TEX} &= 1.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \end{aligned}$$

De volumebalans van het bekken van het Marsdiep kan nu verder worden ingevuld.

$$\begin{aligned} dV_{B,MD} &= V_{MD} + V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} \\ V_{MD} + (V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD}) &= 2.82 \end{aligned}$$

Waaruit volgt dat

$$\begin{aligned} V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} &= 1.24 \text{ Mm}^3/\text{jaar} && \text{(variant 1)} \\ V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} &= 1.58 \text{ Mm}^3/\text{jaar} && \text{(variant 2)} \end{aligned}$$

De zandbalans voor het Eierlandse Gat geeft

$$V_{ELD} + (V_{WT,ELD/MD} - V_{WT,ELD/VLIE}) = -0.12$$

Waarbij ook de aanname blijft dat $V_{WT,ELD/MD} = V_{WT,ELD/VLIE}$. Tevens nemen we aan dat er hier maximaal 0.25 Mm³/jaar aan zandtransport over de wantijen kan optreden. Dit geeft dan als uitwerking:

$$\begin{aligned} V_{WT,MD/ELD} &= 0.25 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ en } V_{WT,MD} = 0.99 \text{ Mm}^3/\text{jaar} && \text{(variant 1)} \\ V_{WT,MD/ELD} &= 0.25 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ en } V_{WT,MD} = 1.33 \text{ Mm}^3/\text{jaar} && \text{(variant 2)} \end{aligned}$$

en

$$V_{ELD} = -0.12 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ (export)}$$

Een verdere uitwerking van de kustzone geeft een langtransport bij Terschelling van:

$$(V_{ELD} + dV_{K,ELD}) = V_{LT,VLIE} - V_{LT,TEX} + V_{DT,ELD}$$

$$\begin{aligned} (-0.12 - 0.87) &= 1.34 - V_{LT,TEX} + V_{DT,ELD} && \text{(variant 1)} \\ V_{LT,VLIE} &= 2.33 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ als } V_{DT,ELD} = 0 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -(-0.12 - 0.87) &= 1.00 - V_{LT,TEX} + V_{DT,ELD} && \text{(variant 2)} \\ V_{LT,VLIE} &= 1.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ als } V_{DT,ELD} = -0.99 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \end{aligned}$$

De transporten door het Zeegat van het Vlie kunnen worden berekend vanuit het bekken en de kust: Ook hier geldt de aanname dat $V_{WT,VLIE} = 0.34 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

$$\begin{aligned} V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD/ELD} - V_{WT,VLIE/AME} &= 0.25 + 0.99 - 0.34 \text{ Mm}^3/\text{jaar} && \text{(variant 1)} \\ V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD/ELD} - V_{WT,VLIE/AME} &= 0.25 + 1.33 - 0.34 \text{ Mm}^3/\text{jaar} && \text{(variant 2)} \end{aligned}$$

En invulling hiervan geeft:

$$\begin{aligned} V_{VLIE} &= 1.83 - (0.25 + 0.99 - 0.34) && \text{(variant 1)} \\ V_{VLIE} &= 0.94 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \end{aligned}$$

$$V_{VLIE} = 1.84 - (0.25 + 1.33 - 0.34) \quad (\text{variant 2})$$

$$V_{VLIE} = 0.60 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

Met behulp van deze waarde kunnen we de zandbalans van de kustzone weer verder uitwerken.

$$V_{VLIE} = -dV_{K,VLIE} + (V_{LT,VLIE} - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER}$$

$$-dV_{K,VLIE} + (V_{LT,VLIE} - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER} = 0.94 \quad (\text{variant 1})$$

$$2.18 + (2.33 - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER} = 0.94$$

$$V_{LT,TER} = 2.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}, \quad V_{DT,TER} = -1.57 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$2.18 + (1.00 - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER} = 0.60 \quad (\text{variant 2})$$

$$V_{LT,TER} = 2.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ en } V_{DT,TER} = -0.58 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

5.2.4 Gevoeligheidsonderzoek lange-termijn zandbalans.

In onderstaande Tabellen (5.1 – 5.4) wordt de uitwerking van het balansmodel voor verschillende aannamen van lanstransport bij Noord-Holland samengevat. De basis oplossing ($S_{LT,NH} = 0.5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$) is in bovenstaande hoofdstukken beschreven en samengevat in Figuur 5.3. De gehanteerde aannamen blijven in alle uitwerkingen identiek. In Variant 1 zijn de dwarstransporten op 0 gezet en is er geen beperking van het langstransport. In Variant 2 kunnen maximale langstransporten optreden zoals getoond in Figuur 3.1, het gedeelte groter dan dit maximum word dan verrekend met het dwarstransport.

Uit deze analyse volgt:

1. De transporten door het Marsdiep worden rechtstreeks beïnvloedt door de langstransporten bij Noord-Holland. Afhankelijk van het gekozen scenario volgt een sedimentimport tussen de 3.5 en 5.0 Mm³ sediment. De meest waarschijnlijke scenario's ($V_{LT,NH} = 0.5 - 1.0 \text{ Mm}^3$) geeft een sedimentimport tussen de 4.0 en 4.6 Mm³. Deze import is onafhankelijk van het slibpercentage in het bekken. Dit is een rechtstreeks gevolg van de keuzes gemaakt in het zandbalansmodel.
2. Met name in de uitwerking met een slibpercentage van 30% worden zeer grote langstransporten en transporten over de wantijen gevonden. Deze lijken niet realistisch. De waarde van 30% wordt hier dan verder ook niet in de analyse gebruikt.
3. Het Eierlandse gat vertoont een export van zand van -0.15 Mm³. Deze export reduceert tot -0.12 Mm³ onder de aanname van een slibpercentage van 20% in het bekken.
4. Sediment transport langs de kust van Vlieland ligt met 2.4 Mm³ significant boven de waarde van 1.0 Mm³. Om dit sluitend te krijgen zou er een groot zeewaarts verlies op moeten treden.
5. Sediment transport door het zeegat van het Vlie varieert sterk afhankelijk van de gebruikte aanname. De basisuitwerking geeft een transport tussen de 1.77 en 2.11 Mm³. Onder de aanname van een 20% slibpercentage reduceert dit tot 0.60 – 0.94 Mm³. Dit komt door de toegenomen toevoer over het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie.

Tabel 5.1 Uitwerking van het lange-termijn zandbalans model voor verschillende langstransporten bij Noord-Holland en verschillende aannamen van V_{LT} .

Scenario	V_{INLET}			$V_{LT} (Mm^3/jaar)$				$V_{DT} (Mm^3/jaar)$			$V_{WT} (Mm^3/jaar)$		
	MD	ELD	VLIE	NH	TEX	VLIE	TER	MD	ELD	VLIE	MD	ELD	VLIE
Variant 1	3,56	-0,15	2,61	0,00	1,34	2,36	1,93	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03	0,34
a. Basis	4,06	-0,15	2,11	0,50	1,34	2,36	2,00	0,00	0,00	0,43	0,28	0,25	0,34
	4,56	-0,15	1,61	1,00	1,34	2,36	2,93	0,00	0,00	0,00	0,78	0,25	0,34
	5,06	-0,15	1,11	1,50	1,34	2,36	3,43	0,00	0,00	0,00	1,28	0,25	0,34
Variant 2	3,90	-0,15	2,27	0,00	1,00	1,00	0,91	0,00	1,02	0,00	0,12	0,25	0,34
b. Basis	4,40	-0,15	1,77	0,50	1,00	1,00	1,41	0,00	1,02	0,00	0,62	0,25	0,34
	4,90	-0,15	1,27	1,00	1,00	1,00	1,91	0,00	1,02	0,00	1,12	0,25	0,34
	5,40	-0,15	0,77	1,50	1,00	1,00	2,00	0,00	1,02	0,41	1,62	0,25	0,34

	opgelegde randvoorwaarde
	knelpunt in berekening

Tabel 5.2 Uitwerking van het lange-termijn zandbalans model voor verschillende langstransporten bij Noord-Holland en een slib percentage in het bekken van 10%.

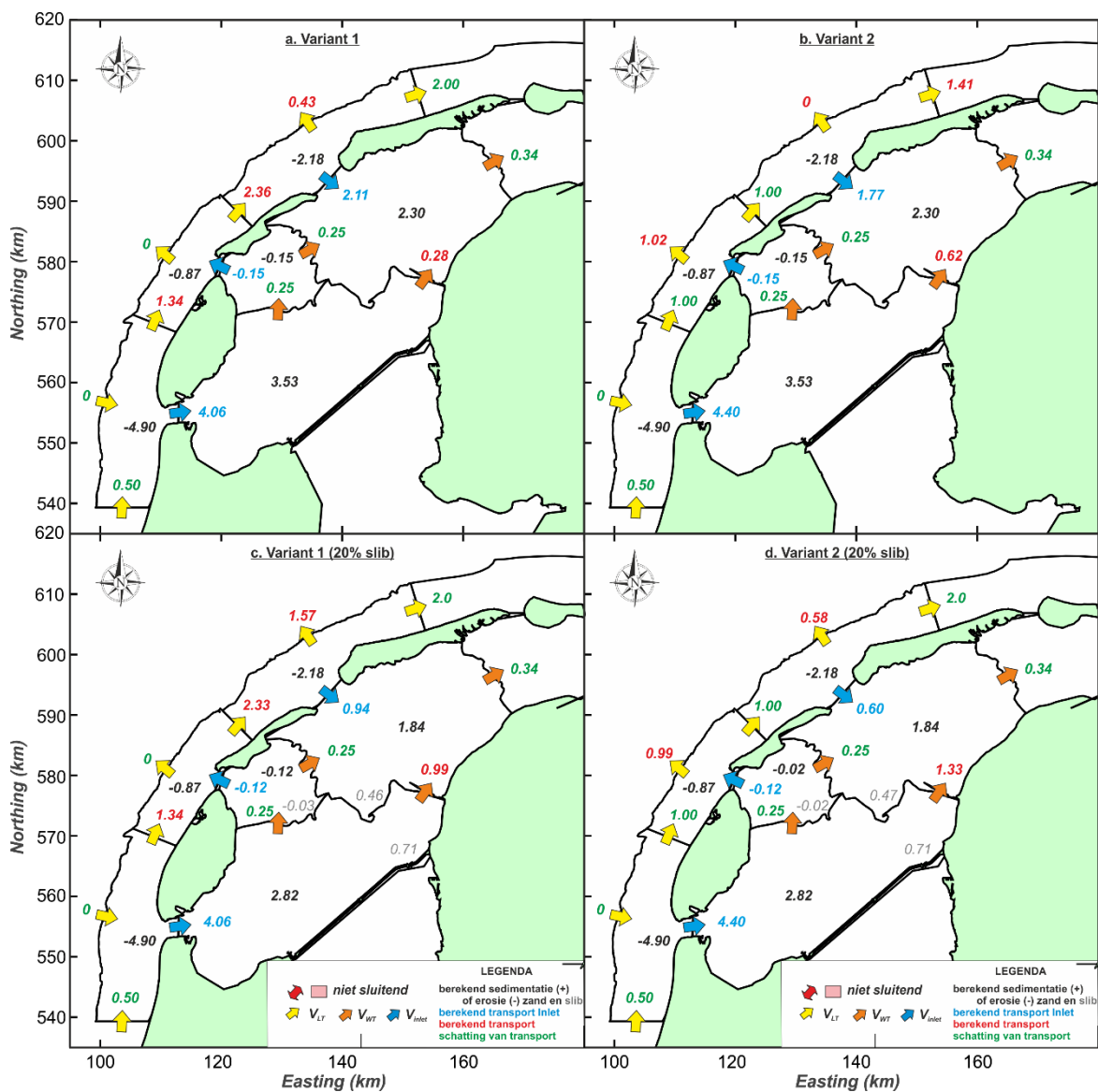
10% slib	V_{INLET}			$V_{LT} (Mm^3/jaar)$				$V_{DT} (Mm^3/jaar)$			$V_{WT} (Mm^3/jaar)$		
Scenario	MD	ELD	VLIE	NH	TEX	VLIE	TER	MD	ELD	VLIE	MD	ELD	VLIE
Variant 1	3,56	-0,14	2,16	0,00	1,34	2,98	2,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,25	0,34
c. Basis	4,06	-0,14	1,53	0,50	1,34	2,35	2,00	0,00	0,00	1,00	0,63	0,25	0,34
	4,56	-0,14	1,03	1,00	1,34	2,35	2,00	0,00	0,00	1,50	1,13	0,25	0,34
	5,06	-0,14	0,53	1,50	1,34	2,35	2,00	0,00	0,00	2,00	1,63	0,25	0,34
Variant 2	3,90	-0,14	1,69	0,00	1,00	1,00	1,49	0,00	1,01	0,00	0,47	0,25	0,34
d. Basis	4,40	-0,14	1,19	0,50	1,00	1,00	1,99	0,00	1,01	0,00	0,97	0,25	0,34
	4,90	-0,14	0,69	1,00	1,00	1,00	2,00	0,00	1,01	0,49	1,47	0,25	0,34
	5,40	-0,14	0,19	1,50	1,00	1,00	2,00	0,00	1,01	0,99	1,97	0,25	0,34

Tabel 5.3 Uitwerking van het lange-termijn zandbalans model voor verschillende langstransporten bij Noord-Holland en een slib percentage in het bekken van 20%.

20% slib	V_{INLET}			$V_{LT} (Mm^3/jaar)$				$V_{DT} (Mm^3/jaar)$			$V_{WT} (Mm^3/jaar)$		
Scenario	MD	ELD	VLIE	NH	TEX	VLIE	TER	MD	ELD	VLIE	MD	ELD	VLIE
Variant 1	3,56	-0,12	1,69	0,00	1,34	2,34	2,00	0,00	0,00	0,83	0,24	0,25	0,34
c. Basis	4,06	-0,12	0,94	0,50	1,34	2,33	2,00	0,00	0,00	1,57	0,99	0,25	0,34
	4,56	-0,12	0,44	1,00	1,34	2,33	2,00	0,00	0,00	2,07	1,49	0,25	0,34
	5,06	-0,12	-0,06	1,50	1,34	2,33	2,00	0,00	0,00	2,45	1,99	0,25	0,34
Variant 2	3,90	-0,12	1,10	0,00	1,00	1,00	2,00	0,00	0,99	0,08	0,83	0,25	0,34
d. Basis	4,40	-0,12	0,60	0,50	1,00	1,00	2,00	0,00	0,99	0,58	1,33	0,25	0,34
	4,90	-0,12	0,10	1,00	1,00	1,00	2,00	0,00	0,99	1,08	1,83	0,25	0,34
	5,40	-0,12	-0,40	1,50	1,00	1,00	2,00	0,00	0,99	1,58	2,33	0,25	0,34

Tabel 5.4 Uitwerking van het lange-termijn zandbalans model voor verschillende langstransporten bij Noord-Holland en een slib percentage in het bekken van 30%.

30% slib	V_{INLET}			$V_{LT} (Mm^3/jaar)$				$V_{DT} (Mm^3/jaar)$			$V_{WT} (Mm^3/jaar)$		
	MD	ELD	VLIE	NH	TEX	VLIE	TER	MD	ELD	VLIE	MD	ELD	VLIE
Variante 1	3,56	-0,11	1,11	0,00	1,34	2,36	2,00	0,00	0,00	1,42	0,59	0,25	0,34
c. Basis	4,06	-0,11	0,36	0,50	1,34	2,32	2,00	0,00	0,00	2,13	1,34	0,25	0,34
	4,56	-0,11	-0,14	1,00	1,34	2,32	2,00	0,00	0,00	2,63	1,84	0,25	0,34
	5,06	-0,11	-0,64	1,50	1,34	2,32	2,00	0,00	0,00	3,13	2,34	0,25	0,34
Variante 2	3,90	-0,11	0,52	0,00	1,00	1,00	2,00	0,00	0,98	0,66	1,18	0,25	0,34
d. Basis	4,40	-0,11	0,02	0,50	1,00	1,00	2,00	0,00	0,98	1,16	1,68	0,25	0,34
	4,90	-0,11	-0,48	1,00	1,00	1,00	2,00	0,00	0,98	1,66	2,18	0,25	0,34
	5,40	-0,11	-0,98	1,50	1,00	1,00	2,00	0,00	0,98	2,16	2,68	0,25	0,34



Figuur 5.3 Uitwerking van het gedetailleerde zandbalansmodel van de Westelijke Waddenzee op basis van de lange-termijn trends voor variant 1 en variant 2. Bovenste 2 deelfiguren (a,b) zijn op basis van 100% sediment, onderste figuren (c,d) zijn inclusief slib percentage van 20%.

5.3 Huidige trends

5.3.1 Uitwerking grootschalige zandbalans Westelijke Waddenzee

Gekeken vanuit het bekken, weten we dat de totale sedimentatie plus het verlies over het wantij van het Vlie gelijk moet zijn aan de import door de zeegaten (Figuur 5.4).

$$V_{MD} + V_{ELD} + V_{Vlie} = 2.34 + V_{WT,VLIE}$$

Vanuit de volumeverandering van de kustzone weten we dat het transport door de zeegaten gelijk is aan de optelsom van de totale volumeverandering en de netto langs- en dwarstransporten:

$$\begin{aligned} V_{MD} + V_{ELD} + V_{Vlie} + V_{WT,VLIE} = \\ -(V_{K,MD} + V_{K,ELD} + V_{K,VLIE}) + (V_{LT,NH} - V_{LT,TER}) + (V_{DT,NH} + V_{DT,ELD} + V_{DT,VLIE}) \\ 2.34 + V_{WT,VLIE} = 8.05 + (V_{LT,NH} - V_{LT,TER}) + (V_{DT,NH} + V_{DT,ELD} + V_{DT,VLIE}) \end{aligned}$$

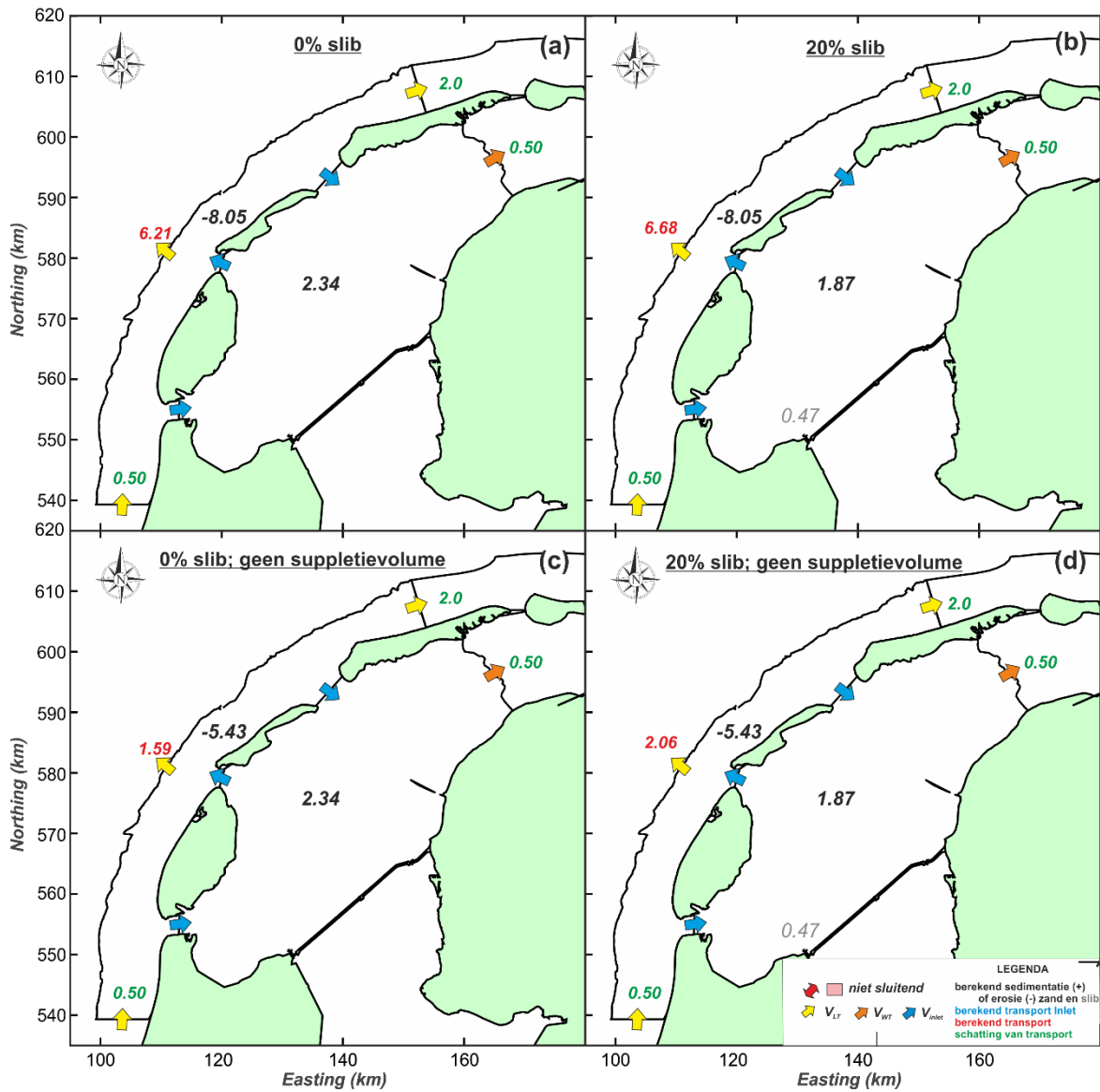
Een schatting voor de transporten over het wantij bij Vlieland wordt ook hier gebaseerd op de gedetailleerde volumeveranderingen. Nabij het wantij vindt 1.00 Mm³/jaar erosie plaats. We gaan er hier als schatting vanuit dat 50% is herverdeeld in het bekken en 50% is verplaatst richting het kombergingsgebied van Ameland en heeft hier bijgedragen aan de aanzanding van met name de zone langs het Friesche Wad ($V_{WT,VLIE} = 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$). Dit betekent dat de totale sedimentimport door de 3 zeegaten:

$$\begin{aligned} V_{MD} + V_{ELD} + V_{Vlie} &= 2.34 + 0.50 \\ V_{MD} + V_{ELD} + V_{Vlie} &= 2.84 \text{ Mm}^3/\text{jaar}. \end{aligned}$$

Als schatting van de langtransporten langs de kust van Noord-Holland gebruiken we een waarde van $V_{LT,NH} = 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Uitwerking van de zandbalans geeft dat de totale verliezen in de kustzone **6.21 Mm³/jaar** moeten bedragen. Met een maximaal langtransport van $V_{LT,TER} = 2.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ geeft dit een dwarsverlies van **4.21 Mm³/jaar**. Door het meenemen van slib moeten deze verliezen nog verder toenemen tot **6.30 Mm³/jaar** en **6.68 Mm³/jaar** voor slibpercentages van respectievelijk 8% en 20%. Deze grote dwarsverliezen lijken onrealistisch.

Één van de redenen voor de zeer hoge verliezen in de kustpolygoon zijn de zandtoevoegingen door suppleties. In het zandbalansmodel worden deze toegevoegd als extra zandaanbod. Deze term is gebaseerd op de berekende suppletievolumes zoals die bekend zijn uit de suppletiedatabase (zie Hoofdstuk 3.4). Omdat de meeste suppleties na 1990 zijn uitgevoerd geeft dit zeer hoge toevoegingen in het zandbalansmodel voor de huidige trends, waardoor de verliezen sterk toenemen. Het is echter de vraag of de suppletiewaarden zoals weergegeven in Tabel 3.5 dan correct worden meegenomen in de analyse. Het is waarschijnlijk dat als we echt in de bodems kijken we deze suppleties slecht gedeeltelijk (of misschien zelfs niet) terugvinden.

In de onderste 2 deelfiguren van Figuur 5.4 is daarom de zandbalans nogmaals uitgewerkt maar nu zonder de suppletievolumes mee te nemen. Het weglaten van de suppletievolumes reduceert de volumeverandering in de kustzone tot **5.42 Mm³/jaar**. Uitwerking van deze balansen geeft dwarsverliezen van **1.59 Mm³/jaar** voor een slibpercentage van 0% en **2.06 Mm³/jaar** voor een slibpercentage van 20%.



Figuur 5.4 Uitwerking een zandbalansmodel van de Westelijke Waddenzee op basis van de huidige trends voor onder de aanname van 0% slib (a,c) en een slib percentage van 20% (b,d), inclusief correctie voor zandsuppleties (a,b) en zonder correctie voor zandsuppleties (c,d).

5.3.2 Uitwerking zandbalans per kombergingsgebied met aanname slibpercentage bekken is 0%

De uitwerking van de gedetailleerde zandbalansen per kombergingsgebied gaat uit van 2 varianten. Variant 1 gaat hierbij uit van "onbeperkte" langtransporten. Deze worden berekend uit de volumebalans en verder niet gecorrigeerd. Wel wordt het transport over de wantijen beperkt tot de maximale waarde zoals aangegeven in Tabel 4.10. Variant 2 gebruikt tevens de aannamen voor langtransport uit Tabel 4.9.

Op kombergingsniveau weten we dat de volumeverandering per kombergingsgebied gelijk is aan de gecorrigeerde volumeverandering plus/min de transporten over de wantijen.

$$\begin{aligned}V_{MD} + (V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD}) &= dV_{B,MD} \\V_{ELD} + (V_{WT,MD/ELD} - V_{WT,ELD/VLIE}) &= dV_{B,ELD} \\V_{VLIE} + (V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD} - V_{WT,VLIE}) &= dV_{B,VLIE}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{MD} + (V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD}) &= 1.23 \\V_{ELD} + (V_{WT,MD/ELD} - V_{WT,ELD/VLIE}) &= -0.32 \\V_{VLIE} + (V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD} - V_{WT,VLIE}) &= 1.43\end{aligned}$$

Marsdiep

Ook hier gebruiken we de informatie vanuit de detailpolygoon om de zandtransporten langs de kust van Texel af te schatten. In de downdrift kustzone zien we een kleine volumetoename van 0.05 Mm³/jaar. Ook is er voor 1.22 Mm³/jaar gesuppleerd. Onder de aanname dat deze suppleties bijdragen aan de langtransporten dan schatten we dat $V_{LT,NH}$ minimaal 1.17 Mm³/jaar moet zijn. In de huidige situatie zal er waarschijnlijk ook sediment-bypassing optreden. Het is moeilijk dit te kwantificeren, maar als schatting gebruiken we 0.50 Mm³/jaar. Dit betekent dat $V_{LT,NH} = 1.67$ Mm³/jaar

$$\begin{aligned}V_{MD} &= -dV_{K,MD} + (V_{LT,NH} - V_{LT,NH}) + V_{DT,MD} \\V_{MD} &= 4.05 + (0.5 - 1.67) + 0 \\V_{MD} &= \mathbf{2.88 \text{ Mm}^3/\text{jaar}} \text{ onder de aanname dat } V_{DT,MD} = 0.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}\end{aligned}$$

De volumebalans van het bekken van het Marsdiep kan nu verder worden ingevuld.

$$\begin{aligned}V_{MD} + V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} &= dV_{B,MD} \\V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} &= 1.23 - 2.88 \quad (\text{variant 1})\end{aligned}$$

Onder de aanname dat $V_{WT,MD/ELD}$ maximaal 0.25 Mm³/jaar kan zijn geeft dit $V_{WT,MD} = \mathbf{1.10 \text{ Mm}^3/\text{jaar}}$.

De berekende langtransportwaarde van 1.67 Mm³/jaar (uit) is hoger dan de geschatte waarde gebaseerd op de literatuur (zie Figuur 3.1). In uitwerkingsvariant 2 wordt deze waarde afgekapt op 1 Mm³/jaar. Onder deze aanname en met de aanname dat er geen dwarsverliezen optreden wordt de zandimport door Marsdiep dan:

$$\begin{aligned}V_{MD} &= 4.05 + (0.5 - 1.0) \\V_{MD} &= \mathbf{3.55 \text{ Mm}^3/\text{jaar}}\end{aligned}$$

De volumebalans van het bekken van het Marsdiep zou dan geven:

$$V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} = 3.55 - 1.23$$

$$V_{WT,MD} + V_{WT,MD/ELD} = 2.32 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

Met onze aanname dat $V_{WT,MD/ELD}$ maximaal $0.25 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ kan zijn en $V_{WT,MD} = 1.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ verkrijgen we hier geen sluitende balans. Gaan we uit van maximale transporten over de wantijen dan zouden de transporten door het Marsdiep maximaal $2.98 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ mogen bedragen. Rekenen we dit terug in de zandbalans van de kustzone dan volgt dat:

$$V_{MD} = 2.98 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \quad (\text{zie uitwerking Variant 2})$$

$$V_{LT,TEX} = 1.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{DT,TEX} = 0.57 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

Eierlandse Gat.

In het Eierlandse Gat vinden we een erosie van $-0.32 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Ook in deze uitwerking hanteren we dat het transport over de wantijen gelijk blijft:

$$V_{WT,ELD/MD} - V_{WT,ELD/VLIE} = 0$$

Dit geeft dan als schatting voor de zandexport:

$$V_{ELD} + (V_{WT,ELD/MD} - V_{WT,ELD/VLIE}) = -0.32$$

$$V_{ELD} = -0.32 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \quad (\text{export})$$

en als we de balans verder uitwerken geeft dit een langtransport bij Vlieland van:

$$-(V_{ELD} + dV_{K,ELD}) = V_{LT,VLIE} - V_{LT,TEX} + V_{DT,ELD}$$

$$-(-0.27 - 0.32) = V_{LT,VLIE} - V_{LT,TEX} + V_{DT,ELD}$$

$$V_{LT,VLIE} = 0.59 + 1.67 + V_{DT,ELD} \quad (\text{Variant 1})$$

$$V_{LT,VLIE} = 2.36 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ als } V_{DT,ELD} = 0.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{LT,VLIE} = 0.59 + 1.0 + V_{DT,ELD} \quad (\text{Variant 2})$$

$$V_{LT,VLIE} = 1.59 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ als } V_{DT,ELD} = 0.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{LT,VLIE} = 1.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \text{ als } V_{DT,ELD} = 0.59 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

In beide varianten lijkt het langtransport significant hoger dan de schatting van $1.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ gebaseerd op de literatuur. In variant 2 hanteren we daarom de maximale langtransport waarde van $1.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Zeegat van het Vlie.

De transporten door het Zeegat van het Vlie kunnen worden berekend vanuit het bekken:

$$V_{VLIE} = dV_{B,VLIE} - (V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD} - V_{WT,VLIE})$$

$$V_{VLIE} = 1.43 - (V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD} - V_{WT,VLIE})$$

en vanuit de kust:

$$V_{VLIE} = -dV_{K,VLIE} + (V_{LT,VLIE} - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER}$$

$$V_{VLIE} = 3.73 + (V_{LT,VLIE} - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER}$$

Voor beide uitwerkingen zijn aannamen en de schattingen vanuit de naastliggende zeegaten benodigd. Gebruiken we als basis de berekende transporten over de wantijen ($V_{WT,VLIE} = 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$), dan geeft dit als uitwerking:

$$V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD/ELD} - V_{WT,VLIE/AME} = 0.25 + 1.40 - 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \quad (\text{variant 1})$$

$$V_{WT,ELD/VLIE} + V_{WT,MD/ELD} - V_{WT,VLIE/AME} = 0.25 + 1.50 - 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \quad (\text{variant 2})$$

En invulling hiervan geeft:

$$V_{VLIE} = 1.43 - 1.15 \quad (\text{variant 1})$$

$$\mathbf{V_{VLIE} = 0.28 \text{ Mm}^3/\text{jaar}}$$

$$V_{VLIE} = 1.43 - 1.25 \quad (\text{variant 2})$$

$$\mathbf{V_{VLIE} = 0.18 \text{ Mm}^3/\text{jaar}}$$

Met behulp van deze waarde kunnen we de zandbalans van de kustzone weer verder uitwerken.

$$V_{VLIE} = -dV_{K,VLIE} + (V_{LT,VLIE} - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER}$$

$$-dV_{K,VLIE} + (V_{LT,VLIE} - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER} = 0.28 \quad (\text{variant 1})$$

$$3.73 + (2.26 - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER} = 0.28$$

$$\mathbf{V_{LT,TER} = 5.71 \text{ Mm}^3/\text{jaar}} \text{ als } V_{DT,ELD} = 0 \text{ Mcm/jaar}$$

$$\mathbf{V_{LT,TER} = 2.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}} \text{ als } V_{DT,ELD} = 3.71 \text{ Mcm/jaar}$$

$$3.73 + (1.00 - V_{LT,TER}) + V_{DT,TER} = 0.18 \quad (\text{variant 2})$$

$$\mathbf{V_{LT,TER} = 3.55 \text{ Mm}^3/\text{jaar}} \text{ als } V_{DT,ELD} = 0 \text{ Mcm/jaar}$$

$$\mathbf{V_{LT,TER} = 2.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}} \text{ als } V_{DT,ELD} = 1.55 \text{ Mcm/jaar}$$

In beide uitwerkingen krijgen we zeer grote langtransporten in de kustzone. Op basis van deze getallen moeten we eigenlijk constateren dat het zandbalansmodel over deze periode niet sluitend is te krijgen. De onbalans tussen de grote verliezen in de kustzone en relatief geringe aanzanding in het bekken is hiervoor te groot.

In Figuur 5.5 c en d werken we beide varianten daarom nogmaals uit, maar nu zonder het suppletievolume mee te nemen. In het bekken heeft dit tot gevolg dat de sedimenttransporten over de wantijen omdraaien. Er vindt hier nu een transport plaats van het Vlie naar het Marsdiep in variant 1 is dit $V_{WT,MD} = -1.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en voor variant 2 $V_{WT,MD} = -0.33 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. De uitwerking voor de kustzone geeft hier de volgende waarden:

Variant 1

$$V_{LT,NH} = 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{ELD} = -0.32 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{VLIE} = 2.93 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{MD} = 0.23 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{DT,ELD} = 0.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{DT,VLIE} = 0.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{DT,MD} = 0.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{LT,VLIE} = 2.02 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{LT,TER} = 2.53 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{LT,TEX} = 1.67 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

Variant 2

$$V_{LT,NH} = 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{ELD} = -0.32 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{VLIE} = 2.26 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{MD} = 0.90 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{DT,VLIE} = 0.59 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

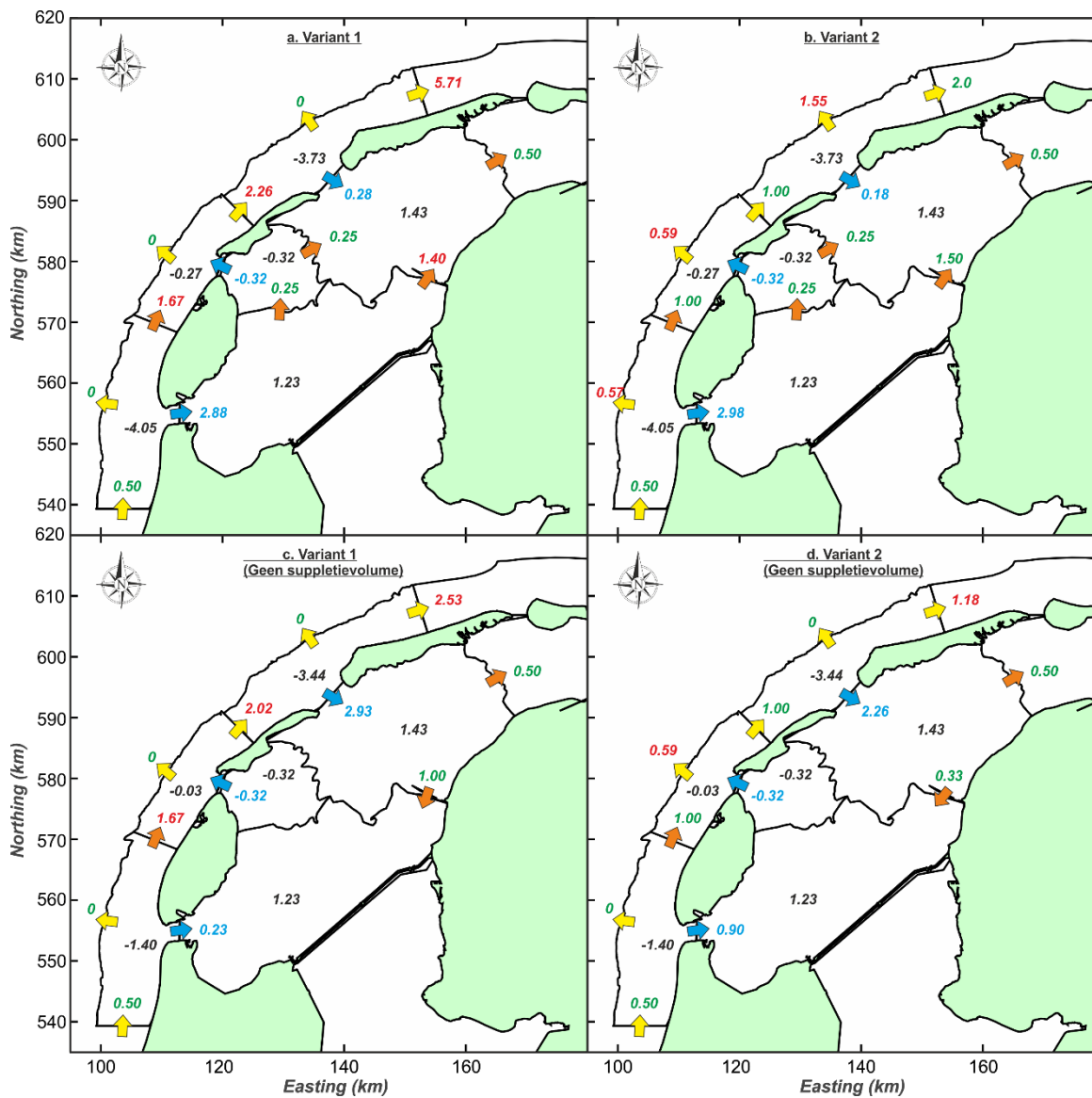
$$V_{DT,VLIE} = 0.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{DT,MD} = 0.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{LT,VLIE} = 1.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{LT,TER} = 1.18 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{LT,TEX} = 1.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

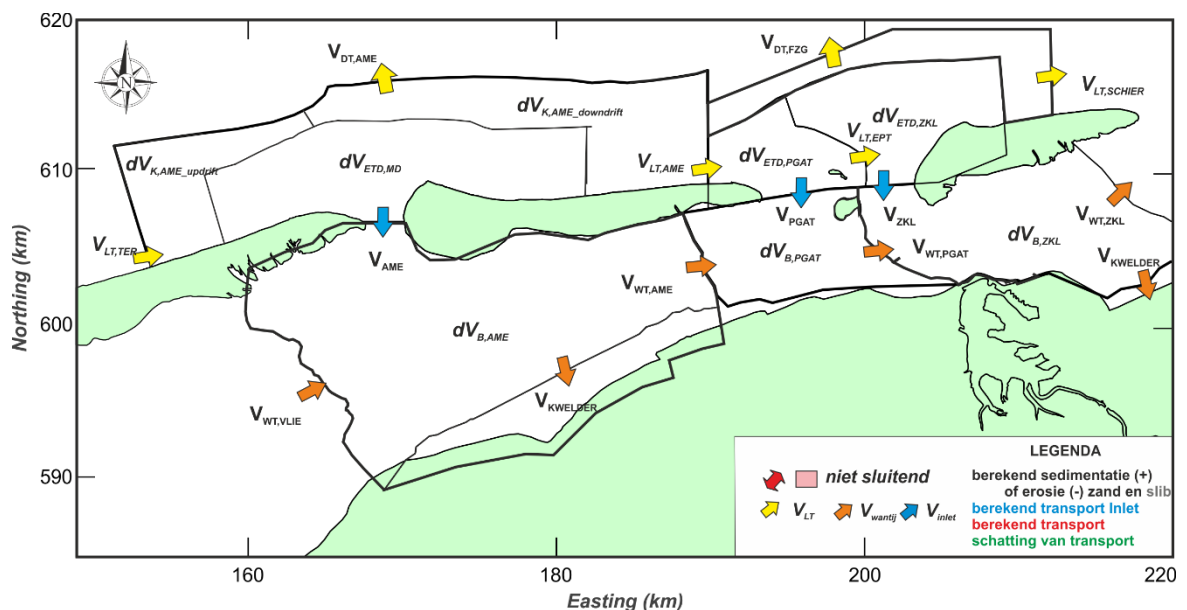


Figuur 5.5 Uitwerking van het grootschalige zandbalansmodel van de Westelijke Waddenzee op basis van de huidige trends en volledig meenemen van de suppletiehoeveelheden voor variant 1 en 2 (a,b). (c,d) Uitwerking variant 1 en 2 zonder suppletievolumes.

6 Invulling van het zandbalansmodel Oostelijke Waddenzee

6.1 Conceptuele uitwerking van de zandbalans Oostelijke Waddenzee

In deze uitwerking gebruiken we de verschillende schaalniveaus van volumeveranderingen om de onbekende variabelen van het zandbalansmodel op te lossen (zie Figuur 6.1). Het Friesche Zeegat is onderverdeeld in de afzonderlijke delen Pinkegat en Zoutkamerplaag.



Figuur 6.1 Samenvatting van de variabelen in het zandbalansmodel van de Oostelijke Waddenzee.

Als basis aannamen voor onderstaande zandbalansen geldt:

1. Er vindt initieel geen uitwisseling plaats richting diep water ($V_{DT} = 0$).
2. Er vindt geen sediment-bypassing plaats over de buitendelta.
3. Alle volumes zijn gecorrigeerd voor winst- en verliesposten zoals weergegeven in Tabellen 4.1-4.3. Correcties voor Pinkegat en Zoutkamperlaag zijn gebaseerd op de onderlinge verhouding in oppervlakte.
4. Als aanname voor de langtransporten gebruiken we dat er een maximaal transport is dat varieert over de eilanden volgens Figuur 3.1.
5. Het transport over het wantij van Ameland $V_{WT,VLIE}$ is gebaseerd op de uitwerking van de Westelijke Waddenzee.
6. Verliezen naar de kwelders zijn geschat of $0.04 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ bij Ameland, $0.05 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ bij het Pinkegat en $0.06 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ bij de Zoutkamperlaag.

6.2 Langetermijntrends

Zeegat van Ameland

De grootschalige zandbalans kan dan als volgt worden opgeschreven.

$$dV_{B,AME} = V_{AME} + (V_{WT,VLIE} - V_{WT,AME}) - V_{KWELDER}$$

en vanuit de kustzone

$$-dV_{K,AME} = V_{AME} + (V_{LT,TER} - V_{LT,AME}) + V_{DT,AME}$$

Om deze 2 vergelijkingen te kunnen oplossen hebben we aannamen nodig van de langstransporten of de transporten over de wantijen. We kunnen deze (gedeeltelijk) afleiden uit de gedetailleerde volumeveranderingen. In de middelste deelfiguur van Figuur 6.2 wordt deze invulling gegeven. In deze deelfiguur gebruiken we trendwaarden die gecorrigeerd zijn voor bodemdaling en andere winst- en verliesposten.

Vanuit de systeemkennis van het zeegat van Ameland weten we dat er 2 min-of-meer gescheiden deelsystemen aanwezig zijn. Het zuidelijke deel van het bekken wisselt rechtstreeks zand uit met het Boschgat welke weer gevoed wordt door de zandtransporten in de kustzone. Dit systeem wordt gescheiden door het Westgat van het Borndiep. Het Borndiep verbindt het Oostelijke deel van het bekken met de buitendelta (zeewaarts van Westgat).

De volumeverandering in het bekken bedraagt 1.25 Mm³/jaar. Dit zand wordt geleverd door de keel van het zeegat en over het wantij van het Vlie ($V_{WT,VLIE}$). De transporten over het wantij van Ameland zijn waarschijnlijk beperkt, aangezien de aanzanding aan beide kanten van dit wantij zeer klein is ($V_{WT,AME} = 0$).

Onder de aanname dat het transport $V_{WT,VLIE} = 0.34 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (zie uitwerking Westelijke Waddenzee), geeft dit een maximaal transport door het zeegat van Ameland van:

$$V_{AME} = dV_{B,AME} - (V_{WT,VLIE} - V_{WT,AME}) + V_{KWELDER}$$

$$V_{AME} = 1.21 - (0.34 - 0) + 0.04$$

Het transport door het zeegat is dan gelijk aan $V_{AME} = 0.91 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Aan de zeezijde vind er een transport van west naar oost plaats. De erosie van de downdrift zijde van de kust ($dV_{K,AME_downdrift}$) is waarschijnlijk gekoppeld aan een oostwaarts transport. Dit langtransport is dan minimaal gelijk aan: $V_{LT,AME} = dV_{K,AME_downdrift} = 0.60 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Deze waarde is inclusief suppleties en correctie voor bodemdaling.

Invullen van de zandbalans voor de kust geeft dan:

$$V_{LT,TER} = V_{AME} + dV_{K,AME} + V_{LT,AME} + V_{DT,AME}$$

$$V_{LT,TER} = 0.91 - 0.35 + 0.60 + 0$$

$$V_{LT,TER} = 1.16 \text{ Mm}^3/\text{jaar}.$$

Om de balans van het Zeegat van Ameland sluitend te krijgen moet er dus minimaal 1.16 Mm³/jaar aan zand binnengekomen zijn. Dit minimum gaat dus uit van geen sediment-bypassing over de buitendelta van het zeegat. Als er meer langtransport plaatsvindt dan zal er

in onze uitwerking sediment-bypassing optreden en het teveel aan zand zal dan via het langtransport afgevoerd worden. $V_{LT,AME}$ neemt dus met een gelijke waarde als $V_{LT,TER}$ toe.

Friesche Zeegat

De zandbalans van het Friesche Zeegat kan worden geschreven als:

$$V_{FZG} = V_{PGAT} + V_{ZKL}$$

waarin voor het bekken geldt dat:

$$V_{PGAT} = dV_{B,PGAT} + (V_{WT,PGAT} - V_{WT,AME}) + V_{KWELDER}$$

$$V_{ZKL} = dV_{B,ZKL} + (V_{WT,ZKL} - V_{WT,PGAT}) + V_{KWELDER}$$

en vanuit de kustzone

$$V_{PGAT} = -dV_{K,PGAT} + (V_{LT,AME} - V_{LT,EPT}) + V_{DT,PGAT}$$

$$V_{ZKL} = -dV_{K,ZKL} + (V_{LT,EPT} - V_{LT,SCHIER}) + V_{DT,ZKL}$$

$V_{LT,AME}$ volgt uit het zandbudget van Ameland en is $0.60 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Daarnaast is de aanname dat het transport over het wantij bij Ameland ($V_{B,AME}$) gelijk is aan 0 en er geen verliezen in dwarsrichting optreden. Invulling van deze waarden geeft:

$$V_{PGAT} = dV_{B,PGAT} + (V_{WT,PGAT} - V_{WT,AME}) + V_{KWELDER}$$

$$V_{PGAT} = 0.57 + (0 - 0) + 0.05 = 0.62 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$$

$$V_{PGAT} = \mathbf{0.62 \text{ Mm}^3/\text{jaar}}$$

Dit betekent voor de kustzone dat:

$$V_{LT,EPT} = 0.60 - 0.42 - 0.62$$

$$V_{LT,EPT} = \mathbf{-0.44 \text{ Mm}^3/\text{jaar}}$$

Uit deze balans kan geconcludeerd worden dat er een transport vanaf de buitendelta richting het Pinkegat moet zijn opgetreden. Op zich zou dit nog wel mogelijk zijn. Een heroriëntatie van de geulen en platen op de buitendelta kan netto transporten in westelijke richting geven (tegenovergesteld aan het overheersende golfklimaat). We krijgen echter wel een knelpunt als we de balans van de Zoutkamerplaag verder uitwerken. Deze balans kan geschreven worden als:

$$\begin{aligned} -dV_{K,ZKL} + (V_{LT,EPT} - V_{LT,SCHIER}) + V_{DT,ZKL} &= dV_{B,ZKL} + (V_{WT,PGAT} - V_{WT,SCHIER}) + V_{KWELDER} \\ 1.43 + (-0.44 - V_{LT,SCHIER}) + V_{DT,ZKL} &= 1.34 + V_{WT,SCHIER} + 0.06 \end{aligned}$$

Onder de aanname dat

$V_{DT,ZKL} = 0$ en $V_{WT,SCHIER} = 0$ geeft dit een transport $V_{LT,SCHIER} = \mathbf{-0.42 \text{ Mm}^3/\text{jaar}}$.

Deze balans lijkt niet sluitend. De som van de langtransporten langs de kust en over het wantij van Schiermonnikoog zou volgens deze uitwerking een netto westwaarts transport moeten opleveren van $0.42 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Dit transport lijkt niet waarschijnlijk gezien het overheersende Oostelijke gericht wind en golfklimaat. Men kan ook concluderen dat er voor een sluitende balans een groter langtransport het balansgebied in moet komen. Dit zou betekenen dat $V_{LT,AME}$ minimaal $\mathbf{1.02 \text{ Mm}^3/\text{jaar}}$ moet zijn en $V_{LT,TER}$ minimaal $\mathbf{1.58 \text{ Mm}^3/\text{jaar}}$. Deze zandbalans wordt weergegeven in Figuur 6.2d. Ook door toevoeging van slib kan een sluitende balans

worden verkregen. Doordat slib de hoeveelheid zand sedimentatie in het bekken reduceert, nemen de langstransporten evenredig toe. In figuur 6.3 wordt een uitwerking getoond met een aanname van 20% slib in het bekken. Deze uitwerking is ook vrijwel in evenwicht.

Tabel 6.1 geeft de overige resultaten van een gevoeligheidsberekening naar de verschillende oplossingsrichtingen van de zandbalans. Uit deze simulaties volgt dat alleen scenario's met hoog langtransport schattingen van de transporten geven die overeenstemmen met de verwachting van een netto oostwaarts langtransport. In Figuur 6.3 is een identieke uitwerking gegeven voor een slibpercentage van 20%. De verschillen tussen deze 2 varianten zijn beperkt.

Tabel 6.1 *Uitwerking van het zandbalans model voor verschillende oplossingen van langstransporten en transporten over de wantijen. Aannamen zijn weergegeven met groene velden.*

Zeegat	Parameter	Basis		Variant 1			Variant 2			Variant 3	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$V_{LT,TER}$	1,16	1,58	1,50	2,00	3,00	1,50	2,00	3,00	2,05	
	$V_{WT,VLIJ}$	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	
AME	$V_{LT,AME}$	0,60	1,02	0,60	0,60	0,60	1,50	1,50	1,50	1,14	
	$V_{DT,AME}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	V_{AME}	0,91	0,91	1,59	2,09	3,09	0,69	1,19	2,19	0,91	
	$V_{WT,AME}$	0,00	0,00	0,34	0,84	1,84	-0,56	-0,06	0,94	0,00	
PGAT	V_{PGAT}	0,62	0,62	0,28	-0,22	-1,22		0,68	-0,32	0,62	
	$V_{LT,EPT}$	-0,44	-0,02	-0,10	0,40	1,40		0,40	1,40	0,57	
	$V_{WT,PGAT}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	
ZKL	V_{ZKL}	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40		1,40	1,40	1,40	
	$V_{LT,Schier}$	-0,42	0	-0,08	0,43	1,43		0,43	1,43	0,60	
	$V_{WT,ZKL}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	

	opgelegde randvoorwaarde
	knelpunt in berekening

Uitwerking:

Variant 1 en 2; gebruiken het berekende langtransport bij Ameland om terug te rekenen wat de langstransporten bij Terschelling moeten zijn:

(1). Basis zie uitleg en Figuur 6.2. Aanname: $V_{LT,AME} = 0.60 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

(2). Aanname: $V_{LT,TER} = 1.58 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en $V_{LT,AME} = 1.02 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Variant 1: (3) $V_{LT,TER} = 1.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en $V_{LT,AME} = 0.60 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

(4) $V_{LT,TER} = 2.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en $V_{LT,AME} = 0.60 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

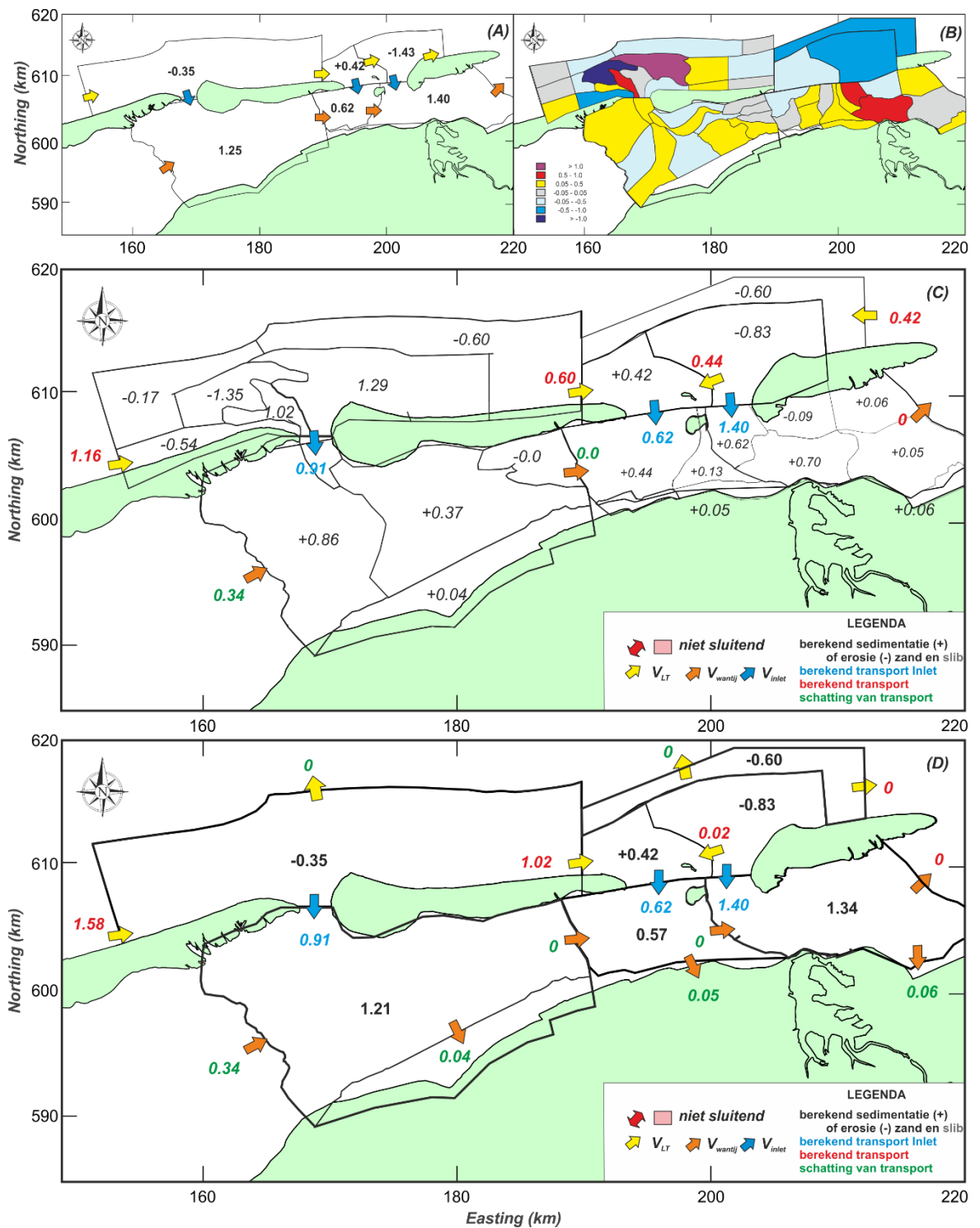
(5) $V_{LT,TER} = 3.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en $V_{LT,AME} = 0.60 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Variant 2: (6) $V_{LT,TER} = 1.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en $V_{LT,AME} = 1.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

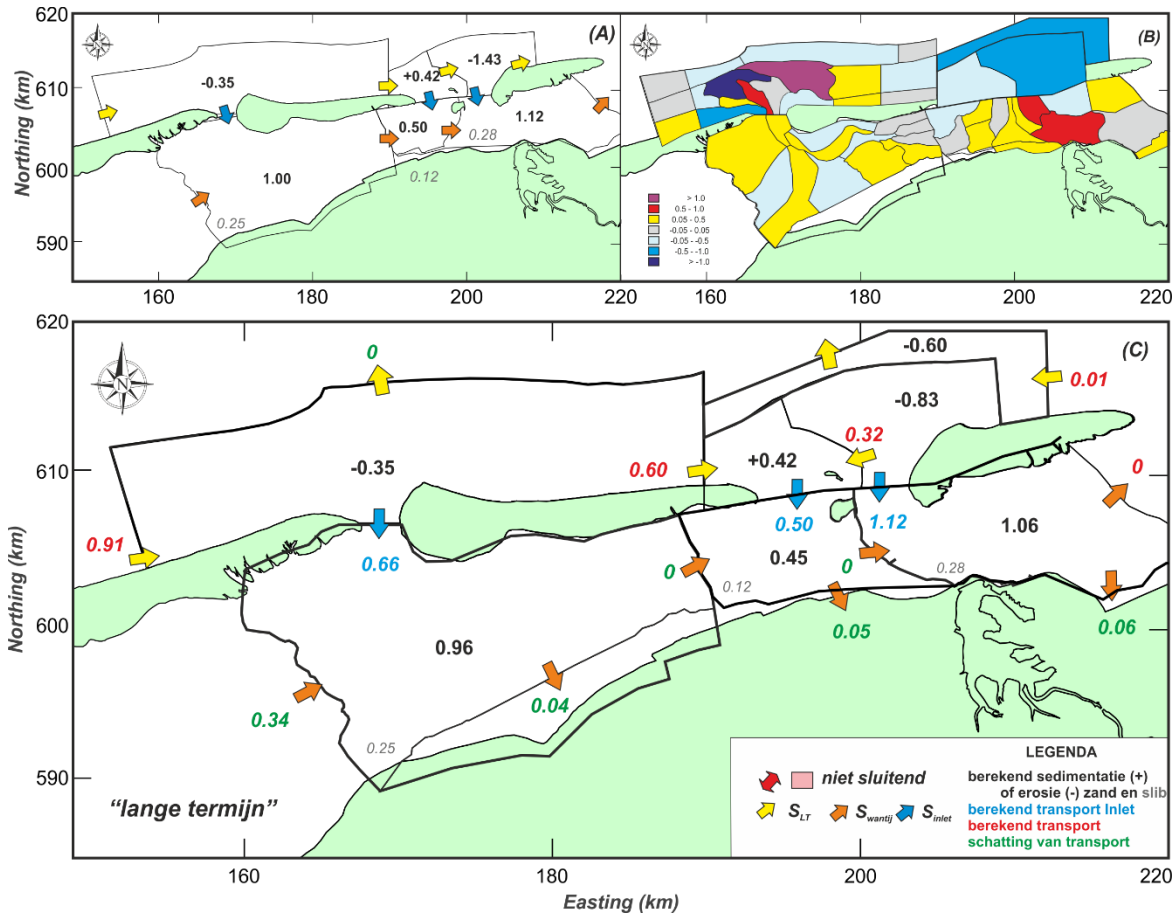
(7) $V_{LT,TER} = 2.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en $V_{LT,AME} = 1.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

(8) $V_{LT,TER} = 3.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en $V_{LT,AME} = 1.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Variant 3: (9) $V_{LT,SCHIER} = 0.60 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$



Figuur 6.2 Uitwerking een zandbalansmodel van de Oostelijke Waddenzee op basis van de lange-termijn trends (in $Mm^3/jaar$) voor 2 uitwerkingen (zie tekst voor uitleg).



Figuur 6.3 Uitwerking een zandbalansmodel van de Oostelijke Waddenzee op basis van de lange-termijn trends inclusief een slib percentage van 20%.

6.3 Huidige trends

Zeegat van Ameland

Als basis voor de huidige trend gebruiken we ook hier de vergelijkingen:

$$dV_{B,AME} = V_{AME} + (V_{WT,VLIE} - V_{WT,AME}) - V_{KWELDER}$$

en vanuit de kustzone

$$-dV_{K,AME} = V_{AME} + (V_{LT,TER} - V_{LT,AME}) + V_{DT,AME}$$

Om deze vergelijkingen te kunnen oplossen hebben we aannamen nodig van de langstransporten of de transporten over de wantijen. We kunnen deze (gedeeltelijk) afleiden uit de gedetailleerde volumeveranderingen. In de middelste deelfiguur van Figuur 6.4 wordt deze invulling gegeven. In deze deelfiguur gebruiken we trendwaarden die gecorrigeerd zijn voor bodemdaling en andere winst- en verliesposten.

De volumeverandering in het bekken bedraagt 1.63 Mm³/jaar. Dit zand wordt geleverd door de keel van het zeegat en over het wantij van het Vlie ($S_{WT,VLIE}$). De transporten over het wantij van Ameland kunnen worden afgeschat aan de hand van de verliezen in het oostelijke deel van het bekken: $V_{WT,AME} = 0.10 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Vanuit de Westelijke Waddenzee weten we dat $V_{WT,VLIE} = 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Dit geeft dan:

$$\begin{aligned} V_{AME} &= dV_{B,AME} - (V_{WT,VLIE} - V_{WT,AME}) + V_{KWELDER} \\ V_{AME} &= 1.59 - (0.50 - 0.10) + 0.04 \\ V_{AME} &= 1.23 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \end{aligned}$$

Aan de zeezijde vind er een transport van west naar oost plaats. De erosie van de downdrift zijde van de kust ($dV_{K,AME_downdrift}$) is waarschijnlijk gekoppeld aan een oostwaarts transport. De suppleties langs de kust van Ameland zijn voor 75% toegerekend aan dit kustvak. Het is waarschijnlijk dat het merendeel van het gesuppleerde zand ook daadwerkelijk oostwaarts verplaatst. Dit langstransport is dan minimaal gelijk aan **1.62 Mm³/jaar**. Door de vele suppleties die hier recent zijn uitgevoerd zijn ligt deze waarde veel hoger dan de 0.60 Mm³/jaar die volgt uit de langetermijn uitwerking. Onder de aanname dat er geen dwarsverliezen optreden, is de waarde van het benodigde langstransport bij Terschelling terug af te leiden:

$$\begin{aligned} V_{LT,TER} &= V_{AME} + dV_{K,AME} + V_{LT,AME} + V_{DT,AME} \\ V_{LT,TER} &= 1.23 - 1.84 + 1.62 + 0 \\ V_{LT,TER} &= 1.01 \text{ Mm}^3/\text{jaar} \end{aligned}$$

Friesche Zeegat

De zandbalans van het Friesche Zeegat kan dan worden geschreven als:

$$V_{FZG} = V_{PGAT} + V_{ZKL}$$

waarin

$$\begin{aligned} V_{PGAT} &= dV_{B-PGAT} - (V_{WT,AME} - V_{WT,PGAT}) + V_{KWELDER} \\ V_{PGAT} &= -0.15 - (0.10 - V_{WT,PGAT}) + 0.05 \\ V_{PGAT} &= -0.20 + V_{WT,PGAT} \end{aligned}$$

Vanuit de kustzone volgt dat

$$V_{PGAT} = 0.14 + 1.62 - V_{LT,EPT}$$

Zowel het bekken als de buitendelta hebben hier een overschot aan zand. We gaan er vanuit dat er daarom netto geen uitwisseling door de keel van het zeegat optreedt ($V_{PGAT} = 0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$). Dit geeft dan dat:

$$V_{WT,PGAT} = 0.20 \text{ Mcm/jaar}$$

$$V_{LT,EPT} = 1.76 \text{ Mcm/jaar}$$

De zandtransporten voor de Zoutkamperlaag volgen uit:

$$V_{ZKL} = -dV_{K,ZKL} + (V_{LT,EPT} - V_{LT,SCHIER}) + V_{DT,ZKL}$$

$$V_{ZKL} = dV_{B,ZKL} + (V_{WT,ZKL} - V_{WT,PGAT}) + V_{KWELDER}$$

Vanuit het bekken geredeneerd moet de minimale sedimentimport (onder de aanname $V_{WT,ZKL} = 0$) hier dan zijn:

$$V_{ZKL} = 0.39 + (V_{WT,SCHIER} - 0.20) + 0.06$$

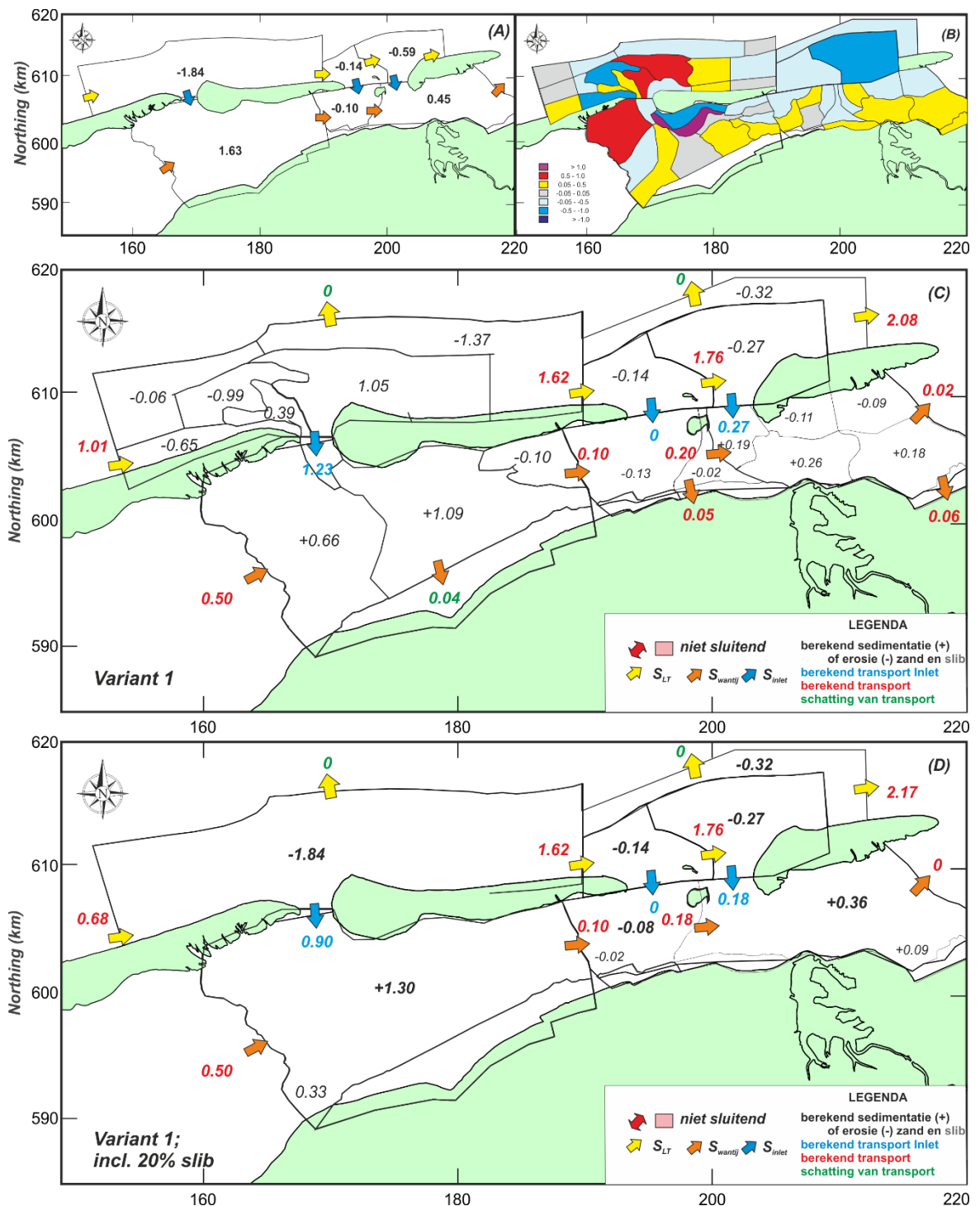
De totale erosie van de buitendelta ($-0.59 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$) is ruim voldoende om aan de zandvraag te voldoen. Als we er vanuit gaan dat de verliezen in de kustzone oostwaarts verplaatst worden geeft dit een schatting voor het langstransport:

$$V_{LT,SCHIER} = 1.76 + 0.32 = 2.08 \text{ Mm}^3/\text{jaar}.$$

en dan volgt

$$V_{ZKL} = 0.27 \text{ Mcm/jaar} \text{ en } V_{WT,SCHIER} = 0.02 \text{ Mcm/jaar}$$

De resultaten van uitwerking Figuur 6.4. De onderste deelfiguur geeft hier de resultaten onder de aanname van 20% slib in het bekken.



Figuur 6.4 Uitwerking een zandbalansmodel van de Oostelijke Waddenzee op basis van de huidige trends (in $Mm^3/jaar$) voor variant 1 (C) en variant 1 incl. 20% slib (D).

In Tabel 6.2 worden verschillende oplossingsrichtingen van het zandbalansmodel weergegeven. De basis 1 volgt bovenstaande uitwerking, waarbij basis 2 in dit resultaat de maximale langtransportverdeling weergeeft. Uitwerking van het zandbalansmodel, variant 1, neemt een constant langtransport aan van 1.62 Mm³. Uit deze uitwerking volgt al snel dat de sedimentimporten groter zijn dan de vraag door het bekken. Dit zou betekenen dat er onrealistisch grote transporten over de wantijen moeten optreden. Het is ook mogelijk dat er een dwarstransport optreedt uit de kustpolygoon waarbij verliezen zeewaarts moeten optreden om aan alle eisen van het zandbalansmodel te voldoen. Dit is verder uitgewerkt in Variant 2.

Tabel 6.2 Uitwerking van het zandbalans model voor verschillende oplossingen van langtransporten en transporten over de wantijen. Aannamen zijn weergegeven met groene velden.

Zeegat	Parameter	Basis		Variant 1			Variant 2				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$V_{LT,TER}$	1,01	1,01	1,50	2,00	3,00	0,50	1,00	1,50	2,00	3,00
	$V_{WT,VLIE}$	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
AME	$V_{LT,AME}$	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	0,71	1,21	1,71	2	2
	$V_{DT,AME}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0,21	1,21
	V_{AME}	1,23	1,23	1,72	2,22	3,22	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63
	$V_{WT,AME}$	0,10	0,10	0,59	1,09	2,09	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
PGAT	V_{PGAT}	0,00	-0,20	-0,69	-1,19	-2,19	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
	$V_{LT,EPT}$	1,76	1,50	1,5	1,5	1,5	0,95	1,45	1,5	1,5	1,5
	$V_{DT,PGAT}$	0,00	0,46	0,95	1,45	2,45	0,0	0,0	0,45	0,74	0,74
	$V_{WT,PGAT}$	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
ZKL	V_{ZKL}	0,27	0,47	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
	$V_{LT,Schier}$	2,08	1,00	1	1	1	1,09	1	1	1	1
	$V_{DT,ZKL}$	0	0,62	0,64	0,64	0,64	0	0,09	0,64	0,64	0,64
	$V_{WT,ZKL}$	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

	opgelegde randvoorwaarde
	knelpunt in berekening

Uitwerking:

(1). Basis zie uitleg en Figuur 6.2. Aanname: $V_{LT,TER} = 1.01 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$, $V_{LT,AME} = 1.62 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

(2). Basis 2 = Basis 1 inclusief maximale langtransporten zoals weergegeven in Tabel 4.8 en Tabel 4.9.

Variant 1: (3) $V_{LT,TER} = 1.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en $V_{LT,AME} = 1.62 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

(4) $V_{LT,TER} = 2.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en $V_{LT,AME} = 1.62 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

(5) $V_{LT,TER} = 3.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en $V_{LT,AME} = 1.62 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Variant 2: Aanname: max. $V_{WT,AME} = 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$, $V_{WT,PGT} = 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$, $V_{WT,ZKL} = 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$,

(6) $V_{LT,TER} = 0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

(7) $V_{LT,TER} = 1.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

(8) $V_{LT,TER} = 1.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

(9) $V_{LT,TER} = 2.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

(10) $V_{LT,TER} = 3.00 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

7 Discussie

7.1 Schatting van de volumeverandering van de Waddenzee.

Methodes

In deze studie gebruiken we een trendlijnanalyse om een “beste” schatting te maken van de opgetreden volumeveranderingen per deelgebied. Door middel van de trendlijnanalyse zijn we in staat schattingen te maken van het volumeverloop op lange termijn en voor de huidige trend. De trendlijnanalyse is op 2 verschillende manieren uitgevoerd. Voor de Westelijke Waddenzee is de methode gebaseerd op de gedetailleerde polygonen van sedimentatie en erosie zoals beschreven in Elias (2018a). Deze methode is hier geschikt vanwege het lineaire verloop van de sedimentatie-erosie tijdseries; er is een duidelijke trend die overheerst over de dynamiek. Hierdoor zijn er zonder verdere bewerking van de meetdata al nauwkeurige trendlijnen te bepalen.

De Oostelijke Waddenzee is minder geschikt voor deze methode. Zelfs bij een gedetailleerde indeling in deelpolygonen vertonen de individuele sedimentatie-erosie tijdseries hier een grillig verloop. Dit grillige verloop komt enerzijds door de variabiliteit/dynamiek in natuurlijke ontwikkeling, maar komt ook door onnauwkeurigheden in de bodemmetingen. Het fluctuerende verloop in de tijdseries van netto volumeverandering maakt de trendlijnanalyse onnauwkeurig. Aanvullende analyses zijn daarom uitgevoerd op de bruto volumeveranderingen, door een analyse van de afzonderlijke bijdragen van de sedimentatie en van de erosie per deelgebied. Deze bruto veranderingen vertonen een veel uniformer verloop in de tijd, waardoor de trendlijnen nauwkeuriger te bepalen zijn. Ook is het nu mogelijk duidelijke uitschieters te identificeren en uit te sluiten in de analyse. Een nadeel van deze methode is dat de 2 componenten (erosie en sedimentatie) als onafhankelijke variabelen worden beschouwd. De trendlijnanalyse wordt op 5 manieren uitgevoerd, met toenemende mate van correctie van de meetdata en resulteert dan in 5 schattingen van de trend in volumeverandering. Als alle 5 de getallen ongeveer gelijk zijn, dan betekent dit dat de meetdata weinig uitschieters vertoont. En is de bepaalde trend robuust. Een grote variatie in de 5 trendwaarden betekent dat er (grote) correcties nodig waren. Dit kan een indicatie zijn van onnauwkeurige meetdata, of zeer grote dynamiek van het gebied. Op basis van ‘expert judgement’ wordt de meest betrouwbare schatting gekozen.

Resultaten

De resulterende trends van volumeverandering worden per zeegat weergegeven in Figuur 7.1, waarin deelfiguur a,b de langetermijntrends weergeven en deelfiguur c,d de trends voor het huidige gedrag. De trendlijnen zijn in deze studie per kombergingsgebied bepaald zodat deze het morfologische gedrag op zowel langetermijn en voor de huidige trend optimaal benaderen. Dit betekent wel dat de periode van de trendlijnbepaling per deelgebied kan afwijken. Gedeeltelijk kunnen deze afwijkingen worden verklaard door verschillen in respons op grootschalige veranderingen (zoals afsluiting van de Zuiderzee), maar ook de verschillen in periode en (on)nauwkeurigheid tussen de opname van de deelgebieden speelt een rol. De langetermijntrends in de Westelijke Waddenzee zijn voor zowel bekken als kustzone afgeleid over de periode 1933-2015. Het huidige gedrag is hier gebaseerd op de periode waarin de grootschalige aanpassing aan de gevolgen van de afsluiting van de Zuiderzee is uitgedempt. Voor de kustzone geeft dit de periode 1997-2015 en voor het bekken is dit 1991-2015. In de Oostelijke Waddenzee is de langetermijntrend gebaseerd op de periode 1926/1948 – 2012/2015 en de huidige trend op de periode 1989 – 2012/2015. Voor de buitendelta van het

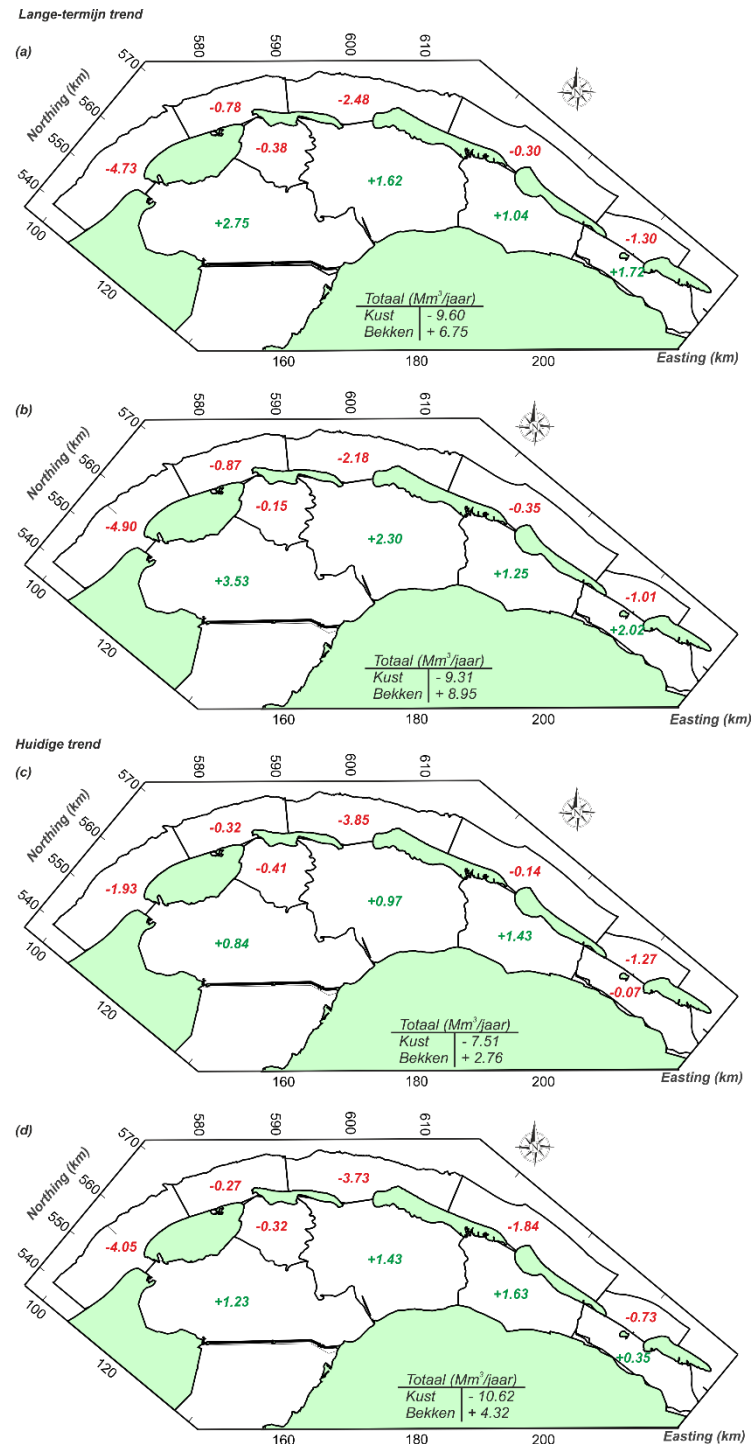
zeegat van Ameland is er voor gekozen de 1926 bodem niet te gebruiken in de trendlijnanalyse. Deze bodem lijkt met name in de kustzone onrealistisch te zijn. Het niet meenemen van deze bodem verklaart voor een groot deel het verschil in gevonden bodemverandering tussen de huidige studie (-0.30 mcm/jaar) ten opzichte van de eerder gerapporteerde waarde van +1.36 Mm³/jaar (Elias et al., 2012; Wang et al., 2018).

Puur op basis van de trends in volumeverandering kan worden geconcludeerd dat de kustzone in totaal 9.6 Mm³/jaar aan zand heeft verloren (Figuur 7.1a). Hiervan is 6.8 Mm³/jaar (71%) gesedimenteerd in het bekken. Alle kustpolygonen (kust is hier inclusief buitendelta) verliezen sediment. De grootste verliezen (75% van het totaal) treden op bij het Zeegat van Texel en het Vlie. Met uitzondering van het Eierlandse Gat vertonen de bekkens een aanwas van sediment, waarbij de grootste sedimentatie, bijna 40%, in het bekken van het Marsdiep optreedt. Correctie van de trends met schattingen voor bodemdaling en overige winst- en verliesposten geeft een realistischer beeld van de werkelijk opgetreden volumeveranderingen (Figuur 7.1b). Met name bodemdaling heeft hier een belangrijke bijdrage. Implementatie van bodemdaling heeft als effect op de volumebalans dat het totale aanbod van zand vanuit de kustzone afneemt, terwijl in het bekken de sedimentatievolume groter wordt. De reductie van het zandaanbod van de kustzone is hier beperkt (van -9.6 naar 9,3 Mm³/jaar) doordat extra zandaanbod door de uitgevoerde suppleties de bodemdaling vrijwel geheel compenseert. In totaal zijn de erosie van de kustzone en de sedimentatie in het bekken op de langetermijn vrijwel in evenwicht (-9.3 Mm³/jaar versus 9.0 Mm³/jaar).

Trendwaarden representatief voor de huidige trends worden weergegeven in Figuur 7.1. deelfiguren c en d, respectievelijk voor de ongecorrigeerde en gecorrigeerde trends. Ook in de huidige situatie verliezen alle kustpolygonen zand en vindt er over het algemeen aanzanding plaats in het bekken. Het ongecorrigeerde sedimentaanbod van de kustzone is met -7.6 Mm³/jaar veel groter dan de sedimentvraag in het bekken van 2.8 Mm³/jaar (Figuur 7.1c). Deze onbalans zien we in de gecorrigeerde trends ook duidelijk terug; -10.6 Mm³/jaar versus 4.3 Mm³/jaar. Een gedeelte van deze onbalans is waarschijnlijk wel te verklaren door de methode van trendlijnbepaling en nauwkeurigheid van de bodems. Doordat we over een veel kleinere periode de trends bepalen, werken uitschieters in de bodemdata veel sterker door. Met name de grote verliezen in de kustzone van het zeegat van het Vlie (-3.85 Mm³) zijn verdacht. Gedeeltelijk ontstaat deze discrepantie ook door de uitgevoerde correctie voor suppleren en verlies naar de duinen. De suppletietrend is bepaald op basis van de suppletiedatabase en niet op basis van wat er in de bodem daadwerkelijk zichtbaar is. Dit laatste zal kleiner zijn; zo zal een gedeelte van het suppletie volume al rechtstreeks naar de duinen zijn verplaatst. Nabij de zeegaten zal er al een deel het bekken in getransporteerd zijn. Daarnaast zorgt de trendlijnbepaling er ook voor dat uitschieters in volume niet geheel terugkomen in de berekening. Naast het niet geheel correct op lossen voor suppleties is het ook aannemelijk dat de verliezen naar de eilanden onderschat worden. Met name op de eilandkoppen heeft er veel aanzanding in de duinen plaatsgevonden, die niet geheel in de duinverliezen tot uitdrukking lijken te komen. Zouden we de totale volumes in de kustzone berekenen zonder de suppletievolumes dan reduceert de erosie tot 5.4 Mm³/jaar. Vergelijken we deze erosie met de sedimentatie in het bekken (4.3 Mm³/jaar), dan geeft dat al een veel beter sluitende balans.

Ook voor de huidige (gecorrigeerde) trends zien we over het algemeen een verlies van zand vanuit de kustzone en een groei in het bekken. Uitzondering hierop is het Eierlandse Gat. Het Eierlandse Gat vertoont in alle uitwerkingen een verlies van zand van zowel de kustzone als het bekken. De huidige verliezen in de kustzone worden hierbij vrijwel geheel bepaald door de bodemdaling. In het bekken valt op dat de sedimentatie in het Marsdiep en Vlie sterk zijn gereduceerd t.o.v. de langetermijntrend. Op zich is dit wel begrijpelijk. Direct na afsluiting van

de Zuiderzee zijn de overgebleven, afgesloten, geulen snel ingevuld met sediment. Deze invulling neemt sterk af in de tijd.



Figuur 7.1 Overzicht van de lange-termijn trends (a,b) en huidige trends (c,d) in Mm³/jaar op basis van de ongecorrigeerde volumeveranderingen (a, c) en volumeveranderingen gecorrigeerd voor bagger, storten, bodemdaling en overige winst- en verliesposten (b,d).

7.2 Schatting van de lange-termijn zandtransporten in de Zeegaten van de Waddenzee.

Het zandbalansmodel geeft ons in principe een samenvatting van alle winst- en verliesposten zoals samengevat in Figuur 7.2a. Deze balans kunnen we uitwerken op verschillende schalen; het balansmodel is toepasbaar voor de individuele zeegaten (zie Hoofdstuk 5 en 6), maar ook voor de Waddenzee of kustzone als geheel. Afhankelijk van het schaalniveau worden dan meer of minder transportpaden zichtbaar. Bijvoorbeeld: onder de aanname dat er maar 1 transportpad (pijl) is, via het zeegat, naar een kombergingsgebied is het transport gelijk aan de in het kombergingsgebied bepaalde sedimentatie. Als er echter meerdere transportpaden zijn (nog 2 over de wantijen) dan ontstaat er, indien er geen additionele informatie beschikbaar is, een onder-gedefinieerd systeem (er zijn meer onbekenden dan vergelijkingen), wat leidt tot een grote suite aan mogelijke oplossingen. Een deel van deze onbekenden kunnen we oplossen door modelleringen, metingen en expert-judgement. Alleen als we de samenhang tussen de deelsystemen goed begrijpen en we dus vertrouwen hebben in de geschatte variabelen, dan heeft het zin om het zandbalansmodel in detail op te lossen.

Op de lange termijn zijn de erosie van de kustzone en de sedimentatie van het bekken vrijwel in evenwicht (Figuur 7.2a,b). Op de grootste schaal kunnen we het zandbalansmodel dan invullen volgens Figuur 7.2b,c. Met een schatting van $0.5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ toevoer vanaf de kust van Noord-Holland en een oostwaarts transport over het wantij van $0.2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$, dan kunnen we berekenen dat de totale sedimentimport van de Waddenzee $9.2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ bedraagt. Er moet dan tevens een verlies van $0.66 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ uit de kustzone zijn opgetreden. Een gedeelte hiervan kan zeewaarts verplaatst zijn, met name rond de buitendelta's zijn dit soort verliezen wel mogelijk, meer een deel zal ook als langtransport het balansgebied bij Schiermonnikoog verlaten. De zeewaartse verliezen zijn hier ingevuld met $0,5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en de langsverliezen met $0.2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Zowel de langsverliezen bij Schiermonnikoog, maar ook de instroom van $0.50 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ lijken aan de kleine kant. De waarde van $0.5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ is gebaseerd op de studie van Van Rijn (1997). Recente inzichten vanuit het Kustgenese 2 programma en vanuit de in deze studie gepresenteerde resultaten geven aan dat de langtransporten veel groter kunnen zijn dan tot op heden is aangenomen. Als we uitgaan van een influx van $1.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en gelijke uitwerking van het zandbalansmodel krijgen we een transport van $0.7 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ bij Schiermonnikoog. Dit lijkt op zich een realistische schatting. De transporten door de zeegaten veranderen onder deze aanname niet.

Dit grootschalige balansmodel geeft ons wel de totale aanzanding, maar niet de verdeling van de transporten over de zeegaten. Deze invulling kunnen we wel afleiden vanuit de detail balansmodellen zoals gepresenteerd in H.5 en H.6. In onze uitwerking van de zeegaten Marsdiep, Eierlandse Gat en Vlie gaan we er vanuit dat er $0.5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ binnenkomt langs de kust van Noord-Holland. De resultaten worden samengevat in Figuur 7.2d en Tabel 7.1.

Marsdiep

In ons balansmodel zijn de transporten door Marsdiep rechtstreeks gecorreleerd aan het zandaanbod van de kustzone. Hierin ligt de volumeverandering vast, maar moet de aanvoer langs de Hollandse kust worden gekozen. De aanname is hier dat er een toevoer is van $V_{LT,NH} = 0.5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Op basis van literatuur en de geobserveerde bodemveranderingen worden de transporten langs de kust van Texel worden geschat op $1.0\text{-}1.3 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Dit geeft dan een geschat transport door het zeegat van $4.0 - 4.4 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Deze import is groter dan het benodigde sedimentvolume in het bekken. De grote aanzanding van de Vlake van Oosterbierum (onderdeel van het zeegat van het Vlie) doet vermoeden dat hier het zeegat van Texel aan heeft bijgedragen. Op basis van de data, word deze bijdrage geschat op ongeveer $1.0 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. De grotere waarde van zandimport $4.4 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ sluit hier goed op aan. Dit geeft

verder een transport over het wantij van 0.9 Mm³/jaar, waarbij we er van uit gaan dat 0.25 Mm³/jaar uitwisselt via het Eierlandse Gat en 0.6 Mm³/jaar rechtstreeks.

Eierlandse Gat

Het Eierlandse Gat is het enige zeegat dat zowel in de kustzone als in het bekken erodeert. De sedimentexport ligt op 0.15 Mm³/jaar voor de langetermijn. In de kustzone treedt hier een grote erosie op van 0.9 Mm³/jaar. Dit geeft een totaal zandaanbod van 2.0 Mm³/jaar. Het lijkt onwaarschijnlijk dat de langtransporten langs de kust van Vlieland zo groot zijn. Hier gaan we uit van de maximum waarde van 1.5 Mm³/jaar (deze is iets hoger dan bekend uit de literatuur), dan moet er een aanvullend verlies opgetreden van 0.5 Mm³/jaar. Dit verlies kan bestaan uit verliezen naar diep water, maar ook verliezen naar het eiland, de Vliehors op en de duinen in. Deze onzekerheid heeft geen effect op de voorspelling voor de transporten door het zeegat.

Zeegat van het Vlie

Kijken we alleen naar het zeegat van het Vlie dan zien we dat de erosie van de kust en de sedimentatie van het bekken vrijwel in evenwicht zijn (2.2 versus 2.3 Mm³/jaar). Het bekken wordt echter ook gevoed door de transporten vanaf het wantij. Deze transporten dragen voor 0.9 Mm³/jaar bij in de balans. Gaan we uit van een gemiddeld verlies van 0.3 Mm³/jaar over het wantij van Terschelling, dan zou er een sedimentimport van 1.8 Mm³/jaar op moeten treden. Dit geeft verder een schatting van 1.9 Mm³/jaar voor de langtransporten langs het eiland van Terschelling. Deze waarde past binnen de bandbreedte van transportwaarden gebaseerd op de huidige kennis.

De invloed van slib op de Westelijke Waddenzee

In bovenstaande bewerking is geen rekening gehouden met het slibpercentage in de volumebalans. Doordat de transporten door het Marsdiep in essentie gebaseerd zijn op de uitwerking vanuit de kustzone, heeft het slibpercentage in het bekken geen directe invloed op de zandtransporten door het Marsdiep. Ook voor het Eierlandse Gat is de invloed beperkt doordat de getallen hier klein zijn (zie Tabel 7.1 voor uitwerking). De volumebalans van het Vlie vertoont echter een sterke respons doordat het slibpercentage dubbel doorwerkt in de uitwerking. Met een toenemend slibpercentage neemt het aandeel zand in de sedimentatievolumes van zowel het Vlie als van het Marsdiep af. Een afnemend volume in het Marsdiep resulteert in een toenemend transport over het wantij richting het Vlie. Het kleinere zandvolume wordt voor een groter deel vanuit het bekken ingevuld. De zandimport door het zeegat neemt dan ook sterk af. Met een slibpercentage van 8% neemt het transport over het wantij toe tot 1.2 Mm³/jaar en reduceert de zandimport door het Vlie tot 1.3 Mm³/jaar. Met een percentage van 20% zijn deze getallen respectievelijk 1.6 Mm³/jaar en 0.6 Mm³/jaar.

Ameland Zeegat

De onbalans tussen een klein erosievolume van de kustzone van Ameland maar de grote sedimentaanwas in het bekken geeft aan dat er een grote aanvoer van buiten het systeem moet plaatsvinden. Vanuit de bodemdata van het bekken zien we hier geen duidelijk aanwijzing dat er een grote aanvoer over het wantij optreedt. Op basis van de lokale volumeveranderingen was het transport eerder geschat op 0.3 Mm³/jaar. Met een geschat transport over het wantij van Ameland van 0.1 Mm³/jaar geeft dit 1.0 Mm³/jaar als schatting voor de sedimentimport door het zeegat. Deze waarde reduceert tot 0.8 Mm³/jaar voor een slibpercentage van 20%. De sedimentimport door het zeegat is groter dan de lokale erosie van de kustzone, dit betekent dat er een significante instroom van zand via de kustzone moet plaatsvinden. Voor een sluitende balans is er een minimale netto toevoer van 0.7 Mm³/jaar benodigd. Het aanbod van 1.8 Mm³/jaar zoals bepaald uit de balans van de Westelijke Waddenzee is hier ruimschoots voldoende. De totale verliezen uit het kustvak van Ameland zijn dan 1.1 Mm³/jaar. In onze

uitwerking word dit verder verdeelt als een zeewaarts verlies van 0.1 Mm³/jaar en een langstransport van 1.0 Mm³/jaar.

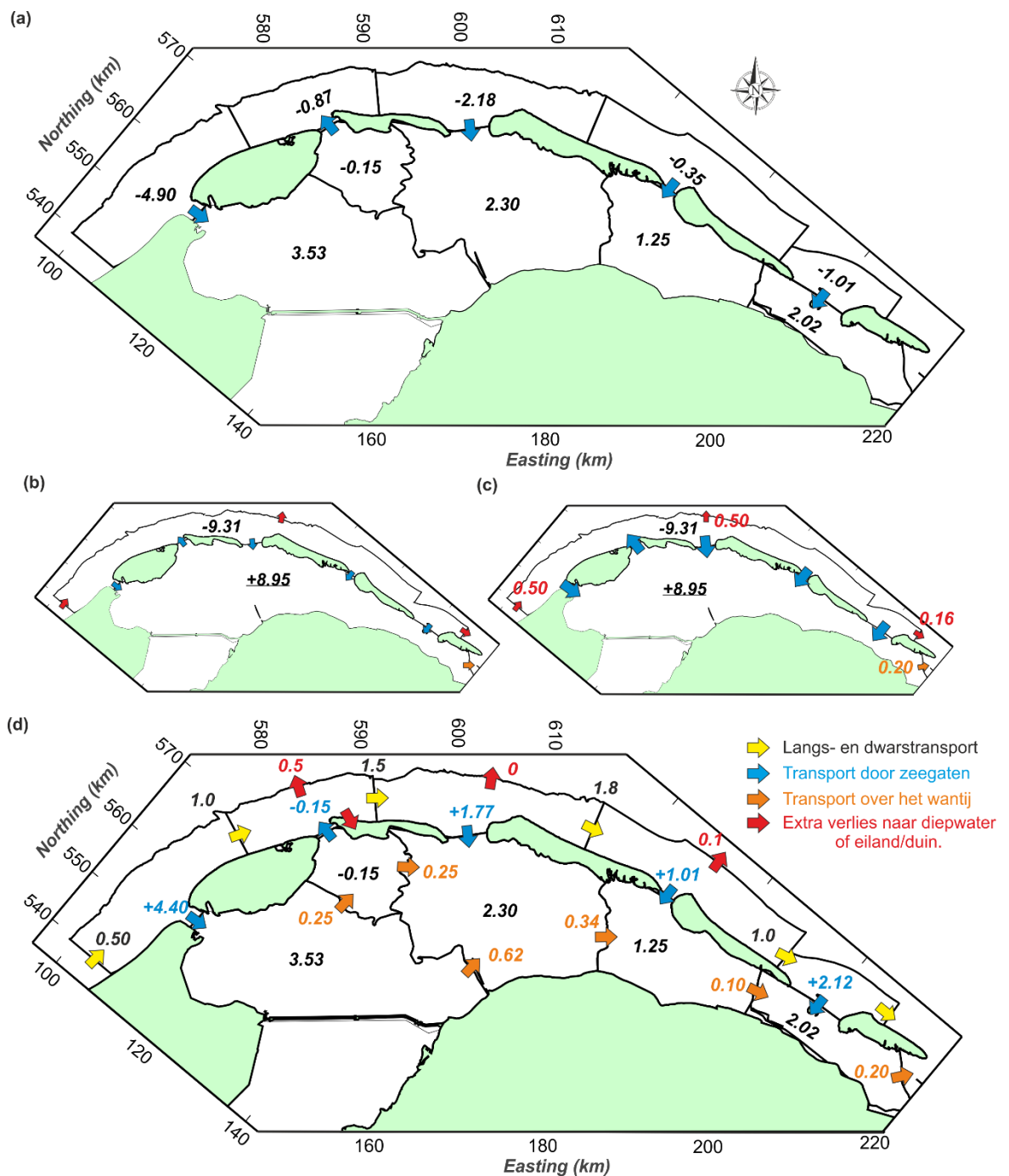
Friesche Zeegat

Ook het Friesche Zeegat vertoont een grote onbalans tussen een relatief klein erosievolume van de kustzone en een grote volumeverandering van het bekken. De netto import door het Pinkegat en de Zoutkamperlaag varieert hier tussen de 2.1 en 1.7 Mm³/jaar afhankelijk van het slibpercentage. Deze balans is net sluitend onder de aanname van 1.0 Mm³/jaar toevoer vanaf Ameland. Deze uitwerking geeft wel als resultaat dat er geen significant transport optreedt langs Schiermonnikoog. Dit lijkt niet geheel te kloppen met de werkelijkheid.

Op zich is deze discrepantie wel begrijpelijk. We weten dat er slibaanwinding heeft plaatsgevonden. Als we dit meenemen dan reduceert het zandverlies naar de Waddenzee. Daarnaast bestaat er uit de recente inzichten wat onzekerheid over de beginrandvoorwaarde van 0.5 Mm³/jaar opgelegd bij Noord-Holland. Deze waarde zou best wat hoger kunnen uitvallen. Beide effecten resulteren in een groter langstransport langs de kust.

Tabel 7.1 *Een schatting van de zandtransporten (minimum en maximum) door de zeegaten.*

Zeegat	Lange-termijn Trend		
	(Mm³/jaar)		
	0	8% slib	20% slib
Marsdiep	4.40	4.40	4.40
Eierlandse Gat	-0.15	-0.15	-0.15
Vlie	1.77	1.29	0.60
Ameland	1.01	0.91	0.76
Friesche Zeegat	2.12	1.96	1.72



Figuur 7.2 Een overzicht van het grootschalige zandbalansmodel representatief voor de langetermijntrends; (a) berekende volumeveranderingen gecorrigeerd voor ingrepen, (b + c) zandbalansmodel op Waddenzee schaal, (d) uitwerking zandbalansmodel Waddenzee op schaal van de zeegaten.

7.3 Schatting van de huidige zandtransporten in de Zeegaten van de Waddenzee.

Zoals vermeldt in vorige paragraaf bestaat het zandbalansmodel uit een samenvatting van alle winst- en verliesposten, en een weergave van de transportpaden. Gedeeltelijk zijn de getallen bekend uit de analyse, gedeeltelijk moeten we de onbekenden oplossen door modelleringen, metingen en expert-judgement. Het aantal onbekenden dat we moeten oplossen wordt groter naarmate we het systeem in meer detail beschouwen. In onze analyse moeten we een afschatting maken van het meest geschikte niveau van analyse. Het in meer detail oplossen van de het zandbalansmodel is alleen nuttig, als we vertrouwen hebben in de afgeschatte waarden.

Grootschalig kunnen we de huidige sedimentbehoefte afschatten door (1) de volumebalans van de kustzone op te lossen (Figuur 7.3b) of (2) de volumebalans van het bekken op te lossen (Figuur 7.3c). In de kustzone bestaat de volumebalans uit de optelsom van geobserveerde verandering van -10.62 mcm/jaar (erosie), de transporten door de zeegaten, het netto langstransport en eventuele dwarstransporten. Uit de analyse van Elias (2019) volgt dat de afschatting van deze transporten geen triviale taak is. Met een aanzanding van $+4.32$ miljoen m^3 /jaar in het bekken, zou dit betekenen dat er in totaal verlies van -6.30 miljoen m^3 /jaar moet optreden. Deze waarde is significant hoger is dan wat we op basis van de huidige kennis kunnen verklaren. Mogelijke oorzaken van deze discrepantie zijn het onderschatten van de verliezen naar de eilanden, het niet correct corrigeren voor het effect van suppleties en mogelijke onnauwkeurigheden in de bodemdata en daardoor ook de trendlijn bepaling.

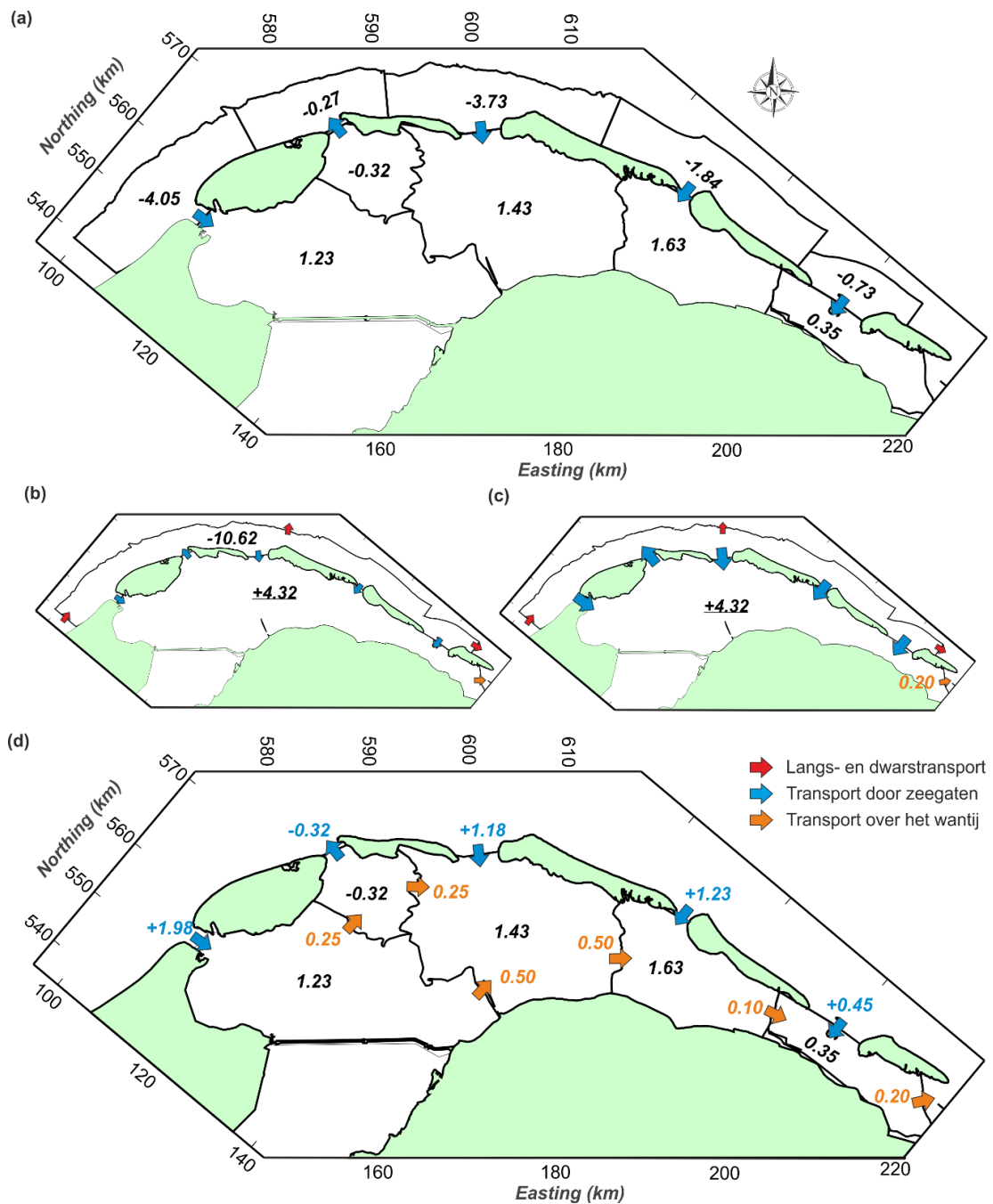
Een betrouwbare schatting voor het zandverlies naar de Waddenzee kan ook redenerend vanuit het bekken worden gevonden. De volumes zoals berekend vanuit de bodems vertonen hier betrouwbare en coherente trends. Daarnaast is er slecht 1 ongedefinieerde variabele in de vorm van de oostwaartse verliezen over het Groninger Wad.

Op basis van de opgetreden bodemveranderingen in de Waddenzee worden de oostwaartse transporten over het Groninger Wad geschat op 0.20 miljoen m^3 /jaar (Elias, 2019). Uitwerking van de volumebalans geeft dan een totale netto zandimport door alle zeegaten van $+4.5$ miljoen m^3 /jaar. Door aannamen te maken van de uitwisseling over de individuele wantijen kunnen we een schatting maken van de bijdrage per zeegat (Figuur 7.3d). De aannamen van de transporten over de wantijen zijn gebaseerd op de lokale volumeveranderingen nabij het wantij en expert judgement. Uit deze berekening volgt dat de grootste sedimentimport optreedt door het Zeegat van Texel ($+1.98$ Mm³/jaar). Het Eierlandse Gat is een exporterend systeem (-0.32 Mm³/jaar). Transporten door het Zeegat van het Vlie worden geschat op $+1.18$ Mm³/jaar, door het Zeegat van Ameland $+1.23$ Mm³/jaar en door het Friesche Zeegat $+0.45$ Mm³/jaar.

Tabel 7.2 Een overzicht van de transporten door de zeegaten voor het totale sediment en onder de aanname van een slib percentage van 8% en 20% (kolom zand volume). Positief = import en Negatief= export.

Zeegat	Sediment volume [miljoen m ³ /jaar]	Zand volume [miljoen m ³ /jaar]	
		Slib 8%	20%
Texel	+1.98	+1.88	+1.73
Eierlandse Gat	-0.32	-0.29	-0.26
Vlie	+1.18	+1.07	+0.89
Ameland	+1.23	+1.10	+0.90
Friesche Zeegat	+0.45	+0.42	+0.38
Totaal	+4.52	+4.17	+3.66

In de gepresenteerde volumebalans is niet specifiek gekeken naar het aandeel zand versus slib. Schattingen van het slibpercentage in de Waddenzee bodemvolumina liggen tussen de 8 en 37% (Oost et. al., 2018). Deze bandbreedte laat wel zien dat aanvullend onderzoek noodzakelijk is er nog een grote onzekerheid bestaat in deze getallen, waarvoor aanvullend onderzoek nodig is. In de gepresenteerde uitwerking hebben we de volumes van de bekkens gereduceerd met het slib percentage. Dit is een iets andere aanpak dan gevolgd in H5 en H6. Volgens deze aanpak, reduceert de zandimport door de zeegaten tot +4.2 Mm³/jaar bij een slibpercentage van 8% en tot 3,66 Mm³/jaar voor een slibpercentage van 10% (zie Tabel 7.2).



Figuur 7.3 Een overzicht van het zandbalansmodel representatief voor de huidige trends; (a) berekende volumeveranderingen gecorrigeerd voor ingrepen, (b + c) zandbalansmodel op Waddenzee schaal, (d) uitwerking zandbalansmodel Waddenzee op schaal van de zeegaten.

8 Conclusies en Aanbevelingen

8.1 Conclusies

Methode

- (1) Met behulp van een gedetailleerde trendlijnanalyse is het mogelijk schattingen te maken van zowel de langetermijn als de huidige morfologische ontwikkelingen.
- (2) De trendlijnanalyse van de bruto veranderingen lijkt nauwkeuriger dan de klassieke analyse van netto veranderingen.
- (3) Het meenemen van alle winst- en verliesposten in de zandbalans geeft een aanzienlijk verschil met de "klassieke" volumeberekeningen die niet of slechts beperkt zijn gecorrigeerd.
- (4) Bodemdaling heeft een dubbele uitwerking op de zandbalans. Het zandaanbod vanaf de kustzone neemt af, terwijl de vraag in het bekken toeneemt. Dit heeft tot gevolg dat het grote verschil tussen kust en bekken significant afneemt.
- (5) De hier uitgewerkte methode maakt duidelijk wat de diverse mogelijke transportpaden en transportvolumes zijn, en maakt ook helder waar onze kennis nog tekortschiet om een nauwkeurigere balans te maken.

Volumeveranderingen

- (1) De gecorrigeerde volumebalans geeft een netto lange-termijn erosie van de kust van 9.3 Mm³/jaar. In het bekken treedt 9.0 Mm³/jaar aan sedimentatie op.
- (2) Op lange-termijn vertonen alle kustpolygoenen erosie. Met de grootste erosie in de buitendelta van Texel. Alle bekkens, m.u.v. het Eierlandse Gat vertonen sedimentatie. De grootste sedimentatie treedt op in de Westelijke Waddenzee.
- (3) De huidige trends geven een verlies vanuit de kustzone van 10.6 Mm³/jaar aan zand, terwijl de bekkens met 4.3 Mm³/jaar sedimenteren. Deze grote onbalans tussen erosie (sediment aanbod) en sedimentatie (vraag) kan niet rechtstreeks uit de data worden verklaard.
- (4) De bekkens Marsdiep, Vlie en Ameland vertonen, gecorrigeerd voor bodemdaling, vrijwel gelijke aanzandingssnelheden. Het Eierlandse Gat vertoont in de huidige situatie een veel grotere erosie dan de lange-termijn trend.
- (5) Een significante reductie van de aanzandingssnelheid is opgetreden in Marsdiep (van 3.53 Mm³/jaar naar 1.23 Mm³/jaar), in het Vlie (van +2.3 naar + 1.4).
- (6) De sedimentatie in het bekken van Ameland en in het Friesche Zeegat is juist toegenomen.

Transporten door de Zeegaten

- (1) Transporten door het Marsdiep zijn afgenomen van 4.4 Mm³/jaar tot 2.0 Mm³/jaar (import);
- (2) De export door het Eierlandse Gat is toegenomen van ongeveer -0.15 tot -0.30 Mm³/jaar.
- (3) Sediment import door het Zeegat van het Vlie is afgenomen van 1.8 Mm³/jaar naar 1.2 Mm³/jaar.
- (4) Sediment import door het Ameland Zeegat ligt zowel op de langetermijn als voor de huidige trend rond de 1.0 – 1.2 Mm³/jaar.
- (5) Sediment import in het Friesche Zeegat is afgenomen van ongeveer 2 Mm³/jaar naar 0.5-1.0 Mm³/jaar.

8.2 Aanbevelingen

De resultaten van het zandbalansmodel worden mede gestuurd door de aannamen die hierin gedaan worden. Hierin zijn met name de transporten tussen de verschillende deelgebieden van belang. In het bekken is er eigenlijk geen goede schatting van de transporten over de wantijen beschikbaar. Op basis van de morfologische veranderingen zou je kunnen concluderen dat deze transporten waarschijnlijk beperkt zijn. Uitzondering hierop is de scheiding tussen het Marsdiep en Vlie, maar hier is ook eigenlijk geen duidelijk wantij te definiëren. Nader onderzoek naar de uitwisseling tussen de bekkens zou hier nodig zijn.

Een soortgelijke redenering geldt voor de kustzone. Schattingen van langstransporten zoals bekend uit de literatuur vertonen een relatief grote spreiding, maar lijken over het algemeen aan de lage kant. Op basis van de volumeveranderingen moeten we concluderen dat (1) de langstransporten veel groter zijn dan tot nu toe bekend, of (2) er significante zeewaartse verliezen optreden. Ook hier is nader onderzoek vereist om de onzekerheid te verkleinen. Het Kustgenese 2.0 Diepe Vooroever onderzoek zou hier misschien al antwoorden op kunnen geven. Deze integratie slag is nog niet uitgevoerd

Het grote verschil tussen het wel of niet meenemen van winst- en verliesposten in de zandbalans vergt nog nader onderzoek. Met name het toevoegen van zandsuppleties door gebruik te maken van de trends gebaseerd op de suppletiedatabase geeft waarschijnlijk een significante overschatting. Ook lijkt er een onderschatting van de verliezen naar de duinen op te treden. Het niet correct meenemen van deze 2 posten zou het grote verschil in huidige trends van kusterosie versus aanzanding in het bekken al kunnen verklaren. Het toetsen en aanscherping van de onderliggende aannamen en een verdere uitwerking van verschillende oplossingsrichtingen is essentieel om een beter inzicht in de geldigheid van het gepresenteerde zandbalans model en in de sedimenthuishouding van de Waddenzee te verkrijgen.

Het zal opvallen, dat dit rapport met name de methode en de resultaten van de toepassing van het zandbalansmodel in detail worden beschreven. Een uitgebreide discussie of doorvertaling naar wat dit nu betekend voor de Waddenzee ontbreekt. Dit is met opzet zo gekozen. De resultaten van de hier gepresenteerde uitwerking van het zandbalans model geven toch wel enigszins verrassende resultaten. Hierdoor verandert het beeld dat we hebben van de werking van het systeem. Deze resultaten zijn echter wel sterk bepaald door de onderliggende aannamen en keuzes in de uitwerking van het zandbalansmodel. Deze aannamen zijn zo nauwkeurig mogelijk geformuleerd en waar mogelijk getoetst met de literatuur, maar bevatten waarschijnlijk nog niet alle kennis en inzichten die er bij de (lokale) experts en belanghebbenden aanwezig is. Dit onderzoek heeft dan ook ten eerste als doel de discussie aangaan met de experts en belanghebbenden, waardoor we verbeteringen en verfijningen kunnen aanbrengen in het zandbalansmodel. Echte uitspraken over het functioneren van het Wadden systeem moeten dan ook pas gedaan worden als er consensus is over de waarde van het zandbalansmodel en dit geaccepteerd is door deze experts en belanghebbenden.

9 Referenties

Cleveringa (2018). Slibsedimentatie in de kwelders van de Waddenzee. Bijdrage aan de kwantificering van sinks voor slib in de Waddenzee i.h.k.v. project KRW Slib. Rapport 083755930.01, Arcadis, Nederland.

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

De Kruif, A.C., (2001). Bodemdieptegegevens van het Nederlandse kuststelsel; Beschikbare digitale data en een overzicht van aanvullende analoge data. Report RIKZ/2001.041 (in Dutch). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, (Den Haag): 34 pp.

Deltares (2017). QUICKIN. Generation and manipulation of grid-related parameters such as bathymetry, initial conditions and roughness. User Manual, Hydro-Morphodynamics & Water Quality, Version: 4.00. Revision: 50482. Deltares Delft.

Digipol (1997). Gebruikershandleiding Digipol, 1997. versie 1.0. beheerder RWS/RIKZ.

Elias, E.P.L., (2018a). Een actuele zandbalans van de Westelijke Waddenzee (1933-2015). Report 11202190-000 (in Dutch). Deltares, Delft: 85 pp., a,b

Elias, E.P.L., (2018b). Een actuele zandbalans van de Friesche Zeegat. Report 11202190-000 (in Dutch). Deltares, Delft: 27 pp.

Elias, E.P.L., (2018c). Understanding the presentday morphodynamics of Ameland Inlet - part 2, Kustgenese 2.0, product ZG-B04, rapport 122039-007-ZKS-0007, Deltares, Delft.

Elias P.L., van der Spek, A.J.F., Pearson, P. and Cleveringa, J., (2019). Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology*, 415.

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

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

Glim, G.W., Kool, G., Lieshout, M.F., de Boer, M. (1986). Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Zeegat van het Vlie 1933-1982. Report ANWX-86.H210. deelonderzoek 7. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 52pp.

Glim, G.W., N., Kool, G., Lieshout, M.F., de Boer, M. (1987). Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van Texel 1932-1983. Report ANWX-88.H204. deelonderzoek 1. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 56pp.

Glim, G.W., Kool, G., Lieshout, M.F., de Boer, M. (1988a). Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van het Vlie 1932-1983. Report ANWX-88.H204. deelonderzoek 3. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 56pp.

Glim, N., Kool, de Graaff, N., G., Lieshout, M.F., de Boer, M. (1988b). Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Zeegat van Texel en aangrenzende kuststroken 1925-1981. Report ANWX-88.H201. deelonderzoeken 5 en 9. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 58pp.

Glim, G.W., Kool, G., Lieshout, M.F., de Boer, M. (1989). Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Eierlandse 1934-1982. Report ANWX-89.H202. deelonderzoek 2. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 56pp.

Glim, G.W., Kool, G., Lieshout, M.F., de Boer, M. (1990). Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Eierlandse Gat en de aangrenzende kuststroken 1926-1983. Report ANWX-90.H204. deelonderzoeken 6 en 10. Rijkswaterstaat directie Noord-Holland. 56pp.

Hijma, M., Kooi, H., (2018a). Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens. Door geologische processen en menselijke activiteiten. Rapport 11200538-008. Deltares, Delft, 71 pp.

Hijma, M., Kooi, H., (2018b). Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2). Een update, case IJmuiden en kwantificering onzekerheden door geologische processen en menselijke activiteiten. Rapport 11202190-001. Deltares, Delft, 59 pp.

Hoogervorst, R.D.N. (2005). Inventarisatie bagger-, stort- en zandwingegegevens binnen de -20 m NAP. Ten behoeve van een zandbalans van het Nederlands kuststelsel. Report (werkdocument) RIKZ/KW/2005.103W, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ., (Den Haag): 59 pp.

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

Oost, A.P., de Haas, H. (1992). Het Friesche Zeegat. Morfologisch-Sedimentologische veranderingen in de periode 1970-1987; een getijde inlet systeem uit evenwicht. Rapport in het kader van Kustgenese, Werkgroep 1 voor Rijkswaterstaat, Deel 1 (68 pp.) & 2 (Fig.). Faculteit Aardwetenschappen, Universiteit Utrecht.

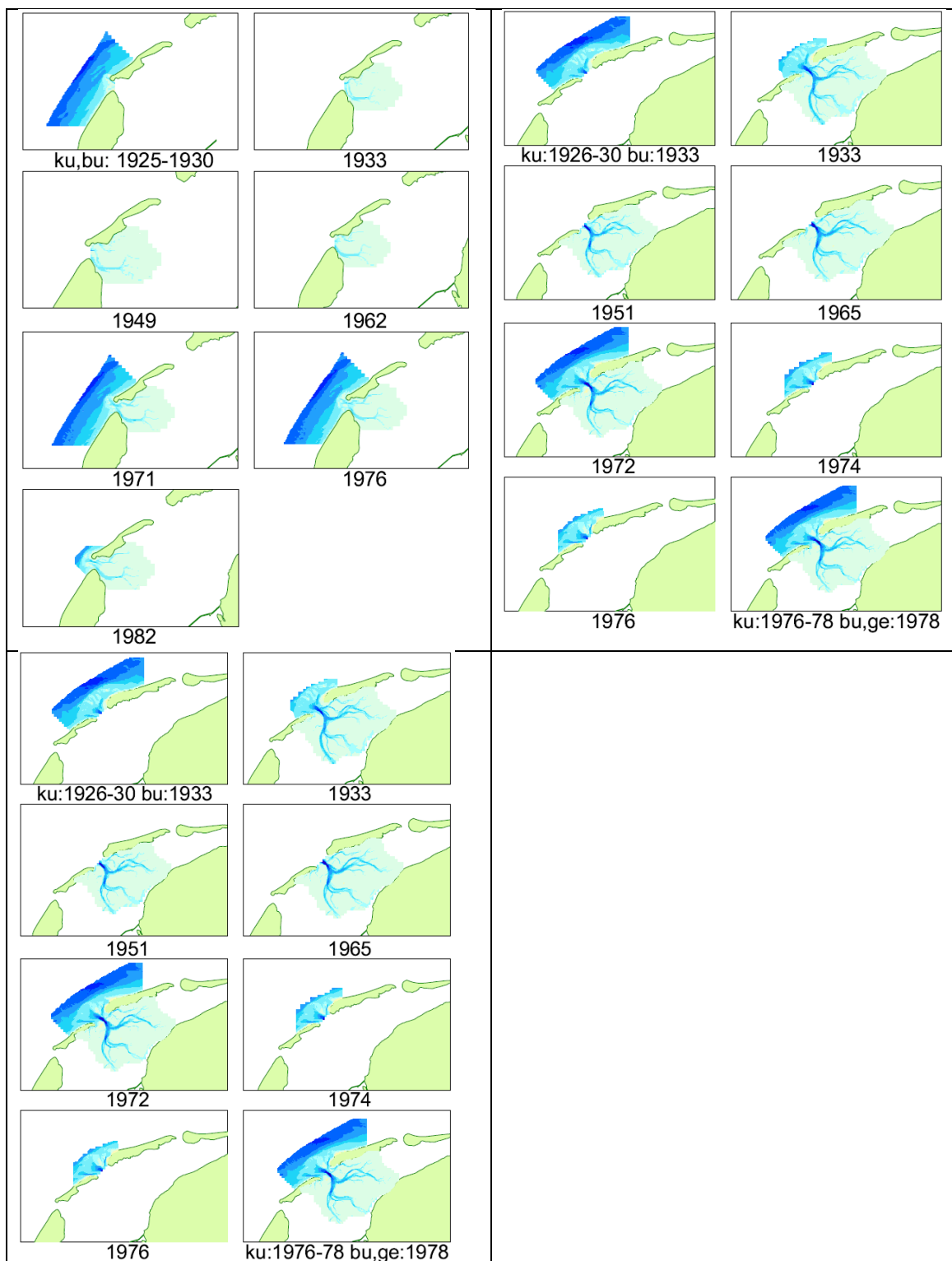
Oost, A.P., de Haas, H. (1993). Het Friesche Zeegat. Morfologisch-Sedimentologische veranderingen in de periode 1927-1970. Rapport in het kader van Kustgenese, Werkgroep 1 voor Rijkswaterstaat, Deel 1 (83 pp.) & 2 (Fig.). Faculteit Aardwetenschappen, Universiteit Utrecht.

Rakhorst H.D., (1982). Inventarisatie zandwinning, Rijkswaterstaat Adviesdienst Hoorn, Nota WWKZ-82.H014. 73 pp.

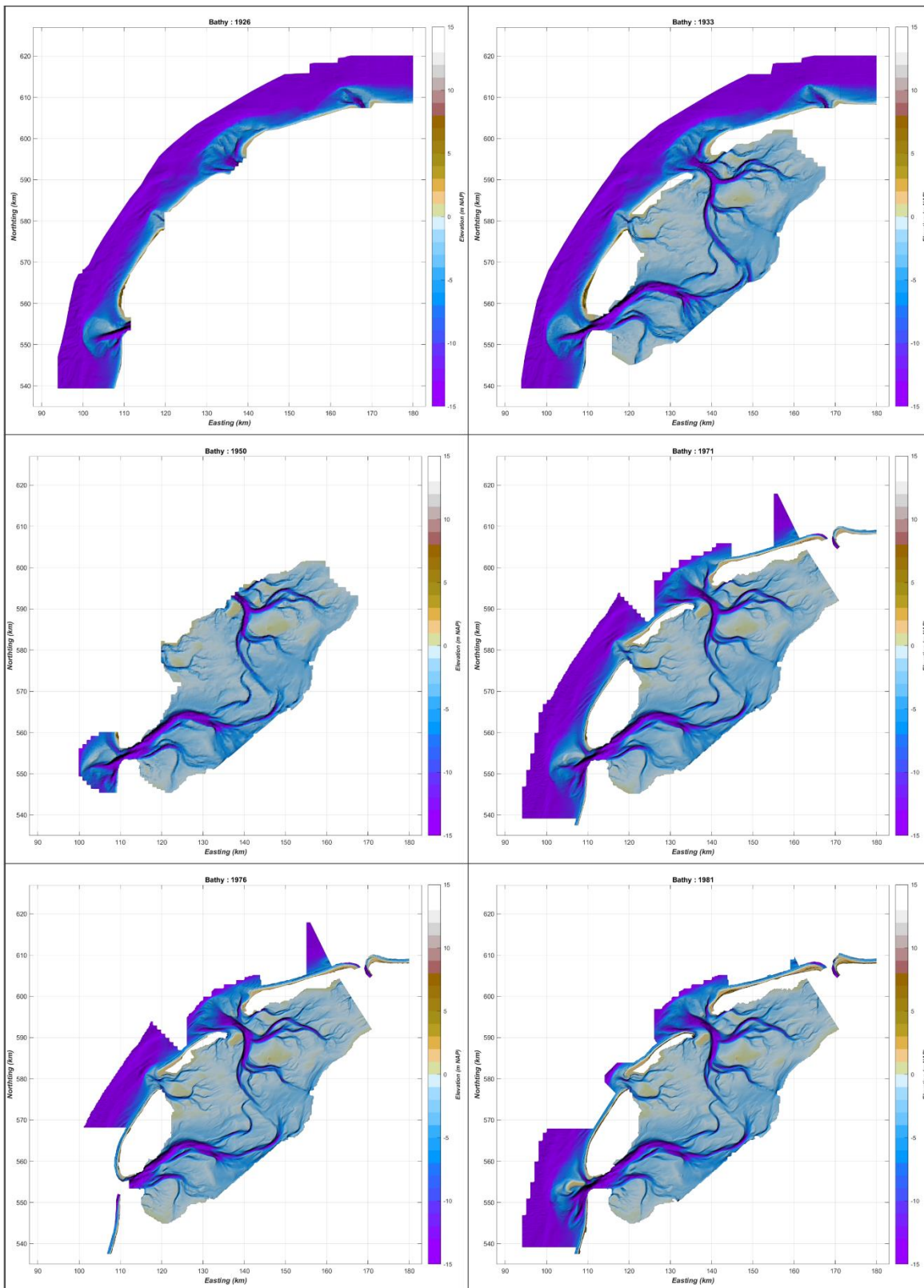
Rakhorst, H.D., Pwa, S.T., (1993), Kustverdediging Eierland, Rapport (in Dutch), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland (RWS, NH).

- Ridderinkhof, W., Hoekstra, P., Van der Vegt, M., De Swart, H.E., 2016. Cyclic behaviour of sandy shoals on the ebb-tidal deltas of the Wadden Sea. *Continental Shelf Research* 115. 14-26.
- Spanhoff, R., Biegel, E.J., Van de Graaff, J., Hoekstra, P., 1997. Shoreface nourishment at Terschelling, the Netherlands: Feeder berm or breaker berm? In: Thornton, E.B. (Ed.), *Proceedings 3rd International Conference on Coastal Dynamics '97*. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 863–872.
- Stive, M.J.F. & Eysink, W.D., (1989). *Voorspelling Ontwikkeling Kustlijn 1990-2090. Fase3. Deelrapport 3.1: Dynamisch Model van het Nederlandse Kuststelsel*. Report H825 (in Dutch). Waterloopkundig Laboratorium (Delft), 66 pp.
- Tânczos, C., Aarninkhof, S.G.J., van der Weck, A.W. (2001) . Ruimte voor de zandrivier. Een aanzet tot een morfologisch afwegingskader voor de Nederlandse kust. Rapport WL Delft Hydraulics, 42 p.
- Thijssen, J.T., (1972). *Een Halve Eeuw Zuiderzeewerken 1920-1970* (in Dutch). Tjeenk Willink (Groningen), 469 pp.
- Van Rijn, L. C. (1995). Sand budget and coastline changes of the central coast of Holland between Den Helder and Hoek van Holland period 1964-2040. Report H2129. WL Delft Hydraulics, Delft.
- Vermaas, T. & Marges, V. (2017). *Volumeanalyse Oostelijke Waddenzee*. Rapport 1230043-003. Deltares Delft.
- Walburg, L., 2001. *De Zandbalans van het Zeegat van Texel bepaald met Verschillende Buitendelta-Definities*. Report RIKZ/OS 2001 (in Dutch). Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ (The Hague): 51 pp.
- Wang, Z.B., Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F. & Lodder, Q.L., 2018. Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea - impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Netherlands Journal of Geosciences*, 97-3: 183-214.

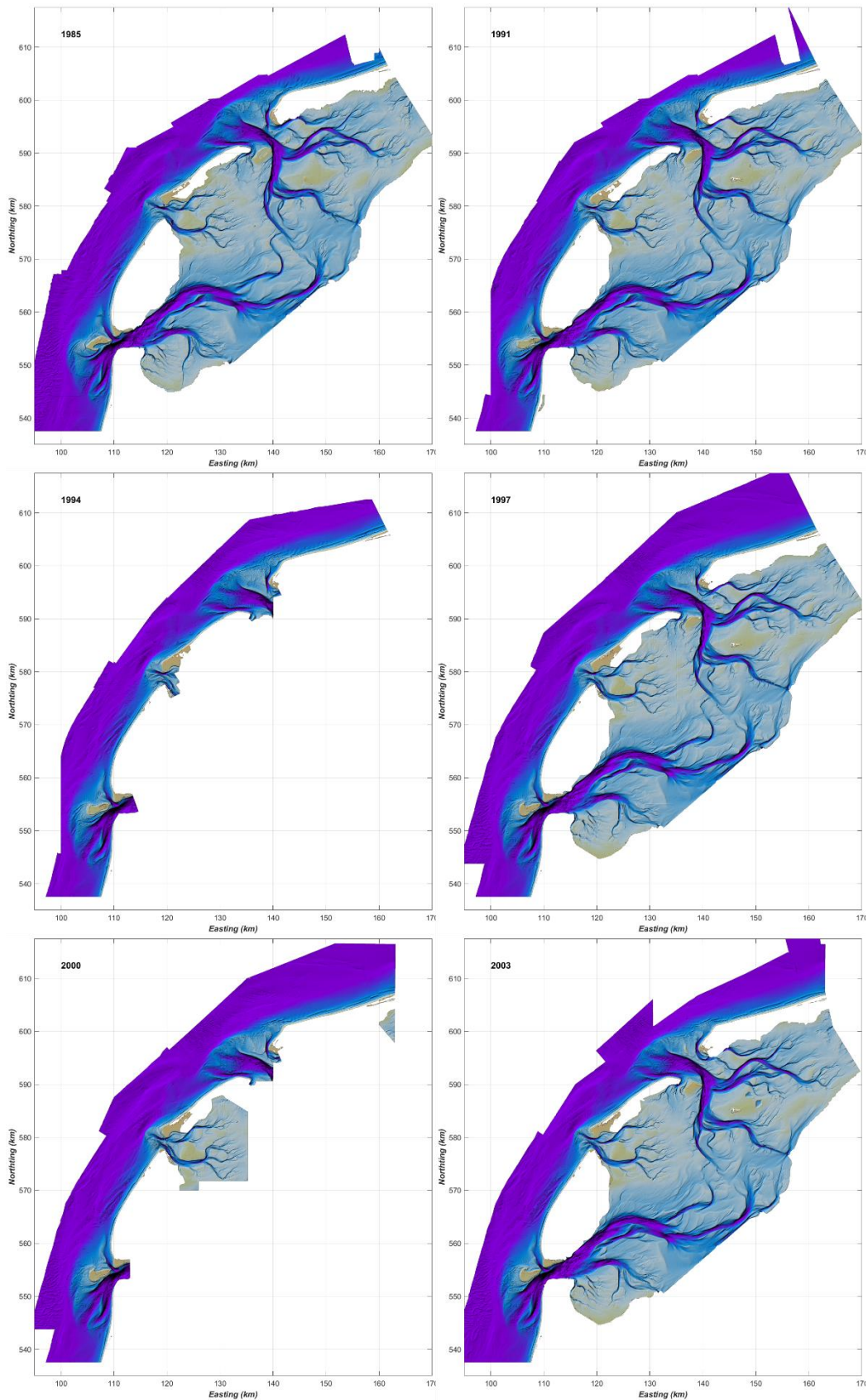
A Een overzicht van de bodemdata en kaarten



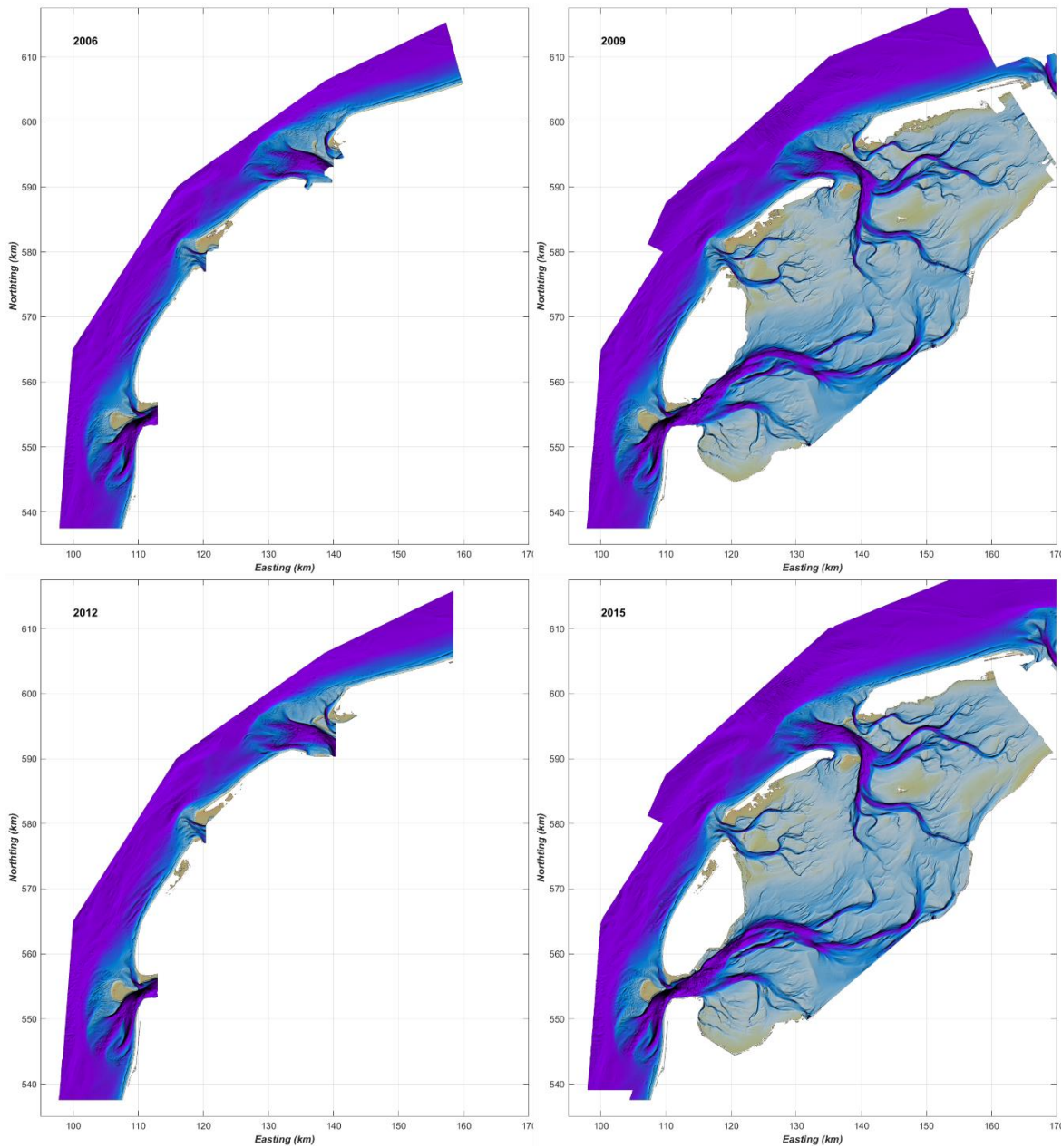
Figuur A.1 Beschikbare bodemdata Westelijke Waddenzee 1925 en 1984 (bron de Kruif, 2001).



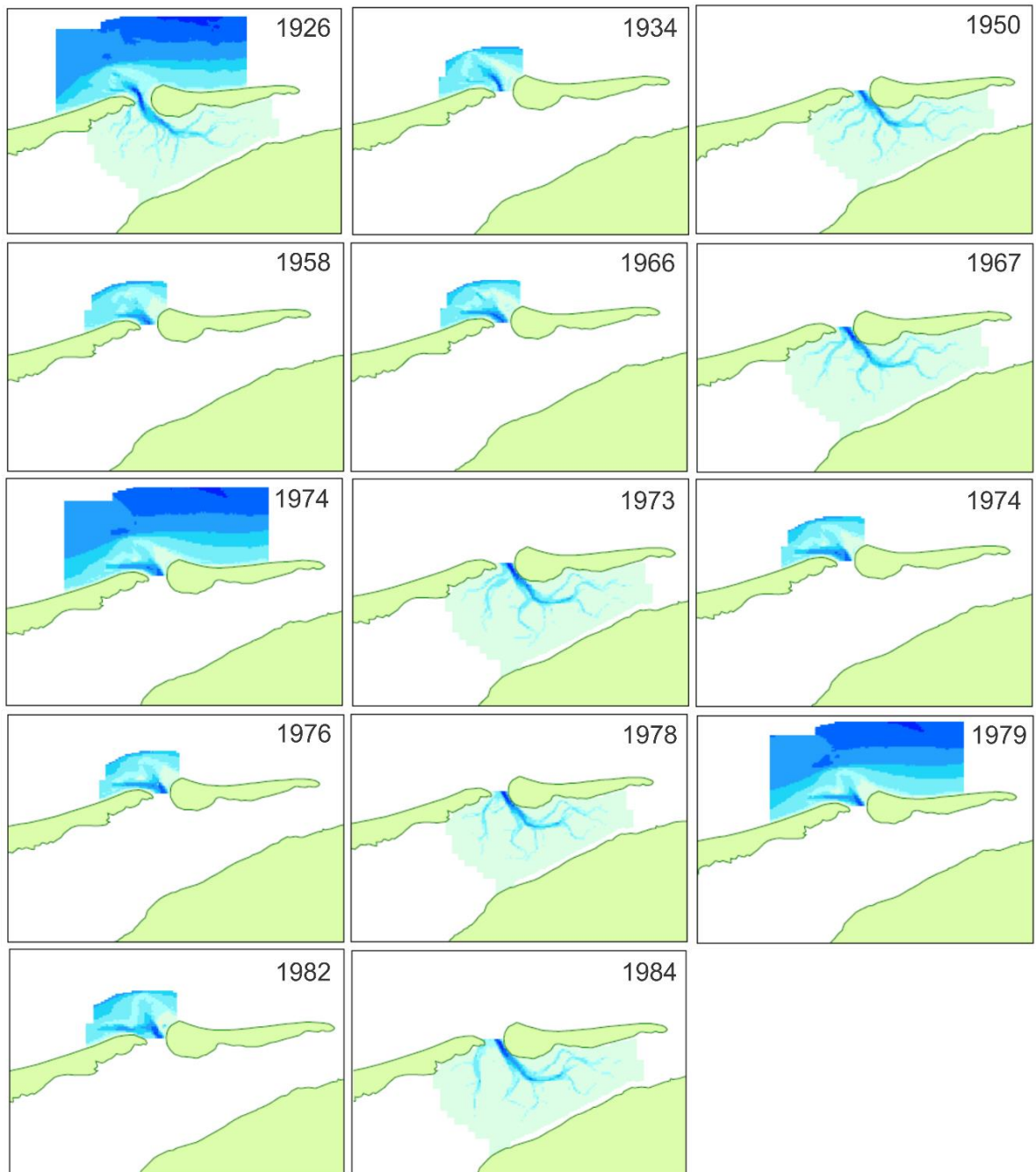
Figuur A.2 Samengestelde, representatieve, bodemkaarten Westelijke Waddenzee voor de periode 1926-1981.



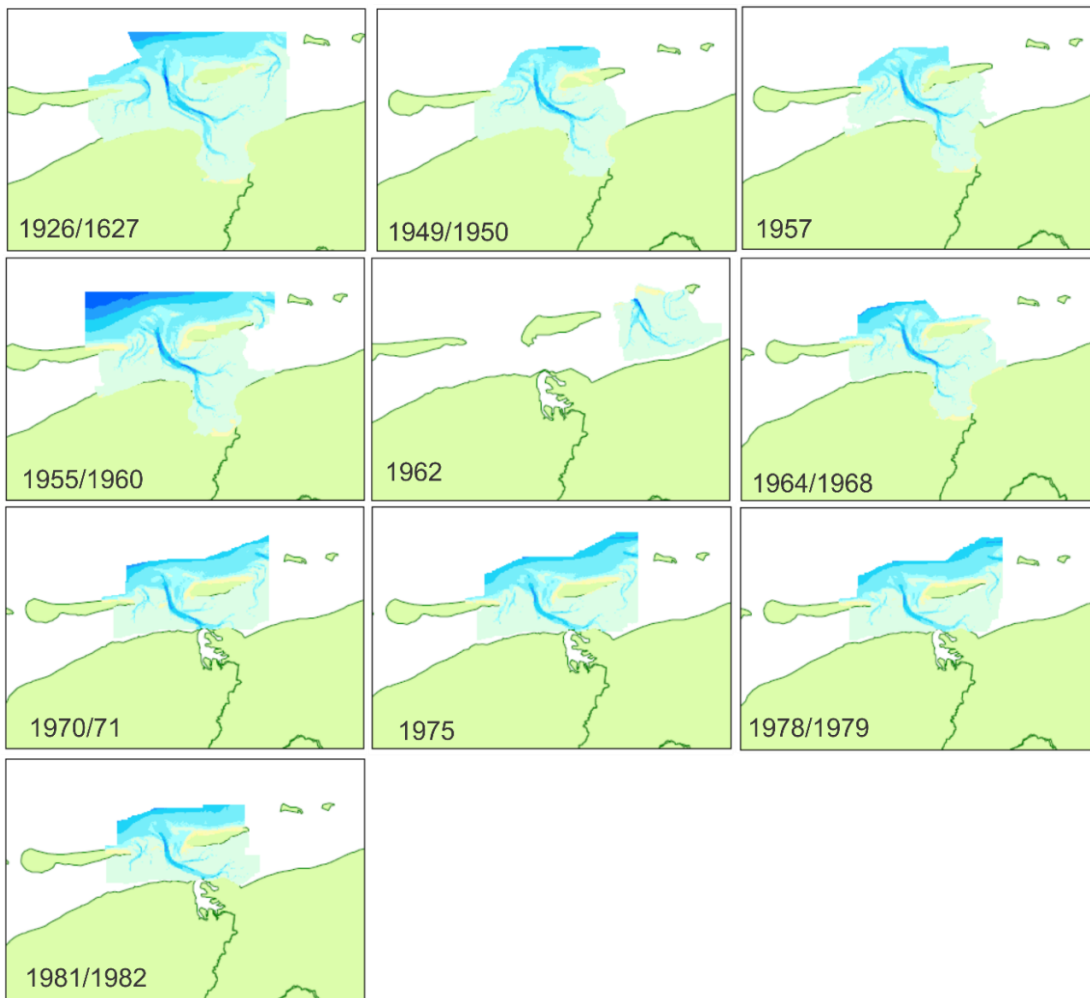
Figuur A.3 Geconstrueerde bodems Westelijke Waddenzee op basis vd Vaklodngen 1985 - 2003.



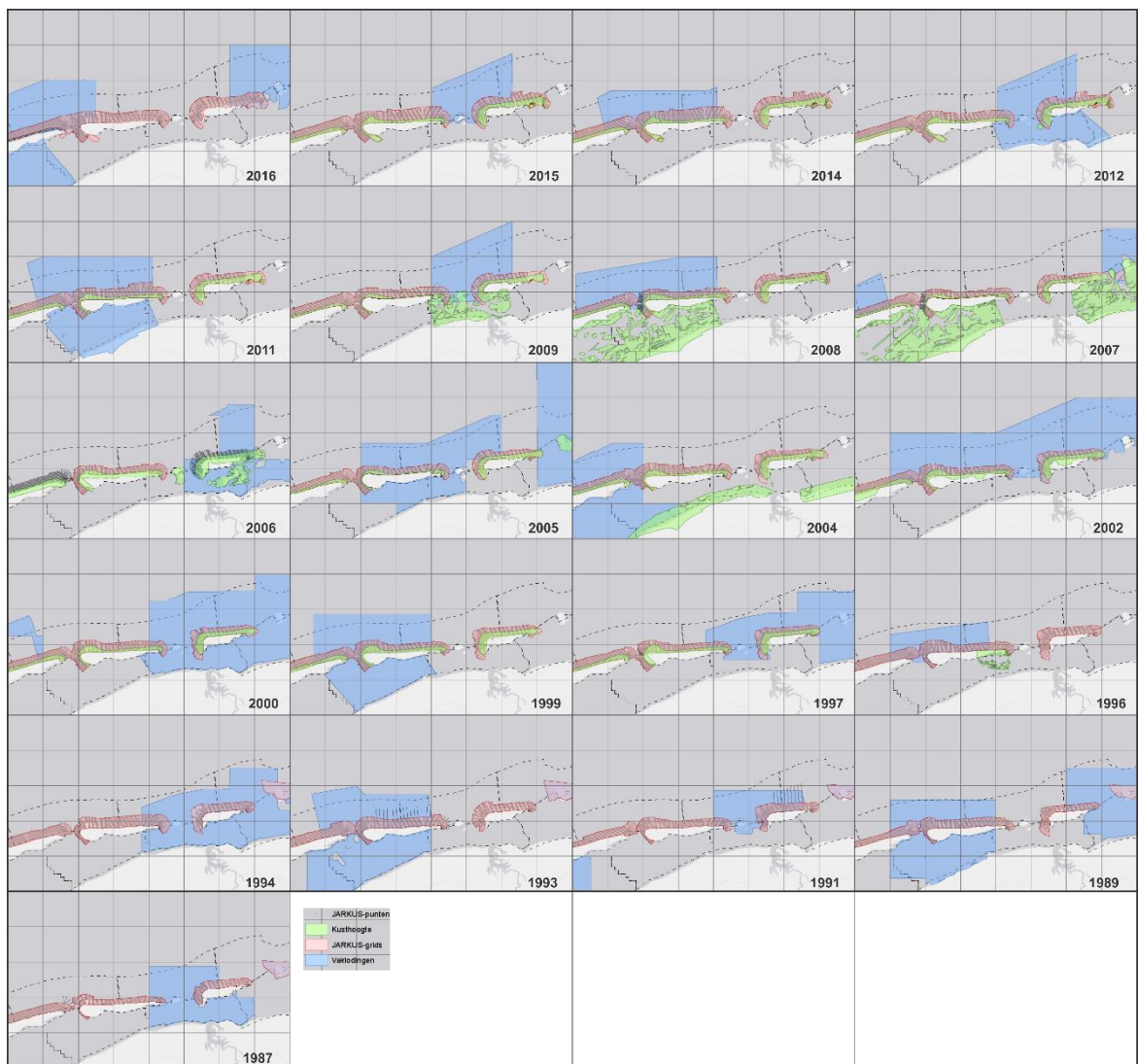
Figuur A.4 Geconstrueerde bodems Westelijke Waddenzee op basis van Vaklodingen 2006 - 2015.



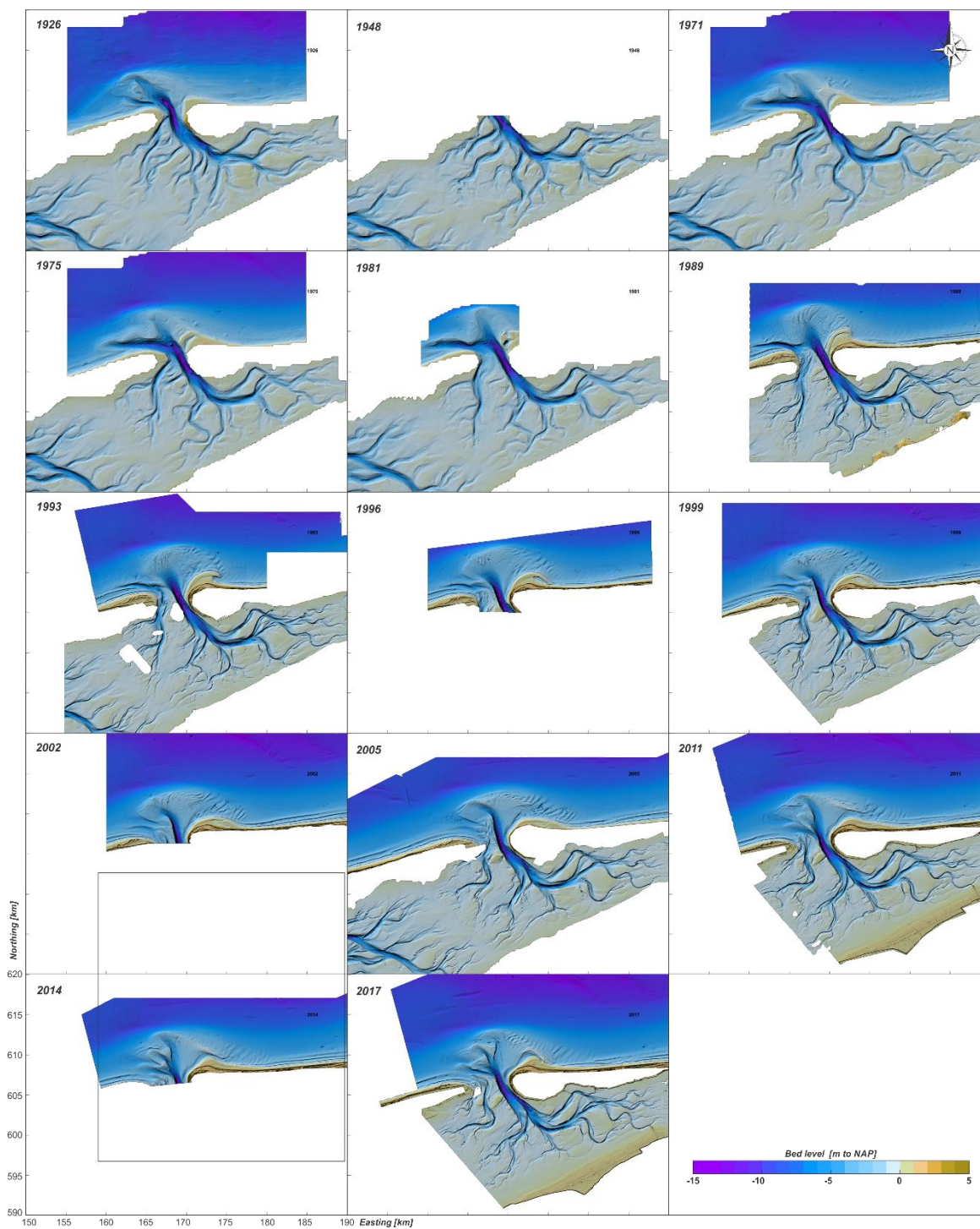
Figuur A.5 Beschikbare bodemdata Zeegat van Ameland 1926 en 1984 (bron de Kruif, 2001).



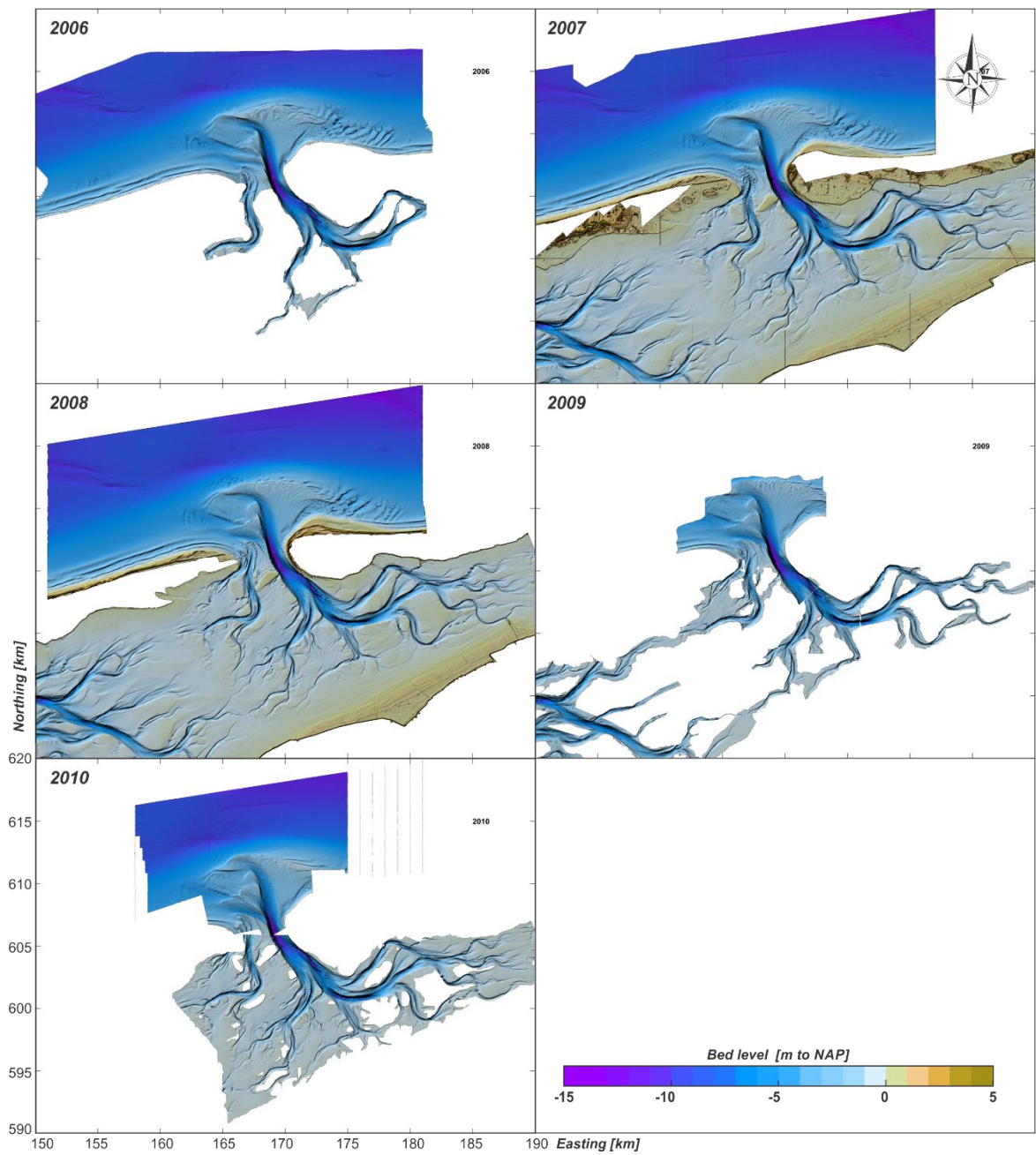
Figuur A.6 Beschikbare bodemdata Friesche Zeegat 1926 en 1981 (bron de Kruif, 2001).



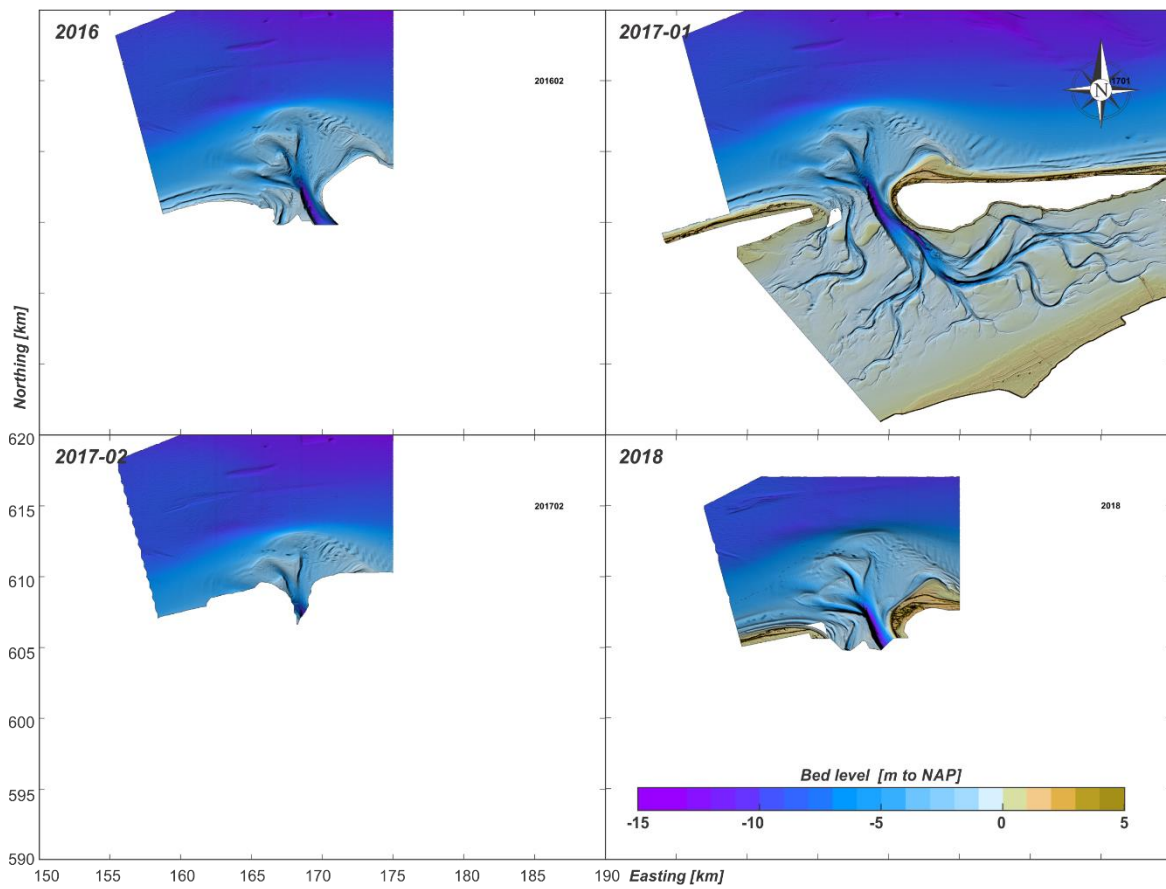
Figuur A.7 Data beschikbaarheid (Vastodngen, Kusthoogte – Lidar, Jarkus Grids) in de Oostelijke Waddenzee over het interval 1987-2016 .



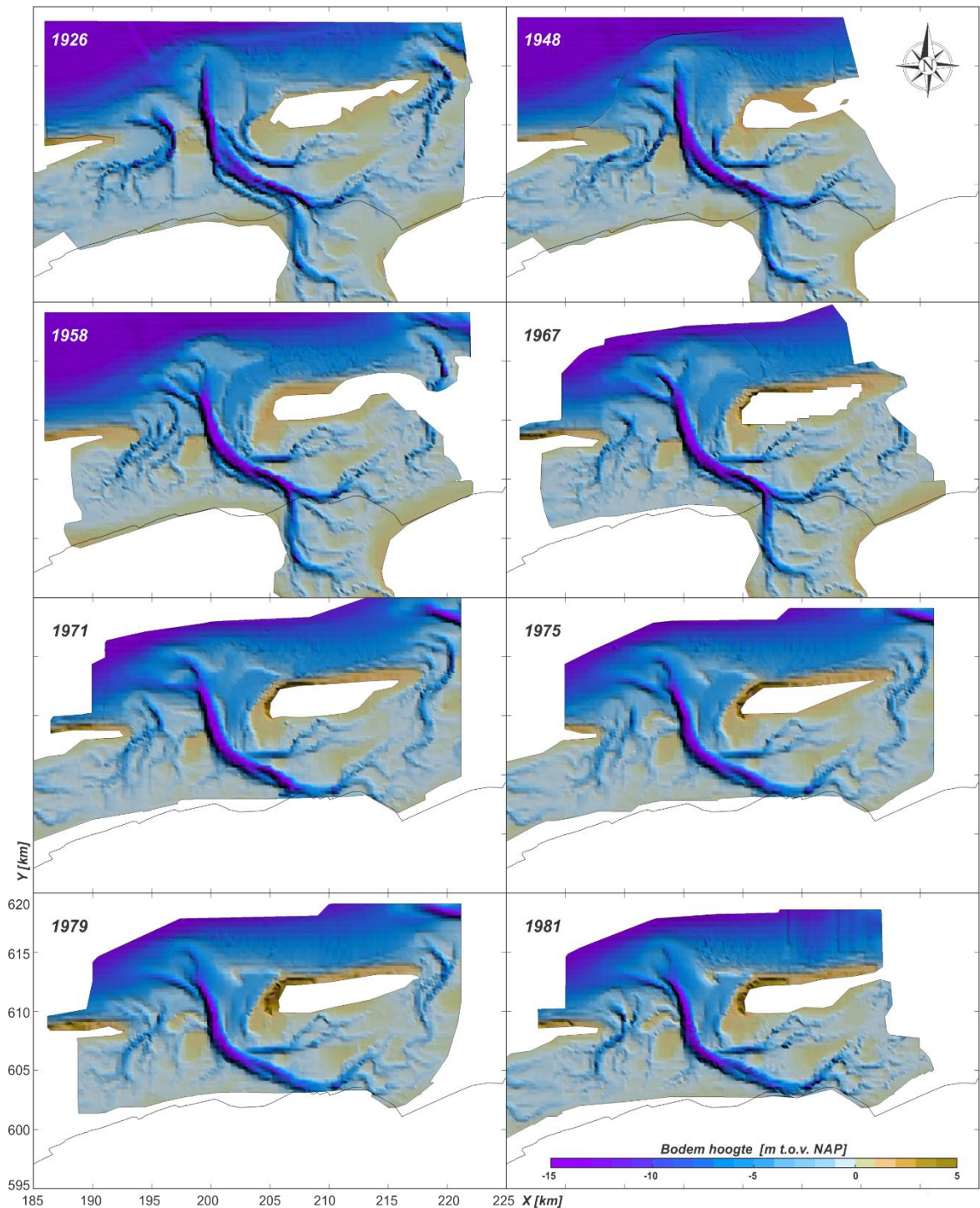
Figuur A.8 Geconstrueerde bodems voor het Amelandse Zeegat tussen 1926 en 1981 (Vaklodingen).



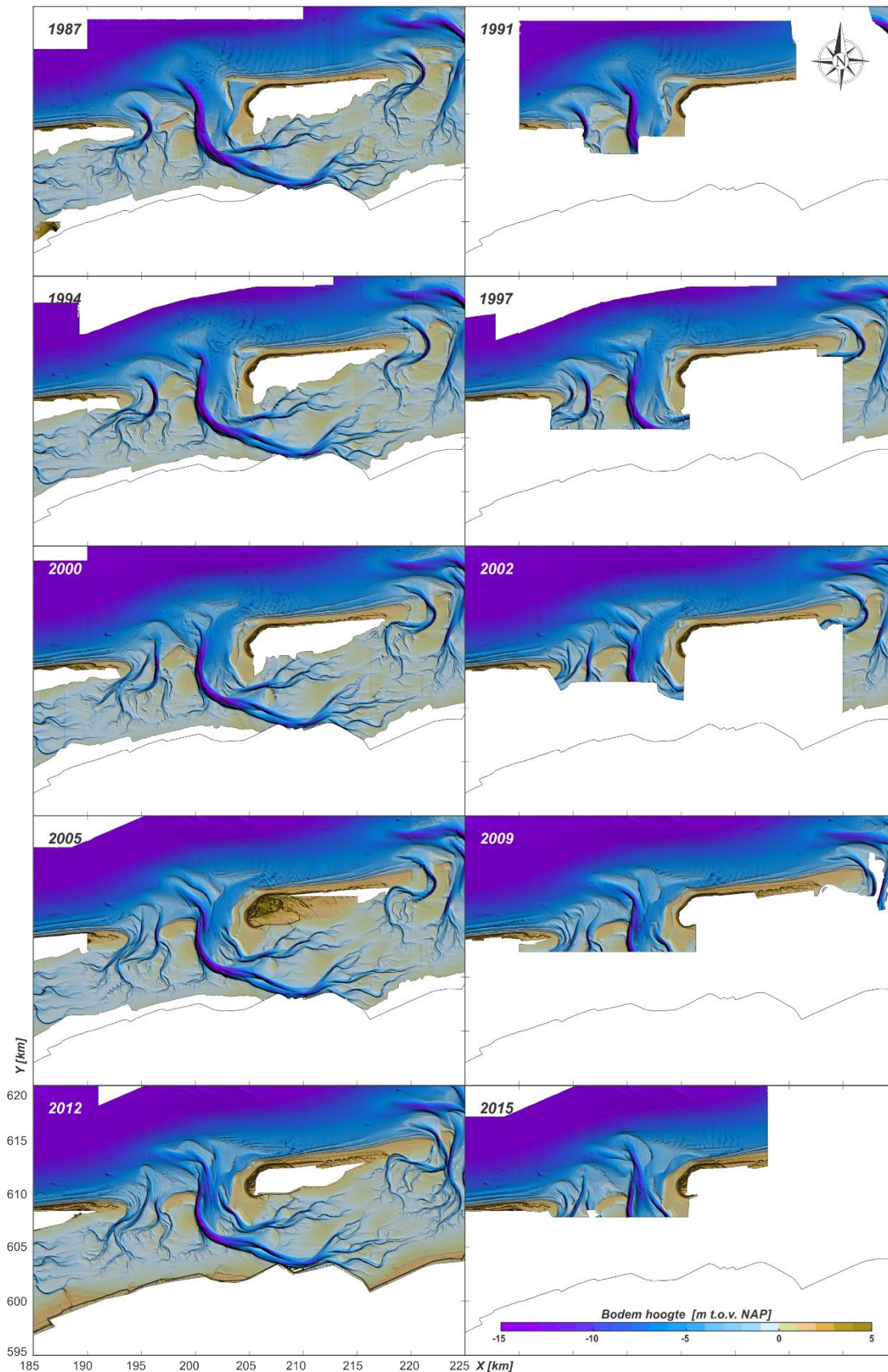
Figuur A.9 Data beschikbaarheid Zeegat van Ameland vanuit het SBW project (2006-2010).



Figuur A.10 Data beschikbaarheid Ameland Kustgenese 2.0 data (2016-2018).



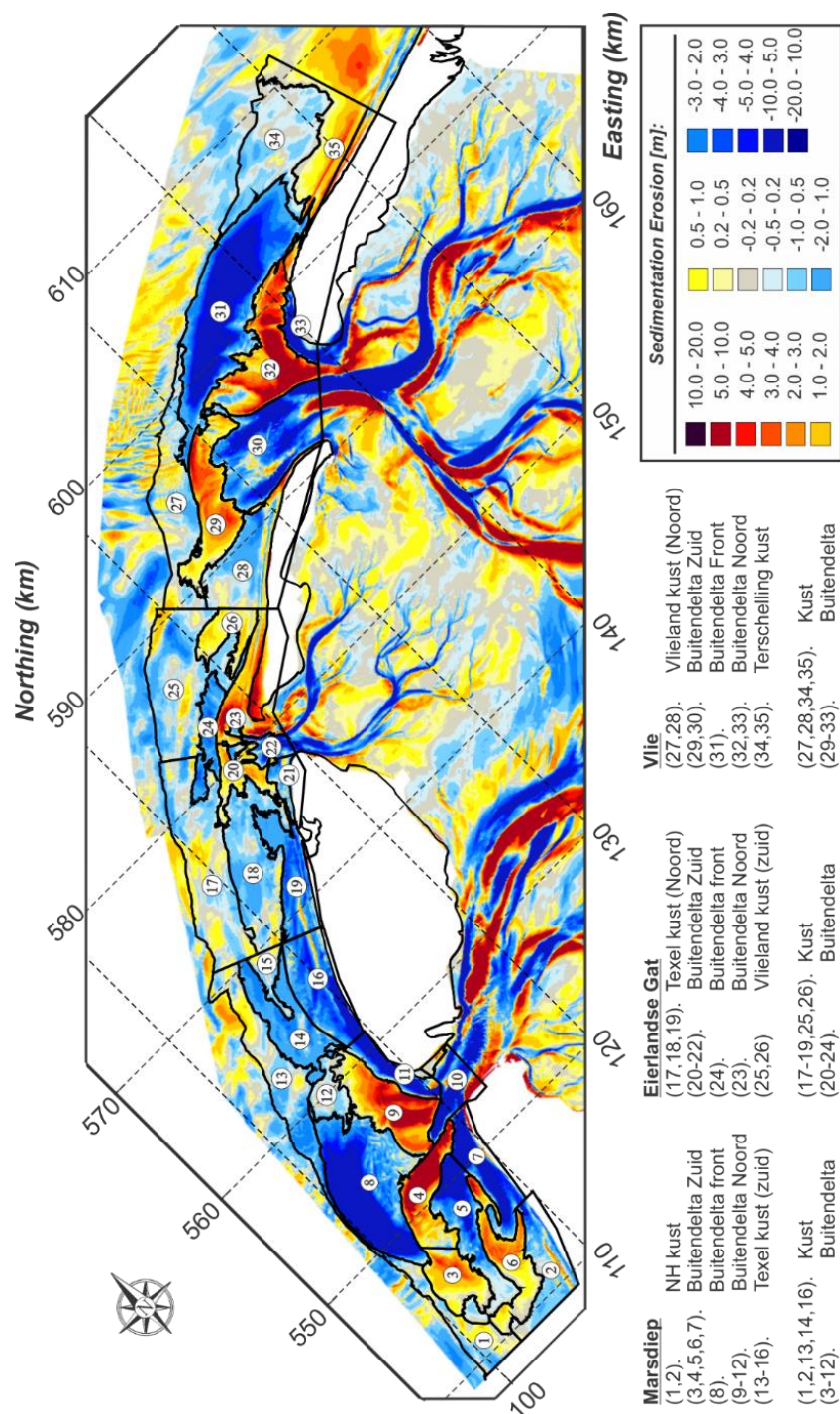
Figuur A.11 Geconstrueerde bodems voor het Friesche Zeegat tussen 1926 en 1981.



Figuur A.12 Geconstrueerde bodems voor het Friesche Zeegat tussen 1987 en 2015.

B Onderliggende berekening van trends.

B.1 Berekende trends in de kustzone van de Westelijke Waddenzee

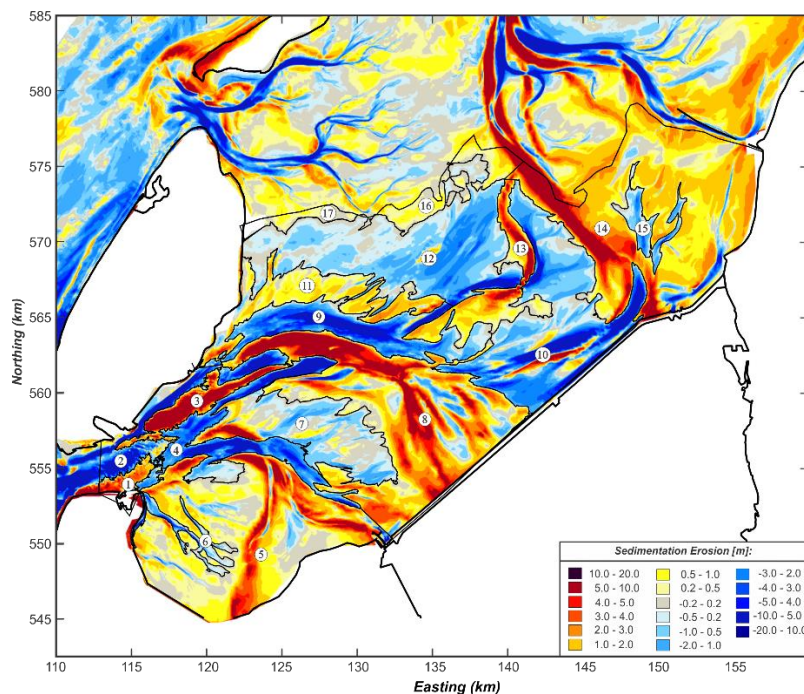


Figuur B.1 Een overzicht van de deelpolygonen voor de kustzone geprojecteerd op het 1933-2015 sedimentatie-erosie patroon.

Tabel B.1 Overzicht trendwaarden voor langetermijn, middellangetermijn en huidige trends (1997-2015).

Periode	1933 - 2015		1991 - 2015		1997 - 2015	
	trend [Mm ³ /jaar]	R ²	trend [Mm ³ /jaar]		trend [Mm ³ /jaar]	R ²
Zeegat van Texel						
1	-0.08	0.68	-0.16	0.66	-0.11	0
2	-0.15	0.82	0.02	0.04	0.02	0.02
3	0.17	0.97	0.26	0.9	0.2	0.8
4	0.93	0.97	0.89	0.98	0.81	0.96
5	-0.75	0.96	-0.81	0.95	-0.7	0.95
6	0.32	0.94	0.02	0.13	0.01	0
7	-1.29	0.9	-0.38	0.7	-0.15	0.41
8	-2.55	0.98	-3	0.98	-2.79	0.97
9	0.911	0.96	0.75	0.94	0.64	0.91
10	-0.59	0.89	-0.24	0.81	-0.12	0.86
11	-0.35	0.91	0.09	0.29	0.21	0.8
12	-0.04	0.49	0.07	0	0	0
13	-0.28	0.9	-0.23	0.25	0.13	0.2
14	-0.4	0.98	-0.44	0.81	-0.25	0.67
15	-0.02	0.45	-0.08	0.5	-0.02	0.27
16	-0.56	0.9	0.03	0.03	0.19	0.57
Eierlandse Gat						
17	-0.14	0.59	-0.31	0.45	0.08	0
18	-0.24	0.88	-0.36	0.62	-0.1	0.18
19	-0.38	0.95	-0.2	0.76	-0.1	0.54
20	0.08	0.53	0.17	0.5	0.13	0.22
21	-0.06	0.44	0.16	0.72	0.09	0.43
22	-0.15	0.82	-0.32	0.86	-0.39	0.87
23	0.41	0.96	0.31	0.83	0.42	0.88
24	-0.2	0.97	-0.11	0.86	-0.09	0.71
25	-0.18	0.75	-0.39	0.8	-0.31	0.85
26	0.08	0.62	-0.09	0.71	-0.05	0.42
Zeegat van Vlie						
27	-0.05	0.29	-0.13	0.29	-0.2	0.45
28	-0.12	0.81	-0.01	0	0.08	0.18
29	0.52	0.97	0.42	0.9	0.34	0.87
30	-1.37	0.99	-1.37	0.98	-1.48	0.98
31	-2.86	0.99	-3.56	0.99	-3.42	0.97
32	1.43	0.99	1.31	0.97	1.19	0.97
33	-0.25	0.56	0.2	0.99	0.19	0.98
34	-0.11	0.22	-0.78 -0.11	0.85	-0.94 -0.11	0.86
35	0.33	0.75	-0.36	0.91	-0.44	0.97
MD	-4.73		-3.21		-1.93	
ELD	-0.78		-1.14		-0.32	
Vlie	-2.48		-3.61		-3.85	
Totaal	-7.99		-7.96		-6.10	

B.2 Berekende trends in de bekken van de Westelijke Waddenzee *Marsdiep*

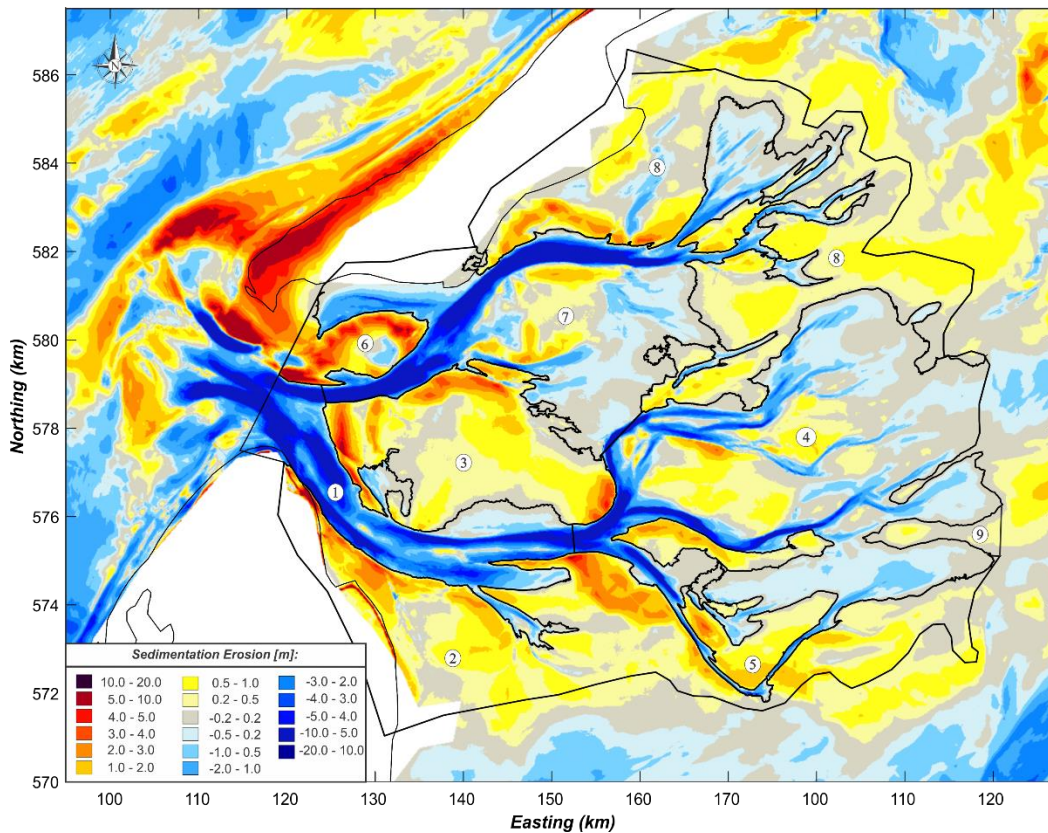


Figuur B.2 Een overzicht van de sedimentatie-erosie patronen (1933-2015) en polygoon indeling in het bekken van het Zeegat van Texel / Marsdiep.

Tabel B.2 Overzicht trendwaarden voor langetermijn, middellangetermijn en huidige trend.

Gebied	Polygoon	Periode				
		Langetermijn	Middel-langetermijn	Huidige trend (Mm ³ /jaar)		
		1933 - 2015	1971 - 2015		Begin jaar	EindJaar
Texelstroom	1	0.12	0.06	0.1	1997	2015
	2	-1.03	-1.1	-0.57	1991	2015
	3	0.75	0.86	0.62	1991	2015
	9	-1.32	-1.89	-1.25	1991	2015
Malzwin	4	-1.25	-1.55	-1.03	1997	2015
Balgzand	5	1.38	1.22	0.98	1991	2015
	6 ⁽¹⁾	-0.11	-0.15	-0.08	1991	2015
Lutjeswaard	7	0	-0.23	-0.15	1982	2015
	8	3.24	3.07	2.31	1991	2015
Doove Balg	10	-1.58	-1.44	-0.89	1991	2015
Oude Vlie	13	0.61	0.74	0.27	1991	2015
Waarden	11	0.29	0.35	0.26	1991	2015
	12	-0.97	-1.35	-0.89	1991	2015
	16	0.13	0.04	-0.02	1991	2015
	17	0.01	-0.02	-0.02	1991	2015
Kornwerderzand	14	2.37	1.51	1.12	2003	2015
	15 ⁽¹⁾	-0.1	-0.28	-0.33	1991	2015
Totaal		2.75	0.27	0.84		

(1). Is onderdeel van 5. niet meegenomen in de berekening; (2) is onderdeel van 14. niet meegenomen in de berekening Eierlandse Gat

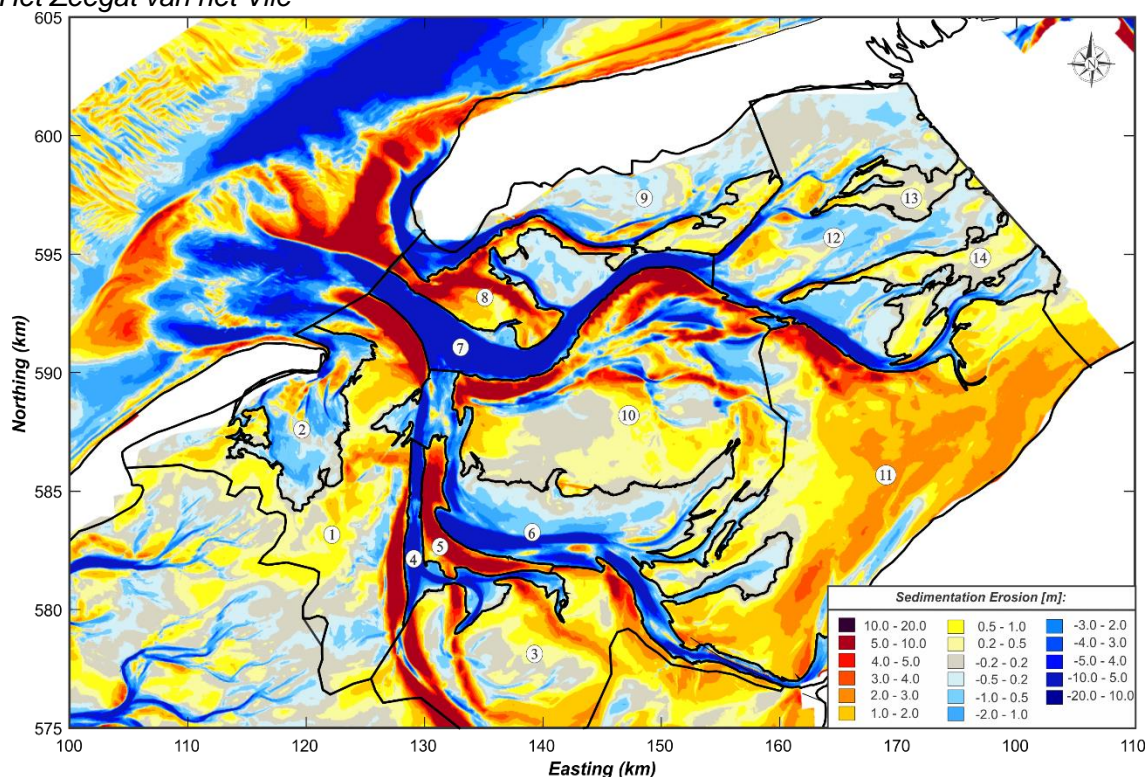


Figuur B.3 Een overzicht van de sedimentatie-erosie patronen (1933-2015) en polygoon indeling in het bekken van het Eierlandse Gat.

Tabel B.3 Overzicht trendwaarden voor langetermijn, middellangetermijn en huidige trends.

Gebied	Polygoon	Periode				
		Langetermijn	Middel- langetermijn	Huidige trend (Mm ³ /jaar)		
		1933 - 2015	1971 - 2015		Begin jaar	Eind Jaar
Robbengat	1	-0.4	-0.39	-0.49	1997	2015
Waarden	2	0.3	0.47	0.17	1991	2015
	5	0.06	0.1	0.09	1991	2015
Hengst	3	0.15	0.16	0.15	1991	2015
Waardgr. Oost	4	-0.29	-0.45	-0.16	1986	2015
	9	0	0	0	1933	2015
Vlieland Zuid	6	0.07	0.16	0.28	2000	2015
Keteldiep	7	-0.45	-0.5	-0.62	2000	2015
Waardgr. N.	8	0.17	0.17	0.17	1933	2015
Totaal		-0.38	-0.27	-0.41		

Het Zeegat van het Vlie



Figuur B.4 Een overzicht van de sedimentatie-erosie patronen (1933-2015) en polygoon indeling in het bekken van het Zeegat van het Vlie.

Tabel B.4 Overzicht trendwaarden voor langetermijn, middellangetermijn en huidige trend.

Gebied	Polygoon	Periode				
		Langetermijn	Middel- langetermijn	Huidige trend (Mm ³ /jaar)		
		1933 - 2015	1971 - 2015		Begin jaar	Eind Jaar
Richel/ Waardgronden	1	1.49	1.49	0.67	1986	2015
	2	-1.03	-1.1	-0.57	1991	2015
Vlietstroom	4	-0.14	0.05	0.05	1971	2015
	5	-0.48	-0.49	-0.59	1991	2015
	6	0.57	0.98	1.04	1991	2015
Lange Zand	3	-1.48	-1.8	-1.52	1991	2015
WestMeep / Noordmeep	7	1.26	1.39	0.87	1991	2015
Groote Plaat	8	-2.67	-3.01	-1.84	1991	2015
Terschelling	9	3.24	3.07	2.31	1991	2015
Grienderwaard/ Ballastplaat	10	0.76	0.93	0.16	1997	2015
Vlakte van Oosterbierum	11	-0.54	-0.5	0.12	1991	2015
Terschellinger Wad	12	1.2	1.92	1.07	1991	2015
	13	-0.97	-1.35	-0.89	1991	2015
	14	2.33	2.44	1.85	1933	2015
	14	0.01	-0.02	-0.02	1991	2015
Totaal		1.62	2.36	0.97		

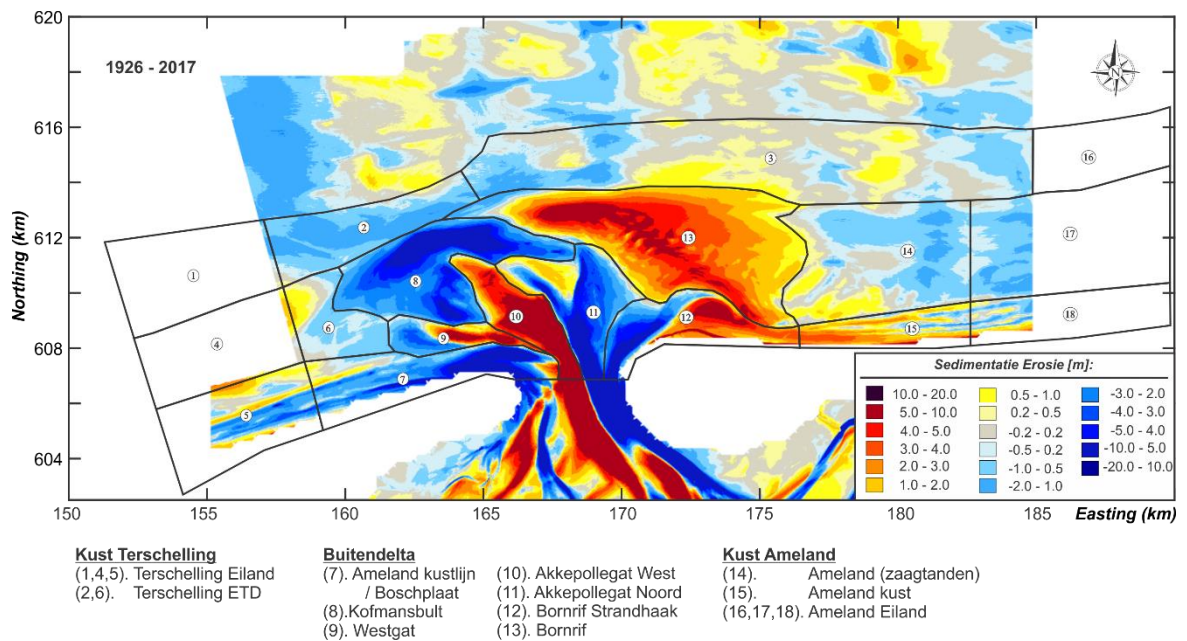
B.3 Berekende trends in het Zeegat van Ameland

De kustzone en buitendelta

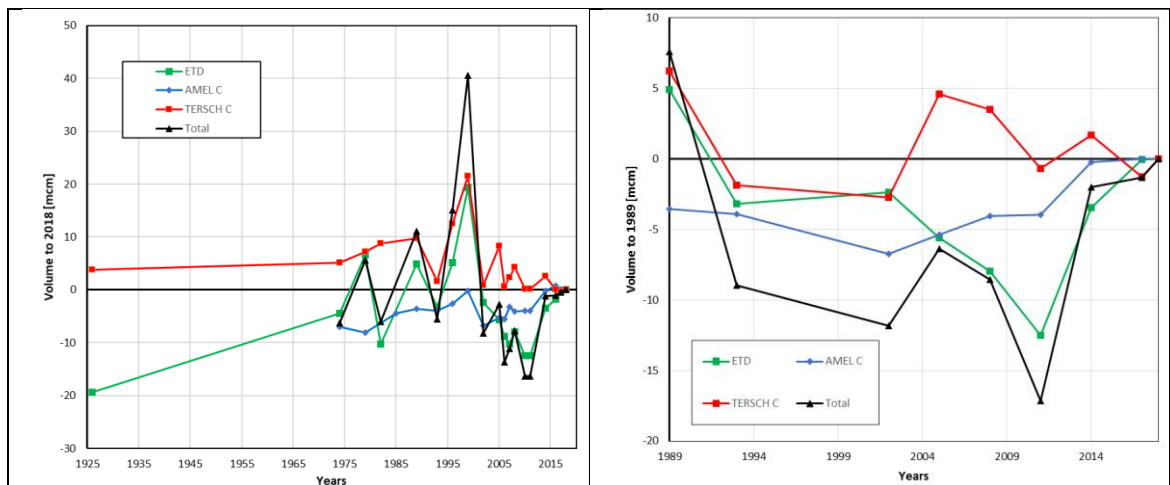
De sedimentatie-erosie patronen van de buitendelta en kust van het Zeegat van Ameland laten duidelijk, significante, bodemveranderingen zien (Figuur B.5). Toch vertonen de tijdseries van de volumeverandering een zeer grillig verloop (Figuur B.6). In vrijwel de gehele tijdserie wisselen, onrealistische, periodes met erosie en sedimentatie elkaar af. Zoals ook eerder geconstateerd in de studie van Elias (2018b), maar ook in de studie van de Fockert (2008) is er met name in de periode 1993-2003 een grote uitschieter in de data te observeren. Deze grote uitschieters kunnen niet verklaard worden door de sediment-transport processen; er zijn geen fysische processen die in opeenvolgende metingen een toename van 45 Mm³, gevolgd door een afname van 60 Mm³ kunnen verklaren. Met name de grote sedimentatie in polygoon 3. zeewaarts van de buitendelta, duidt erop dat hier de metingen niet nauwkeurig zijn. Op basis van de netto trends is het eigenlijk onmogelijk een nauwkeurige waarde voor de lange termijn te bepalen. Hier is de aanvullende trendlijnanalyse essentieel.

Als we de grote piek even buiten beschouwing laten (Figuur B.6, links), zien we dat er over de periode 1990-2011 wel een continue trend van erosie optreedt. De meer recente metingen 2011-2018 geven dan een duidelijke omslag van afname naar toename van de buitendelta volumes. Een dergelijke omslag, tussen 2011-2014, is ook in de eerdere studie van Elias (2018) geobserveerd. De volumeveranderingen sinds 2014 zijn klein, maar wel met een continue trend van sedimentatie. Een gedeelte van de fluctuaties in de recente periode is ook te verklaren uit de gebruikte datasets. Vanaf 2005 zijn er in verschillende projecten bodemopnamen geweest. Zo is de bodem tussen 2005 en 2010 vrijwel jaarlijks bemeten in het kader van de SBW campagne. Sinds 2016 zijn er halfjaarlijkse metingen in het kader van Kustgenese 2. Deze bodems zijn niet altijd gebiedsdekkend opgenomen, gedeeltelijk zijn bodems ook ingevuld met eerder opgenomen datasets. In de rechter deelfiguur van Figuur B.6 zijn daarom alleen de volledig dekkende (Vaklodingen) weergegeven. Uit deze data lijkt er in 2014 een kentering plaats te vinden van een kleine erosieve trend naar een aanzappende trend.

De langetermijntrends kunnen eigenlijk niet via de netto veranderingen worden bepaald. De 1926 waarde wijkt sterk af van de rest van de tijdserie en bepaald daardoor in grote mate de trendwaarde. Op basis van de aanvullende trendlijnanalyses komen we als beste schatting uit op een netto erosie van de kustpolygoon van -0.43 Mm³/jaar. Het merendeel vindt plaats op de kust van Terschelling (-0.30 Mm³/jaar), terwijl er een kleine erosie optreedt in de kustzone van Ameland (-0.12 Mm³/jaar). De buitendelta zelf is licht positief (+0.12 Mm³/jaar). De trends over de periode 1989-2016, zijn -0.14 Mm³/jaar voor het totaal met een kleine volumewinst van de kust (0.07 Mm³/jaar). De buitendelta erodeert met -0.21 Mm³/jaar. Ook in de studie van Elias (2018c) werd op basis van de recente Kustgenese 2 metingen al geconcludeerd dat de er grote volumeveranderingen optreden op de buitendelta, rond de 35 Mm³/jaar, maar de netto verandering slingert rond de 0.



Figuur B.5 Een overzicht van de deelpolygonen voor de kustzone van het Zeegat van Ameland geprojecteerd op het sedimentatie-erosie patroon van de 1926-2017 bodems.



Figuur B.6 (rechts) Volumeveranderingen in de Ameland Kust polygoon opgesplitst in buitendelta (ETD), kustzone Ameland (AMEL C) en kustzone Terschelling (TERSCH C). Links: Details van de recente volumeveranderingen van alleen de Vaklodgingen en zonder de data 1996-1999.

Tabel B.5 Een overzicht van de trendwaarden voor de lange termijn voor methode A – E (kustzone Ameland).

Polygoon	Langetermijntrends (1926/1948 – 2018)					Beste Schatting
	(A) netto	(B) bruto	(C) bruto+TR	(D) bruto+corr	(E) bruto+TR+corr	
1	0	-	-	-	-	0
2	-0.07	-0.13	-0.16	-0.15	-0.16	-0.15
3	-0.19	-0.09	-0.06	-0.48	-0.35	-0.35
4	0	-	-	-0.01	-0.02	0.00
5	0.13	0.01	0.06	0.12	0.13	0.13
6	-0.34	-0.10	-0.17	-0.28	-0.23	-0.28
7	-0.3	-0.36	-0.40	-0.67	-0.73	-0.73
8	-1.27	-0.85	-1.24	-1.18	-1.05	-1.05
9	0.41	0.12	0.31	0.40	0.41	0.41
10	0.52	0.60	0.70	0.58	0.54	0.54
11	0	-0.37	-0.60	-0.03	-0.02	-0.02
12	-0.32	-0.09	-0.13	-0.23	-0.11	-0.11
13	1.29	1.11	1.33	0.83	1.08	1.08
14	0.1	-0.06	0.02	0.12	0.13	0.13
15	0.15	0.07	0.12	0.15	0.23	0.23
16	-0.01	-0.05	-0.03	-	-	-
17	-0.23	-0.33	-0.34	-0.13	-0.04	-0.13
18	0	-0.02	0.08	-0.04	0	0
kust Terschelling			-0.30			-0.30
kust Ameland			-0.12			-0.12
ETD			0.12			0.12
Totaal			-0.30			-0.30

Tabel B.6 Overzicht trendwaarden voor middellangetermijntrends voor methode A – E (kustzone Ameland).

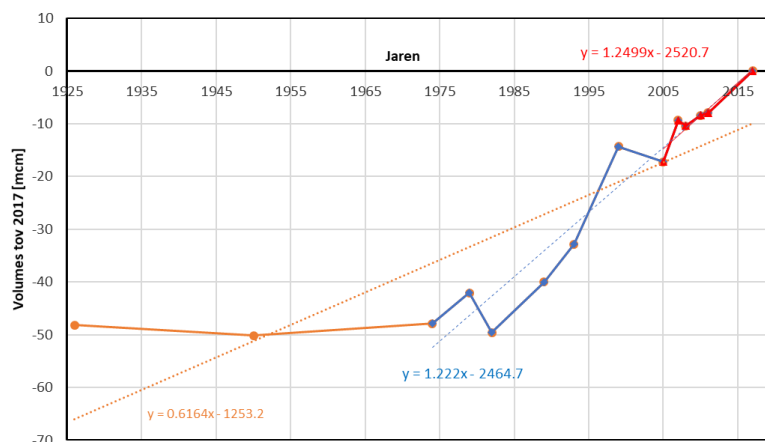
Polygoon	Langetermijntrends (1989 – 2018)					Beste Schatting
	(A) netto	(B) bruto	(C) bruto+TR	(D) bruto+corr	(E) bruto+TR+corr	
1	0	0	0	0	0	0
2	-0.05	-0.09	-0.06	0.16	0.18	-0.06
3	-0.09	0.30	0.01	1.04	1.14	-0.09
4		0	0	0	0	0
5	0.11	0.09	0.11	0.11	0.13	0.11
6	-0.25	-0.26	-0.22	-0.16	-0.14	-0.22
7	-0.81	-0.98	-0.90	-1.06	-1.02	-0.81
8	-0.84	-0.87	-0.77	-1.00	-0.97	-0.77
9	0.11	0.09	0.13	0.14	0.20	0.14
10	0.21	0.26	0.29	0.24	0.27	0.24
11	0.75	0.95	0.97	1.04	1.10	0.75
12	-0.32	-0.39	-0.37	-0.33	-0.29	-0.29
13	0.56	0.53	0.40	0.75	0.73	0.53
14	0.21	0.37	0.32	0.15	0.23	0.23
15	0.23	0.25	0.21	0.25	0.22	0.22
16	0	0	0	0	0	0
17	-0.35	-0.40	-0.42	-0.13	-0.12	-0.12
18	0	-0.07	-0.09	-0.01	0	0
kust Terschelling			-0.17			-0.17
kust Ameland			0.24			0.24
ETD			-0.21			-0.21
Totaal			-0.14			-0.14

Tabel B.7 Overzicht trendwaarden voor verschillende perioden van trendlijnbepaling (kustzone Ameland).

Polygoon	1926 / 1948 -2015	1974 - 2015	1989 - 2015	2005-2018
	trend [Mm ³ /jaar]	trend [Mm ³ /jaar]	trend [Mm ³ /jaar]	trend [Mm ³ /jaar]
1	0	0	-0.06	0
2	-0.15	-0.07	-0.09	0
3	-0.35	-0.19	0	-0.25
4	0	0	0.11	0
5	0.13	0.13	-0.22	0
6	-0.28	-0.34	-0.81	-0.17
7	-0.73	-0.3	-0.77	-0.64
8	-1.05	-1.27	0.14	-0.88
9	0.41	0.41	0.24	0.35
10	0.54	0.52	0.75	-0.12
11	-0.02	0	-0.29	0.84
12	-0.11	-0.32	0.53	0.26
13	1.08	1.29	0.23	1.09
14	0.13	0.1	0.22	0.04
15	0.23	0.15	0	0.47
16	-	-0.01	-0.12	-0.14
17	-0.13	-0.23	0	-0.19
18	0	0	-0.06	0
kust Terschelling	-0.3	-0.28	-0.17	-0.17
kust Ameland	-0.12	-0.18	0.24	-0.24
ETD	0.12	0.33	-0.21	0.9
Totaal	-0.3	-0.13	-0.14	0.49

Het bekken

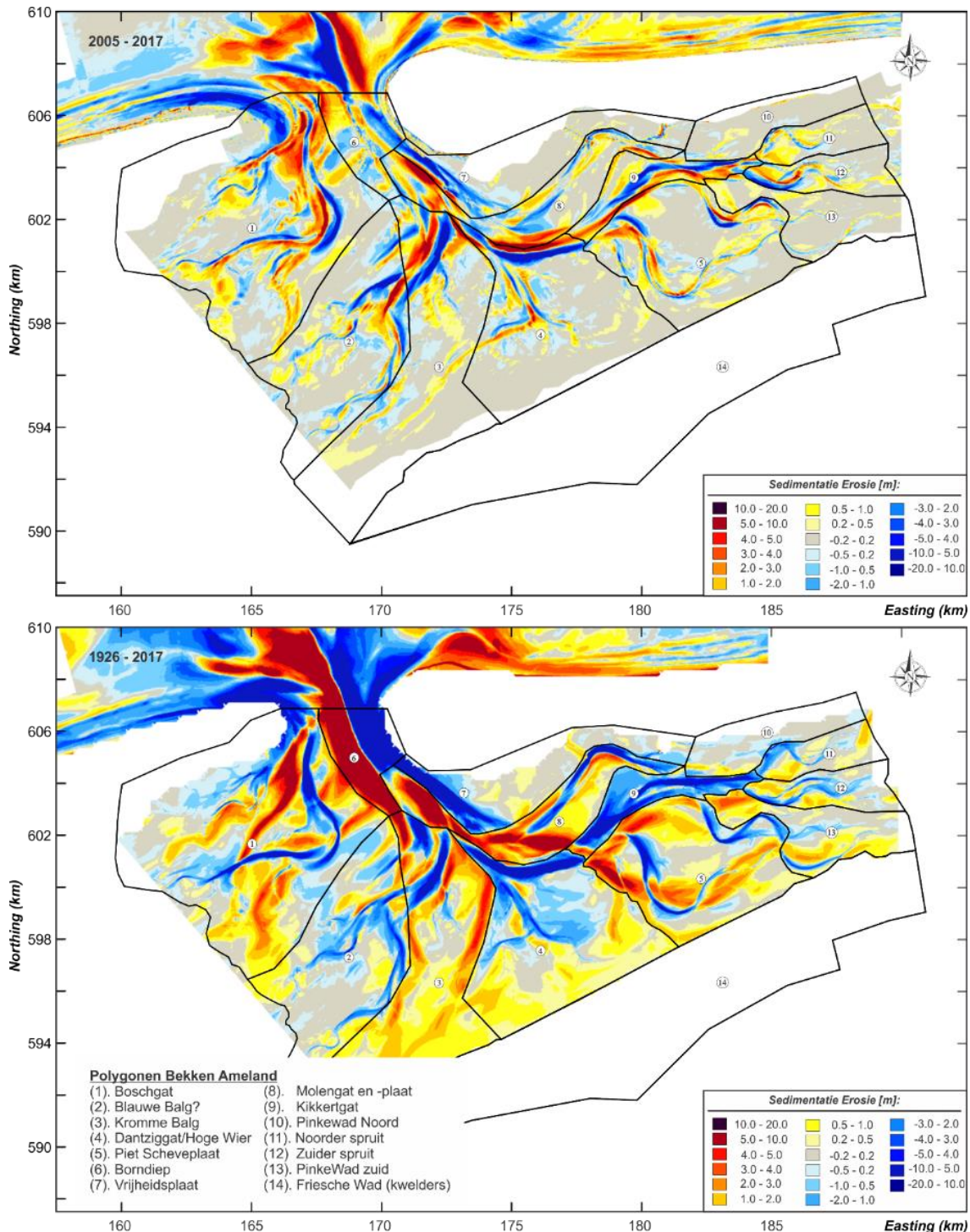
Figuren B.7 en B.8 geven een overzicht van de geobserveerde volumeveranderingen en de sedimentatie-erosiepatronen over de periode 1927-2017. Het is opmerkelijk dat in tegenstelling tot de kustzone, het bekken vrijwel geen fluctuaties in het volumeverloop vertoont (Figuur B.7). Het tijdsverloop vertoont een vrijwel stabiele ligging tot 1974. Sinds 1974 vindt er een lineaire trend van sedimentatie plaats. Gemiddeld over de gehele periode resulteert dit in een sedimentatiesnelheid van 0.62 Mm³/jaar. Beschouwen we echter de periode 1974-2015 dan ligt deze snelheid met 1.22 Mm³/jaar significant hoger. Deze snelheid is vrijwel gelijk aan die van de huidige (2005-2017) sedimentatiesnelheid. De significant lagere lange-termijn trend roept wel de vraag op of deze representatief is.



Figuur B.7 (rechts) Volumeveranderingen in het bekken van Ameland inclusief trendlijnen voor de periodes 1926-2017 (oranje), 1974-2017 (blauw) en 2005-2017 (rood).

Deze trend wordt vooral bepaald door 2 oude bodemmetingen. Uit de aanvullende analyses (samengevat in Tabel B.8. volgt dat de lange-termijn trend waarschijnlijk wat hoger moet liggen. We hanteren hiervoor een waarde van 1.04 Mm³/jaar. Deze hogere waarde komt vooral

doordat we uit de analyse concluderen dat het beginjaar (1926) niet representatief is. Deze waarden nemen we dan ook niet mee in gecorrigeerde aanvullende trendlijnanalyse (Tabel B.8. kolom D en E). De trendlijn voor de huidige periode komt uit op 1.43 Mm³/jaar (Tabel B.9).



Figuur B.8 Een overzicht van de deelpolygonen voor het bekken geprojecteerd op het sedimentatie-erosie patroon van de 2005-2017 en 1926-2017 bodems.

Tabel B.8 Een overzicht van de trendwaarden voor lange termijn veranderingen voor methode A – E (bekken Ameland).

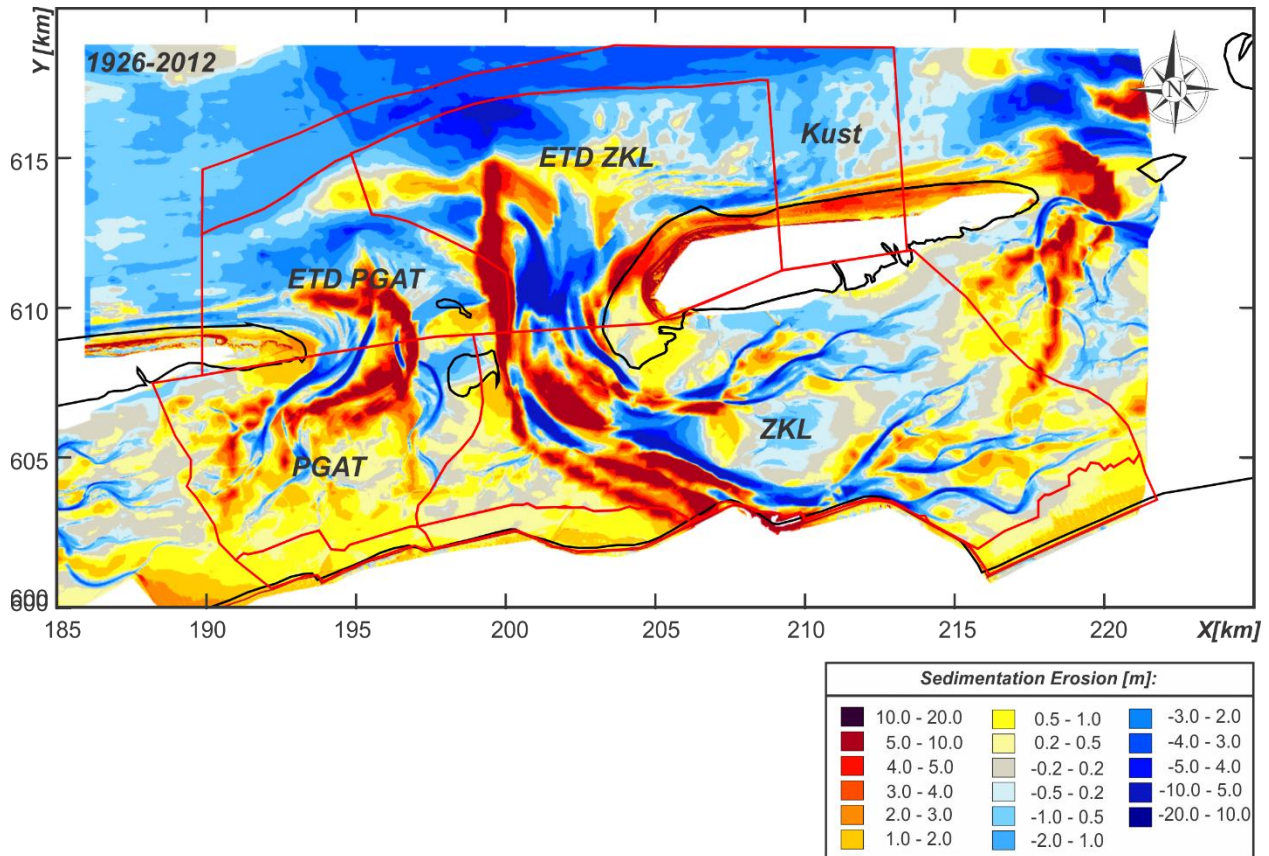
Polygoon	Langetermijntrends (1926/1948 – 2018)					Beste Schatting
	(A) netto	(B) bruto	(C) bruto+TR	(D) bruto+corr	(E) bruto+TR+corr	
1	0.16	0.10	0.08	0.40	0.44	0.44
2	-0.1	-0.10	-0.14	-0.08	-0.02	-0.02
3	0.31	0.35	0.41	0.35	0.43	0.35
4	-0.15	-0.16	-0.21	-0.12	-0.20	-0.20
5	0.15	0.15	0.10	0.15	0.11	0.15
6	0.43	0.42	0.53	0.33	0.30	0.30
7	-0.26	-0.25	-0.18	-0.26	-0.20	-0.26
8	0.32	0.30	0.24	0.44	0.36	0.36
9	-0.20	-0.21	-0.18	-0.16	-0.14	-0.14
10	-0.01	-0.01	0	-0.01	-0.01	-0.01
11	0	0	-0.01	0.02	0.03	0.03
12	-0.02	-0.03	-0.03	-0.04	-0.03	-0.03
13	0.06	0.05	0.04	0.08	0.07	0.07
14	0	-	-	-	-	0.0
Totaal			1.04			1.04

Tabel B.9 Samenvattend overzicht trendwaarden over verschillende perioden voor het bekken van Ameland.

Polygoon	1926 / 1948 -2015	1974 - 2015	1989 - 2015	2005-2018
	trend [Mm ³ /jaar]	trend [Mm ³ /jaar]	trend [Mm ³ /jaar]	trend [Mm ³ /jaar]
1	0.44	0.36	0.73	0.56
2	-0.02	-0.25	-0.29	-0.19
3	0.35	0.34	0.12	0.1
4	-0.20	-0.06	-0.03	-0.08
5	0.15	0.18	0.3	0.29
6	0.30	0.44	-0.08	0
7	-0.26	-0.31	-0.57	-0.38
8	0.36	0.6	1.2	0.85
9	-0.14	-0.06	0.02	0.1
10	-0.01	-0.02	-0.05	0.01
11	0.03	0.02	0.03	0.07
12	-0.03	-0.08	-0.09	0.02
13	0.07	0.09	0.14	0.07
14	0.0	-	-	-
Totaal	1.04	1.25	1.43	1.42

B.4 Berekende trends in het Friesche Zeegat

De kustzone en buitendelta



Figuur B.9 Een overzicht van de sedimentatie-erosiepatronen en de volumes in het Friesche Zeegat voor de gehele periode 1926-2012.

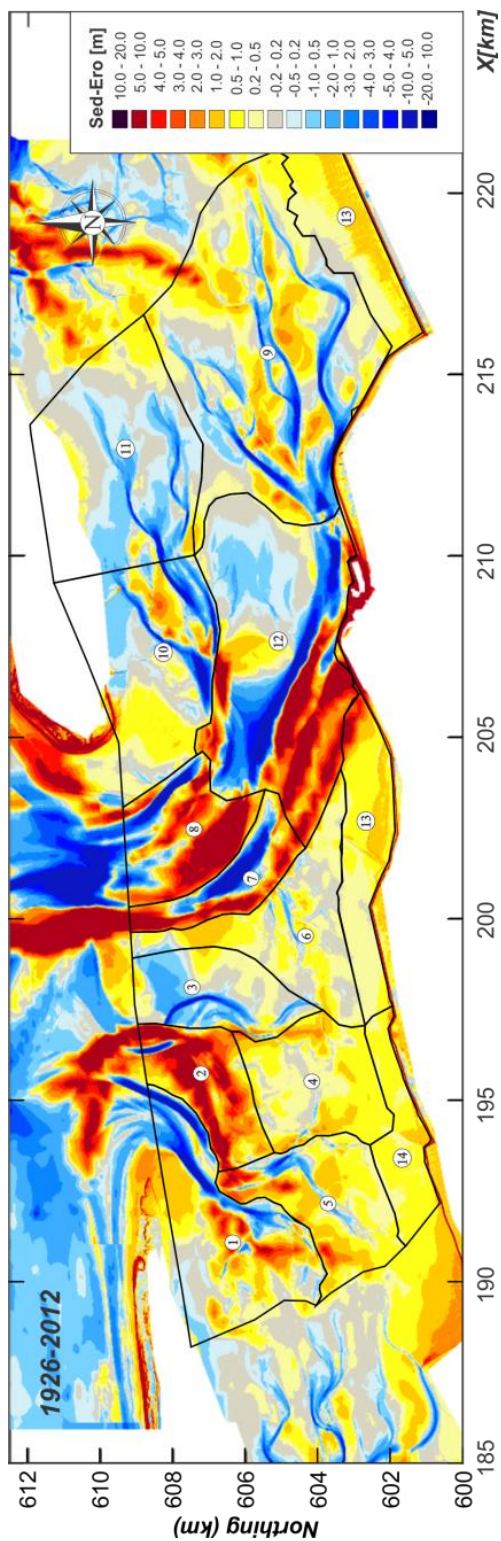
Tabel B.10 Een overzicht van berekende lange-termijn trends voor het Friesche Zeegat.

Polygoon	Volumeverlies trend [Mm ³ /jaar]					Beste Schatting
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	
ETD west (PGAT)	+0.33	+0.41	+0.39	+0.36	+0.28	+0.28
ETD oost (ZKL)	-0.76	-0.71	-0.62	-1.17	-0.95	-0.95
Totaal ETD					-0.67	-0.67
Kust	-0.68	-0.63	-0.98	-0.63	-0.78	-0.63
Kust +ETD	-1.30					-1.30

Tabel B.11 Een overzicht van berekende huidige trends voor het Friesche Zeegat.

Polygoon	Volumeverlies trend [Mm ³ /jaar]					Beste Schatting
	1989-2012	(A)	(B)	(C)	(D)	
ETD PGAT	-0.45	-0.51	-0.28	-0.30	-0.07	-0.30
ETD ZKL	-0.53	-0.58	-0.50			-0.50
Totaal ETD	-0.98					-0.80
Kust	-0.83	-0.71	-0.73	-0.45	-0.47	-0.47
Kust +ETD	-1.81	-1.27				-1.27

Het Bekken



Figuur B.10 Een overzicht van de deelpolygonen voor het bekken geprojecteerd op het sedimentatie-erosie patroon van de 1926-2012 bodems.

Tabel B.12 Overzicht trendwaarden voor langetermijn. voor methode A – E (bekken Friesche Zeegat).

Polygoon	Volumeverlies trend [Mcm/jaar]					Beste Schatting
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	
1	0	-0.02	-.14	-0.20	-0.15	-0.15
2	0.24	0.10	0.23	0.39	0.39	0.39
3	0	-0.05	0.04	-0.05	-0.01	0.00
4	0.08	0.10	0.10	0.08	0.07	0.08
5	0.12	0.12	0.11	0.03	0.03	0.03
6	0.05	0.06	0.04	0.10	0.11	0.11
7	0.1	0.13	0.12	0.04	0.07	0.07
8	0.42	0.41	0.49	0.49	0.53	0.53
9	0	-0.03	-0.01	0	0.03	0.03
10	-0.07	-0.08	-0.02	-0.10	-0.10	-0.10
11	-0.07	-0.05	-0.05	0.05	0.05	0.05
12	0.44	0.45	0.57	0.53	0.68	0.68
13	0.11	0.14	0.11			0.11
14	-	-	-	-	-	-
Pgat	0.46					0.46
ZKL	1.37					1.37
Totaal	1.83					1.83

Tabel B.13 Overzicht trendwaarden voor middel-langetermijn. voor methode A – E (bekken Friesche Zeegat).

Polygoon	Middel-langetermijntrends (1989 – 2012)					Beste Schatting
	(A) netto	(B) bruto	(C) bruto+TR	(D) bruto +corr	(E) bruto+TR +corr	
1	-0.29	-0.37	-0.35			-0.37
2	0.38	0.23	0.19			0.23
3	-0.1	-0.16	-0.10			-0.16
4	-0.04	-0.02	-0.02			-0.02
5	0.12	-0.02	0.09			0.09
6	0.02	-0.05	-0.06			-0.05
7	-0.49	-0.75	-0.49			-0.49
8	0.48	0.89	0.66			0.66
9	0.03	0.26	0.14			0.14
10	-0.12	-0.13	-0.07			-0.13
11	-0.1	-0.13	-0.13			-0.13
12	0.25	0.36	0.22			0.22
13	0.11*	-	-			
14		-	-			
Pgat	-0.28					-0.28
ZKL	0.27					0.27
Totaal	-0.01					-0.01