

**Een actuele sedimentbalans  
van het Friesche Zeegat (1926-  
2012)**

**concept**





# **Een actuele sedimentbalans van het Friesche Zeegat (1926-2012)**

Edwin Elias



**Titel**

Een actuele sedimentbalans van het Friesche Zeegat (1926-2012)

<b>Opdrachtgever</b> Rijkswaterstaat WVL	<b>Project</b> 11202190-000	<b>Kenmerk</b> 11202190-000-ZKS-0017	<b>Pagina's</b> 27
---	--------------------------------	---	-----------------------

**Trefwoorden**




Sedimentbalans, Waddenzee, Friesche Zeegat

**Samenvatting**

De voorliggende rapportage geeft een actualisatie van de sedimentbalans van het Friesche Zeegat. Voor het opstellen van de sedimentbalans zijn 18 representatieve bodems voor het Friesche Zeegat opgesteld over de periode 1926-2012, waarvan 13 bodems een volledige dekking van kust, buitendelta en bekken hebben. De overige 5 bodems dekken alleen de kustzone en buitendelta. De geconstrueerde sedimentbalans vertoont goede overeenkomsten met de reeds bestaande studies van Oost (1995) en Elias et al. (2012). In totaal vindt er over de periode 1926-2012 een volumeverlies van -26 miljoen m<sup>3</sup> (mcm) plaats van de buitendelta en -63 mcm van de aanliggende kust. In het bekken treedt een netto aanzanding op van 97 mcm.

**Referenties**

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.1	dec. 2018	Edwin Elias		Pieter Koen Tonnon		Dirk-Jan Walstra	

**Status**

concept

Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.



## Inhoud

<b>1 Inleiding en Doelstelling</b>	<b>1</b>
<b>2 Beschikbare data</b>	<b>3</b>
2.1 Bodemdata	3
<b>3 Morfologische ontwikkelingen in de Oostelijke Waddenzee 1927-2014</b>	<b>9</b>
3.1 Een overzicht van de kombergingsgebieden, geulen en platen in de Oostelijke Waddenzee	9
3.2 De morfologische veranderingen van het Friesche Zeegat in detail.	13
<b>4 Een schatting van de sedimentbalans</b>	<b>17</b>
4.1 Methode	17
4.2 Kwaliteitsborging, een toets van de berekende getallen	19
4.3 Sedimentbalans van het Friesche Zeegat	20
<b>5 Conclusies en Aanbevelingen</b>	<b>25</b>
<b>6 Referenties</b>	<b>27</b>





## 1 Inleiding en doelstelling

In de recente studie van Elias (2018) is er een gedetailleerde sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee gemaakt over de periode 1933-2015. Hiervoor is een nieuwe methode van analyse toegepast. De methode maakt gebruik van gedetailleerde trendlijnanalyse van de individuele sedimentatie-erosie gebieden. Met behulp van deze methode is het mogelijk zowel de lange-termijn trend en de huidige trend af te schatten. Deze trends dienen als invoer van een sediment-box model waarmee de huidige sedimentvraag van de Westelijke Waddenzee beter kan worden afgeschat en onderbouwd. Dit rapport vormt een onderdeel van een soortgelijke studie naar de sedimentbalans van de Oostelijke Waddenzee. De Oostelijke Waddenzee wordt gevormd door het Amelander zeegat, het Friesche zeegat en het Groninger Wad (Figuur 1.1). In dit eerste deel van de studie richten we ons op het Friesche zeegat.

De voorliggende rapportage beschrijft de beschikbare bodem data en de constructie van representatieve kaarten voor het Friesche zeegat (Hoofdstuk 2). Deze bodemkaarten vormen de basis van de morfologische beschrijving zoals gepresenteerd in Hoofdstuk 3 en een eerste afschatting van de sedimentbalans op basis van grootschalige gebieden (Hoofdstuk 4). Deze grootschalige analyse is een essentiële eerste stap voor het opstellen van de sedimentbalans op het niveau van de morfologische eenheden (dit onderzoek wordt uitgevoerd in het voorjaar van 2019). Hoofdstuk 5 geeft de conclusies en aanbevelingen.



Figuur 1.1 Een satellietfoto van de Waddenzee met onderverdeling in Westelijke en Oostelijke Waddenzee.

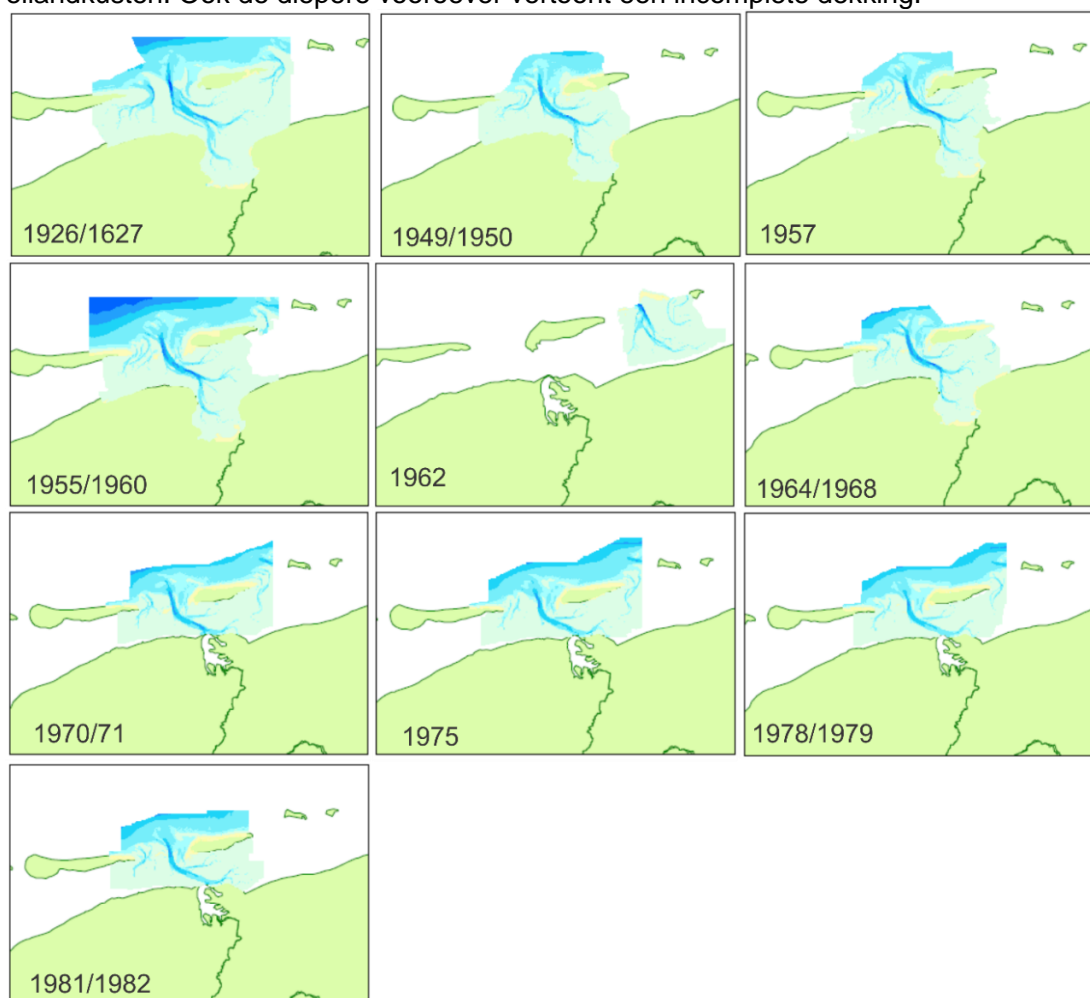


## 2 Beschikbare data

### 2.1 Bodemdata

De beschikbare bodemdata bestaat eigenlijk uit 2 delen. De data voor 1991 is de data gedigitaliseerd van minuutbladen en aangevuld met bijv. landaanwinningsgegevens, kustmetingen en detailkaarten waar nodig. Deze bodems zijn geconstrueerd in het kader van het eerste Kustgenese onderzoek, zie Oost en de Haas (1992) voor details. 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 vergelijkingen tussen de verschillende jaren mogelijk zijn.

Als onderdeel van de studie van De Kruif (2001) zijn destijds alle bodemdata verzameld en gearchiveerd. Figuur 2.1 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 2.1 en Figuur 2.3). Ten behoeve van de sedimentbalans berekeningen zijn missende datapunten zo nauwkeurig mogelijk ingevuld. Dit is vooral het geval langs de eilandkusten. Ook de diepere vooroever vertoont een incomplete dekking.



**Figuur 2.1** Beschikbare bodemdata 1926 en 1981 (bron de Kruif, 2001).

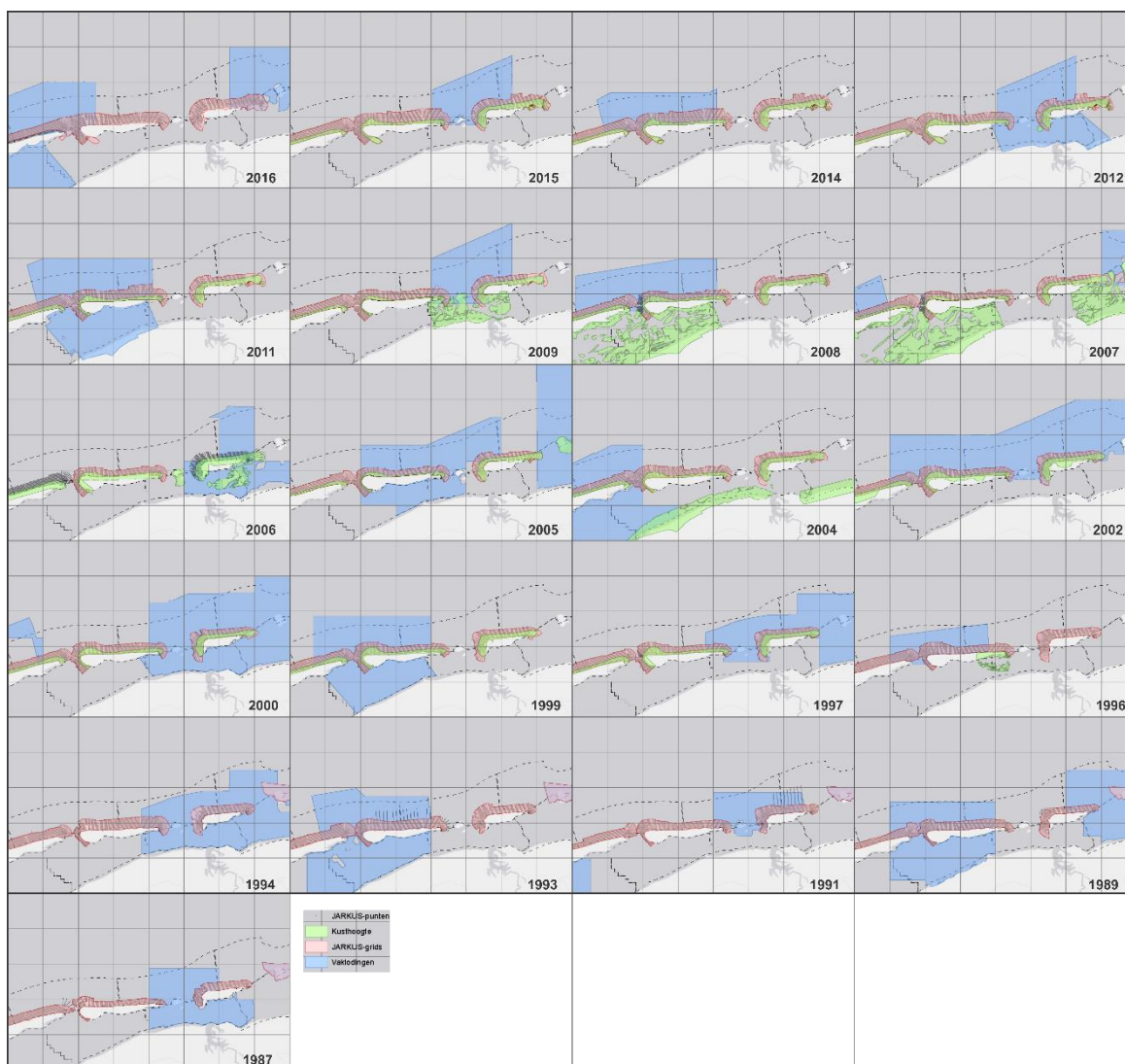
De bodems na 1987 zijn in 20m resolutie aanwezig in het Rijkswaterstaat Vaklodingen bestand. Na inwinning van de dieptelodingen worden complete kaartbladen opgebouwd door de lodingen aan te vullen met de waterpassingen en tegenwoordig Lidar metingen van de droogvallende platen in de Waddenzee en de Jarkus metingen van de kust. De opgevulde datasets worden met behulp van het programma digipol (Digipol, 1997) geïnterpoleerd naar de hoekpunten van een 20x20 m rooster en vervolgens opgeslagen als Vaklodingen kaartbladen. De kustzone wordt in 3-jaarlijks interval opgenomen terwijl het bekken elke 6 jaar wordt bemeten. Dit bestand is ook gearhiveerd in de Open-Earth dataset. Figuur 2.2 geeft een overzicht van de databeschikbaarheid. In de Oostelijke Waddenzee lijken de data zoals beschikbaar vanuit de Open-Earth datasets en de data zoals beschreven door De Kruij (2001) overeen te komen.

Met behulp van de kaartbladdata zijn vervolgens 10 bodemkaarten voor het Friesche Zeegat opgebouwd (Tabel 2.1 en Figuur 2.4). 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. Het is de verwachting dat er ook voor de 2015/2016 periode een recente opname van het bekken beschikbaar komt. Indien beschikbaar zal deze bodem worden meegenomen in de detail volumeanalyse zoals gepland voor het voorjaar van 2019.

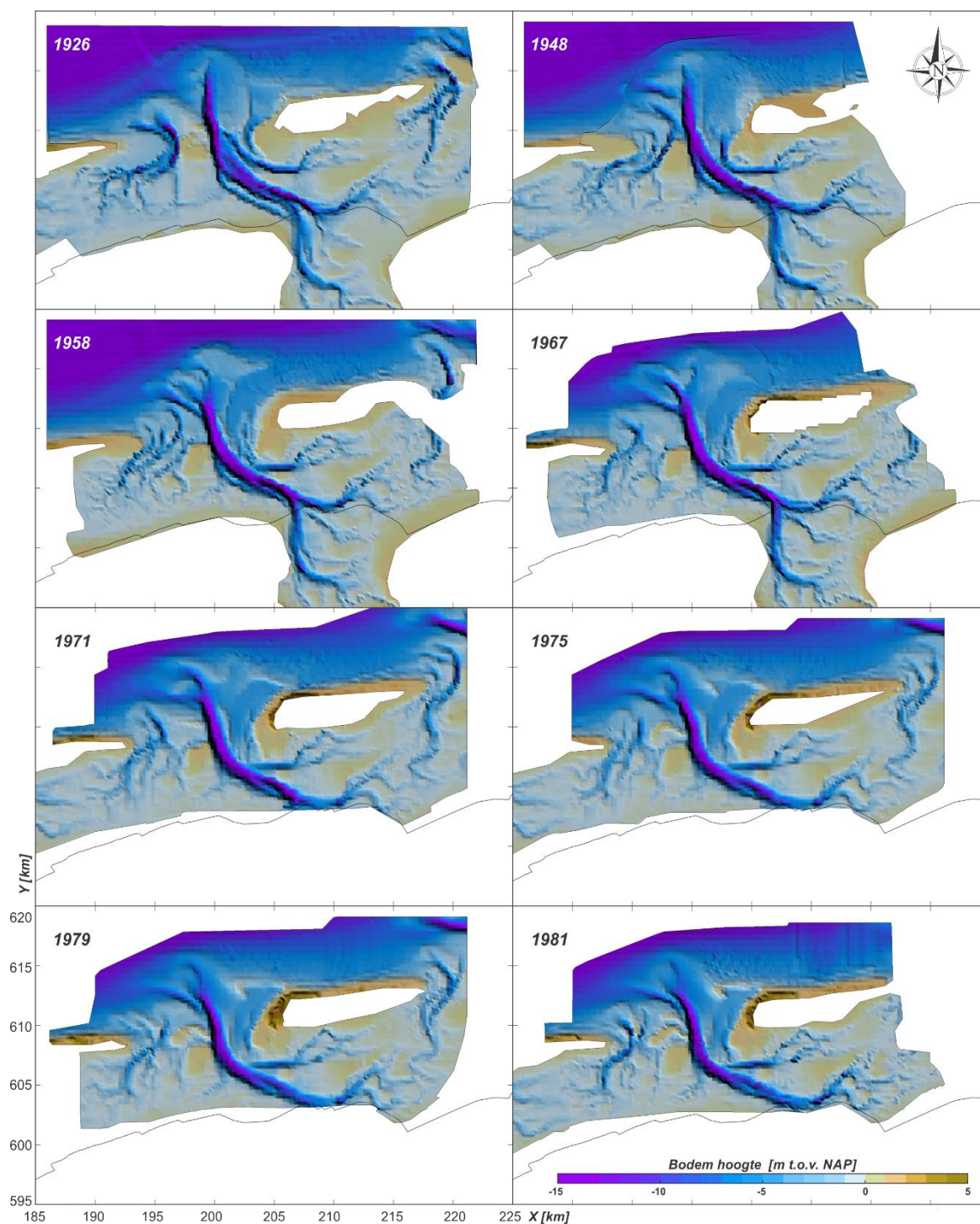
Over het algemeen zijn de getoonde jaren goed voor 90-100% invulling van de bodemkaarten. Hierbij moet opgemerkt worden dat onze polygoonbegrenzing zodanig is gekozen dat een optimale dekking wordt verkregen. Kleinere gebieden met missende data zijn op verschillende manieren aangevuld. Waar mogelijk zijn aanvullende Lidar opnamen gebruikt om droogvallende gebieden in te vullen. Dit is met name gebeurt voor de Engelsmansplaat in 2004.

**Tabel 2.1** Een overzicht van de gebruikte bodemdata voor het Friesche Zeegat (ETD = ebb-tidal delta / buitendelta).

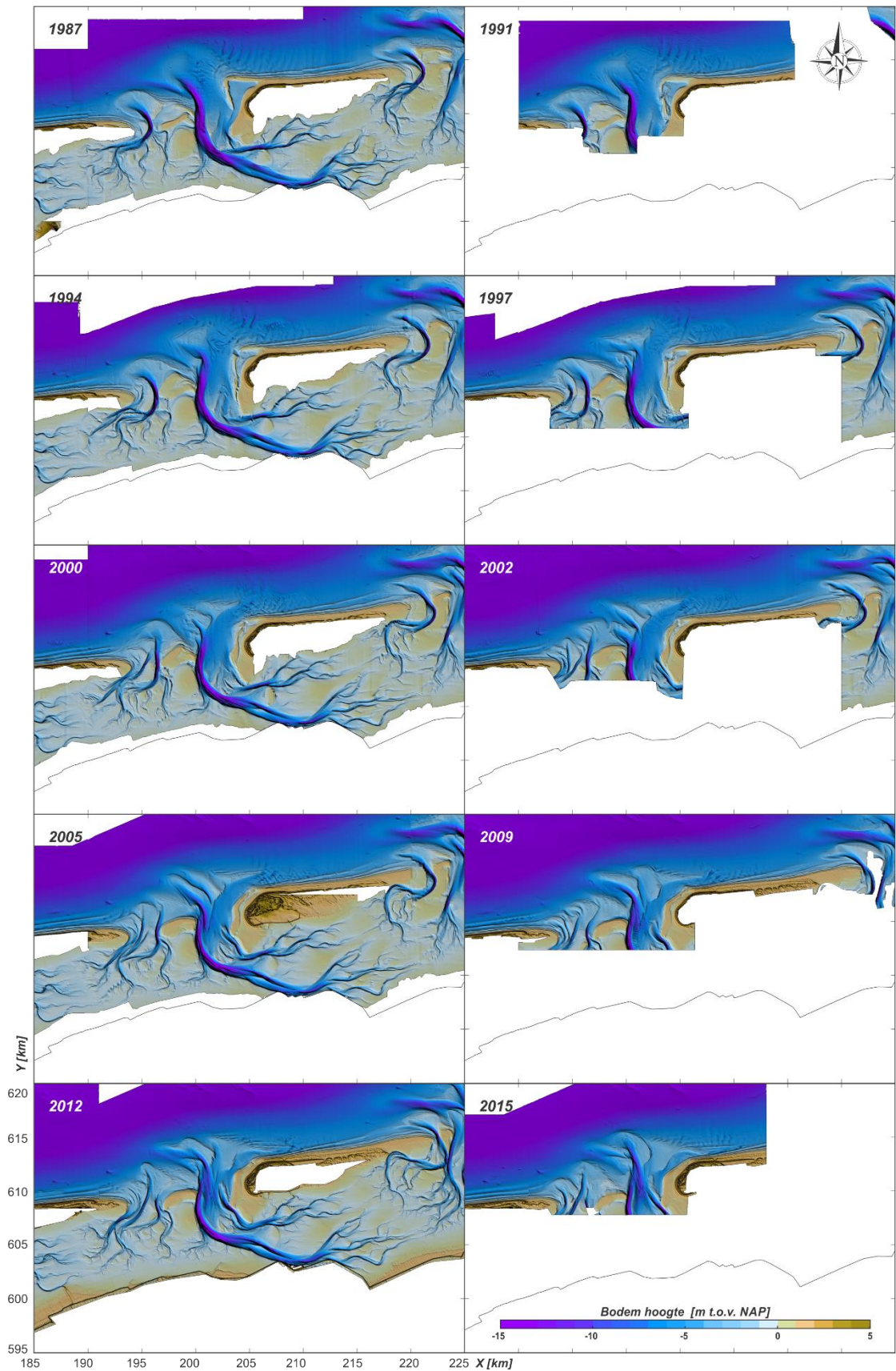
Rep. jaar	Kust	ETD	Bekken	Opmerkingen	
(1)	1926	1926-1927	1926-1927	1926-1927	kust opvullen met 1958
(2)	1948	1949/1950	1949/1950	1949/1950	kust opvullen met 1958
(3)	1958	1955-1960	1955-1960	1955-1960	Alles buiten de buitendelta = 1958
(4)	1967	1964-1968	1964-1968	1964-1968	ZKL – oostkant opvullen met 1967 +1971 kust – oostkant opvullen met 1971
(5)	1971	1970-1971	1970-1971	1970-1971	Zlaag – zuidoostpunt opvullen met 1967 kust - westzijde opgevuld met 1975 data
(6)	1975	1975	1975	1975	Zlaag – opvullen zuidoostpunt 1981 data
(7)	1979	1978-1979	1978-1979	1978-1979	Zlaag – opvullen oostpunt 1975 – 1981 data
(8)	1981	1981-1982	1981-1982	1981-1982	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 - Zlaag (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



**Figuur 2.2** Data beschikbaarheid in de Oostelijke Waddenzee over het interval 1987-2016.



**Figuur 2.3** Geconstrueerde bodems voor het Friesche Zeegat tussen 1926 en 1981.



**Figuur 2.4** Geconstrueerde bodems voor het Friesche Zeegat tussen 1987 en 2015.





### 3 Morfologische ontwikkelingen in de Oostelijke Waddenzee 1927-2014

#### 3.1 Een overzicht van de kombergingsgebieden, geulen en platen in de Oostelijke Waddenzee

In dit gedeelte van de studie richten we ons nog op het Friesche Zeegat, maar in het vervolgonderzoek zullen we ons richten op zowel het Zeegat van Ameland en het Friesche Zeegat (Figuur 3.1). Het Groninger Wad, het stukje Waddenzee gelegen ten oosten van Schiermonnikoog wordt hier niet geanalyseerd. De belangrijkste reden hiervoor is de dynamiek van de buitendelta's, de uitwisseling met de Eems Dollard en de vele ingrepen (bagger- en stort werkzaamheden). Dit maakt het lastig hier een goede begrenzing te trekken ter afbakening van het sediment-balans gebied. Zo'n afbakening is tussen het Friesche Zeegat en het Groninger Wad wel goed te definiëren.

Als afbakening tussen de verschillende zeegaten worden vaak de wantijen gebruikt. Voor het Zeegat van Ameland zijn dat respectievelijk het Terschellinger Wad aan de westzijde en het Pinke Wad aan de oostzijde. Het Friesche zeegat wordt aan de oostzijde begrensd door het Hornhuizer Wad. Langs de kust vinden we, van west naar oost, de kwelder gebieden Friesche wad, Wierumer Wad en Groninger Wad (Figuur 3.1 boven).

Een representatief beeld van de huidige geulen en platen in de zeegaten wordt weergegeven in Figuur 3.1 (onder) op basis van de 2009-2014 Vaklodingen. In de beschrijving van deze figuur verwijzen de getallen tussen de rechte haken [...] naar de nummering weergegeven in de figuur. 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 bevinden zich nog de geul zoals Molengat [7]. Kleinere neven geulen bevinden zich aan de zuidzijde van Dantziggat zoals Vaarwater vd Zwarte Haan [8].

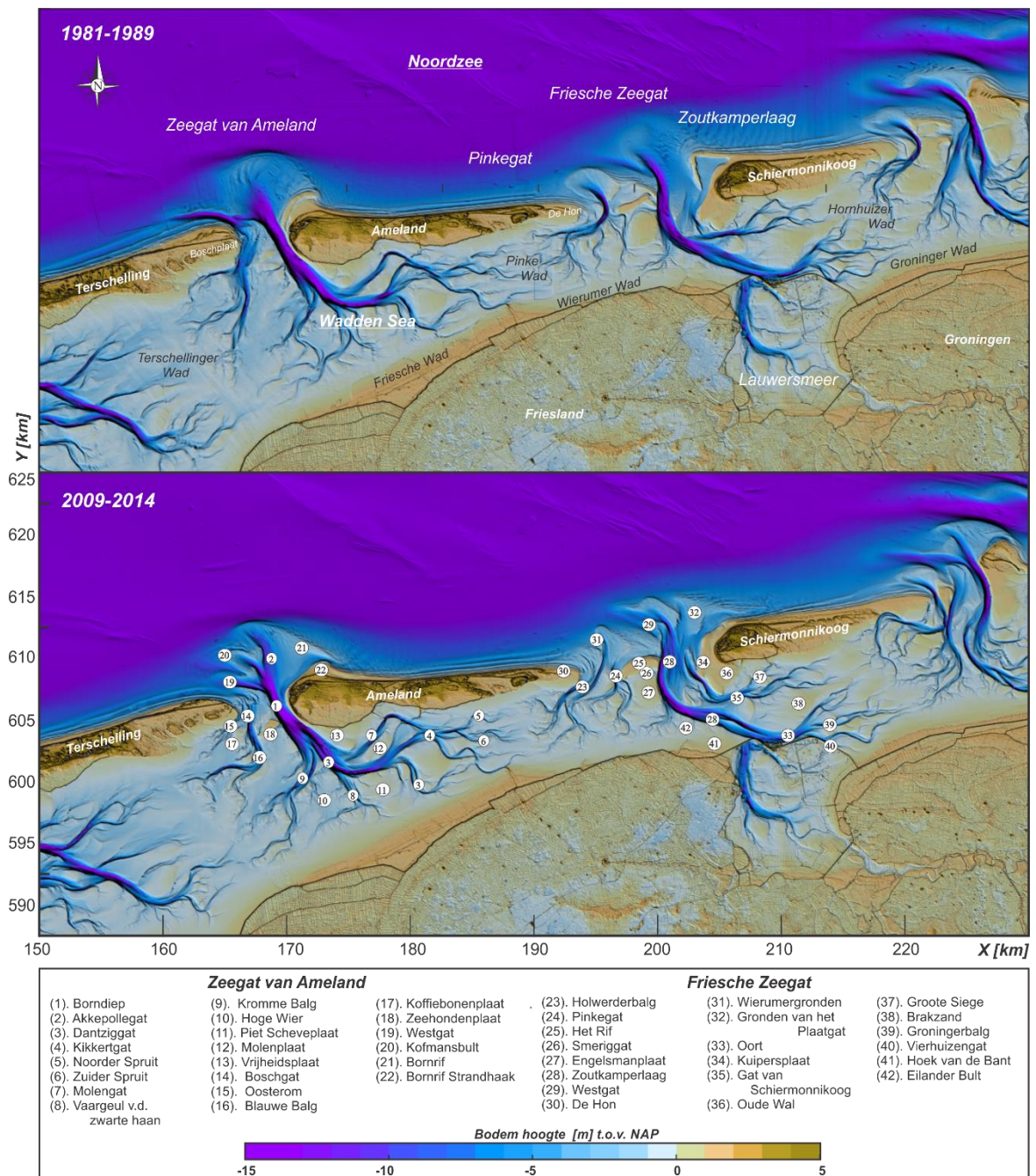
Tussen het Borndiep en de oostpunt van Terschelling (Boschplaat) bevindt zich een ondiep gebied met verschillende kleinere geulen. Dit gebied verbindt de hoofdgeul in het bekken (Boschgat [14]) met de zeewaarts gelegen geul Westgat [19]. In het bekken gaat Boschgat over in de geul Blauwe Balg [16]. De 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 [18] 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, de dominante, geul op de buitendelta, maar is recentelijk sterk in omvang afgenomen. 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. Op de kust van Ameland zien we nog overblijfselen van de Bornrif Strandhaak [22] terug. De Bornrif Strandhaak is rond 1985 aangeland en heeft sindsdien de kust gevoed met zand (een natuurlijke “zandmotor”).

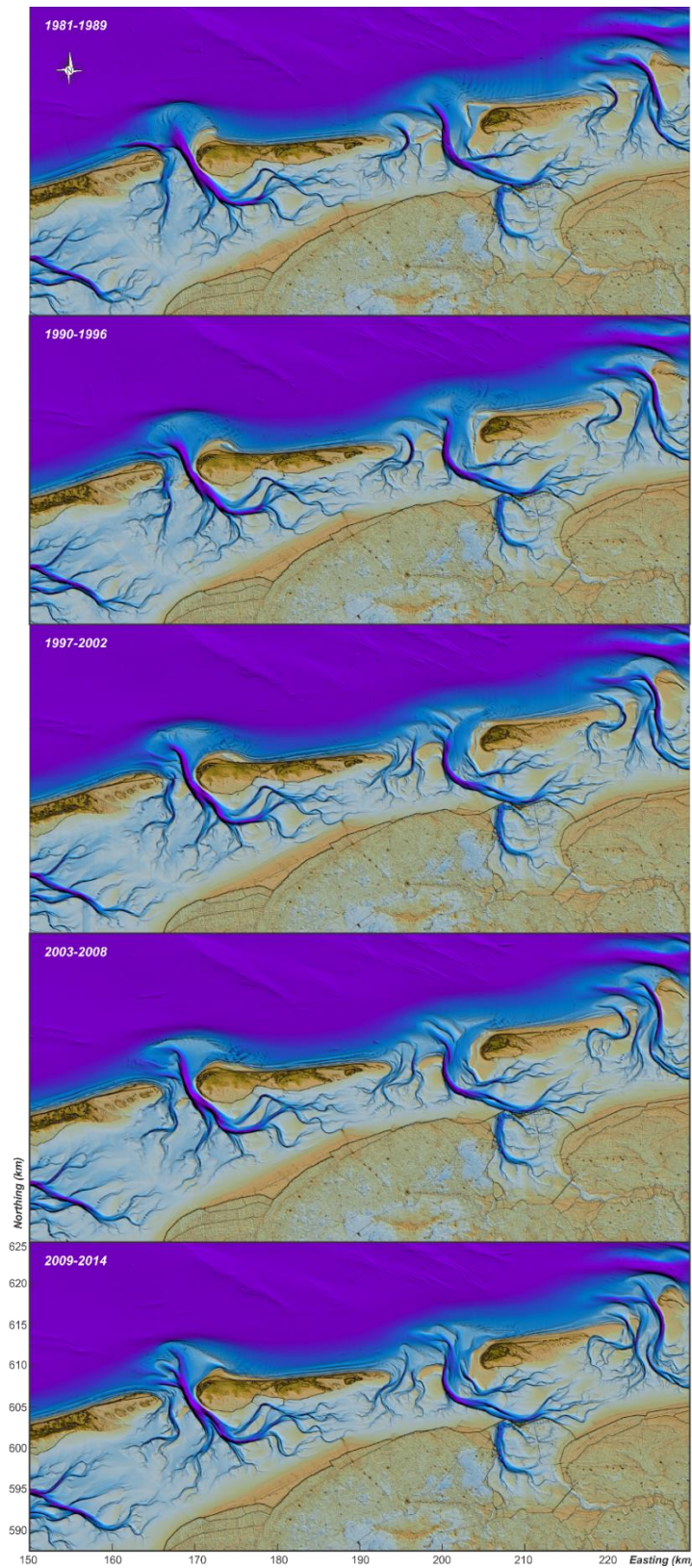
Het Pinke Wad vormt de scheiding tussen de bekkens van het zeegat van Ameland en het Friesche Zeegat. Beide zeegaten vertonen eigenlijk een overeenkomstige configuratie van geulen en platen. De hoofdgeul bevindt zich aan de oostzijde van de keel van het zeegat en strekt zich in het bekken naar het oosten uit. Aan de westzijde vinden we bij beide zeegaten een wat kleiner geulen systeem. In het bredere Friesche zeegat is dit nevensysteem meer ontwikkelt. 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 [28] 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 voortgedaan (Figuur 3.2). Deze veranderingen zijn mede veroorzaakt door de afsluiting van de Lauwerszee, voltooid 1969.



**Figuur 3.1** 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 lijnen geven de Wantijen weer.



**Figuur 3.2** Een overzicht van de recente ontwikkelingen in de Oostelijke Waddenzee.

### 3.2 De morfologische veranderingen van het Friesche Zeegat in detail.

De grote invloed van de afsluiting van de Lauwerzee (nu Lauwersmeer) in 1969 is bekend (zie o.a. Biegel, 1993; Oost, 1995). Oost (1995) geeft aan dat er vóór de afsluiting zowel in het Pinkegat en het Zoutkamperlaag deelsysteem een cyclische ontwikkeling tussen een één- en twee-geulsystemen te zien was. Na afsluiting, vonden er grote veranderingen in zowel het bekken als het zeegat plaats (Figuur 3.3). De afsluiting verkleinde de bekkenoppervlakte met ongeveer 30%, waardoor het getijprisma reduceerde van 306 miljoen m<sup>3</sup> naar 200 miljoen m<sup>3</sup>. Deze grote afname in getijprisma was mede verantwoordelijk voor de morfologische veranderingen; het zeegat tracht een nieuw morfologisch evenwicht te vormen met het verkleinde prisma. Door de gereduceerde getijstromingen kon de omvang en de vorm van de oorspronkelijke buitendelta niet worden behouden. Golf-gedreven transporten duwen de buitendelta landwaarts en een grote Strandhaak werd gevormd aan de noordwestpunt van Schiermonnikoog (Figuur 3.2, 1981-1989). De aanlanding van deze Strandhaak en de herverdeling van dit sediment bepaalt in grote mate de huidige morfologische ontwikkeling van het achterliggende deel van het eiland (Figuur 3.2).

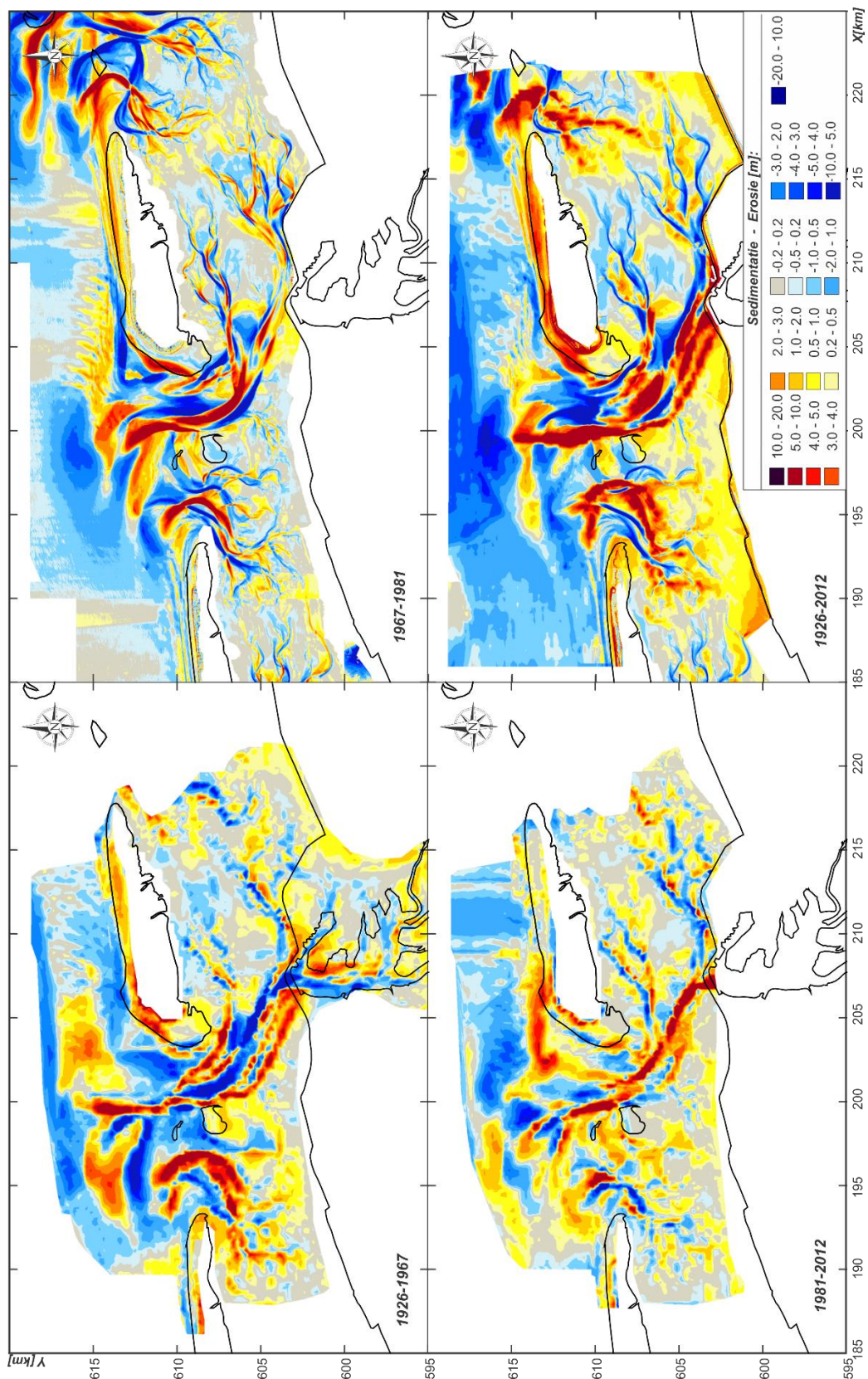
Voor de oostpunt van Ameland (de Hon) zijn het vooral de ontwikkelingen van het Pinkegat die belangrijk zijn. Het werk van Oost (1995) beschrijft de langtermijn ontwikkeling van het Pinkegat in detail. Oost concludeert na bestudering van de morfologische veranderingen over de periode 1809-1991 dat er een duidelijke cyclische ontwikkeling aanwezig is. Tijdens deze cyclus vervormt het zeegat van een één-geul naar een twee-geulen systeem en weer terug. Dit gebeurt in een tijdsbestek dat ligt tussen de 20 en 40 jaar. Ook na de afsluiting van de Lauwerszee zien we perioden met enkele of dubbele geulconfiguratie terug. Zo is er in de bodems tussen 1981 en 1994 (Figuur 2.3 en Figuur 2.4) nog duidelijk sprake van een enkele dominante geul. Sinds 1994 zien we eigenlijk een steeds sterker ontwikkelend 2-geulen systeem. Het Pinkgat wordt daarbij ondieper en minder dominant, terwijl het tweede geul systeem (Holwerderbalg) juist in omvang toeneemt. Rond 2000 zien we zelfs een 3-geulen systeem, tussen Holwerderbalg en de kust is weer een nieuwe geul gevormd. Alle geulen verplaatsen zich naar het oosten tot ze geremd worden door de Engelsmansplaat. Een duidelijke cyclus is hier eigenlijk nog niet terug te zien, maar de periode van observatie is hiervoor misschien ook te kort.

Engelsmanplaat vormt een belangrijk element binnen het zeegat. De Engelsmanplaat is lange tijd een hooggelegen gebied geweest (Oost, 1995). De kern bestaat uit erosie-resistente Holocene klei. Aan de noordkant hiervan hebben zich in de afgelopen vijf eeuwen grote (droogvallende) zandbanken ontwikkeld. Dit heeft geleid tot een cyclisch patroon van morfologische ontwikkeling. De Engelsmanplaat vergroot in oppervlak en in hoogte als de zandbank aan de noordkant aansluit en de kortsluitgeul afsluit. Deze zandbank ontstaat door golven en vloedstroming en krijgt zand van de buitendelta's (van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag). Na het ontstaan groeit de zandbank tot een droogvallend zandlichaam, en migreert naar het zuiden. Door de afscherming van de zandbank wordt het zandtransport naar de Engelsmanplaat geblokkeerd waardoor de plaat erosie vertoont. Na verloop van tijd verdwijnt de kortsluitgeul en de droogvallende zandbank voegt samen met de Engelsmanplaat. Telkens als dit gebeurt (ongeveer eens in 100 jaar), vergroot de Engelsmanplaat zich plotseling zowel in oppervlak als hoogte. Daarna gaat de plaat weer eroderen doordat er een geul aan de noordkant ontstaat, waarna de cyclus opnieuw begint. Het merendeel van de tijd vertoont de Engelsmanplaat dus erosie. Naast een cyclische ontwikkeling is er ook een structurele trend van erosie vanuit de westkant van de plaat. De breedte van Engelsmanplaat is afgenomen van 7.1 km in 1832 tot 2.2 km in 1991.

In de huidige morfologie wordt de droogvallende zandbank ten noorden van de Engelsmanplaat het Rif genoemd (Figuur 3.1, [26,25]). Deze zandbank is nu gescheiden van de Engelsmanplaat door de kortsluitgeul het Smeriggat (Figuur 3.1, [26]). Volgens Oost (1995) is de Engelsmanplaat al aan het verlagen sinds 1970, en ook het Rif vertoont verlaging in de periode 1982-1991. De verlaging van het Rif is een gevolg van de ontwikkeling van een nieuwe zandbank ten noorden daarvan. Redenerend vanuit de cyclische ontwikkeling was de verwachting dat het Rif binnen korte tijd aan de Engelsmanplaat zou aansluiten en het Smeriggat zou verdwijnen als geul. De nieuwe zandbank ten noorden van het Rif zou dan de rol van het huidige Rif overnemen. Deze ontwikkeling heeft zich echter niet doorgezet (zie ook Wang 2007). Ook in de recente 2011 bodem zijn het Rif en Engelmansplaat nog steeds gescheiden door het Smeriggat. Het is mogelijk dat de veranderingen in vooral de vloedkom van Zoutkamperlaag na afsluiting van de Lauwerszee de cyclus hebben vertraagd of dat er hier gewoon geen cyclische ontwikkeling aanwezig is.

Voor afsluiting van de Lauwerzee waren de geul Zoutkamperlaag en het achterliggende bekken eigenlijk vrijwel stabiel (Figuur 2.3). De Zoutkamperlaag strekt zich in noordelijke richting de buitendelta op en voedt het plaatoppervlak van de gronden van het Plaatgat. Periodiek leidt dit tot de vorming, migratie en aanlanding van banken op de kust van Schiermonnikoog. Na de afsluiting zien we dat de lengte van Zoutkamperlaag afneemt en zich meer naar het westen gaat uitstrekken (Figuur 2.3 en 2.4). Een direct gevolg hiervan is dat de verhouding tussen getij- en golf-gedreven transporten op het front van de buitendelta wordt verstoord. Door de afname van de zeewaarts gerichte getij-gedreven transporten overheerst nu de landwaarts gerichte component door de golven. Het sediment aan de buitenkant van de buitendelta wordt hierdoor landwaarts herverdeelt en een grote, haakvormige, bank wordt gevormd (Figuur 2.3, 1971-1981). Een soortgelijke vorming van hoge, smalle banken ten gevolge van plotselinge veranderingen in forcering is ook waargenomen na afsluiting van de Grevelingen en het Haringvliet. Het haakvormige bankencomplex blijft lange tijd aanwezig (Figuur 2.4, 1989 - 1994), maar uiteindelijk land de bank aan op Schiermonnikoog en word dan snel opgenomen in het kuststelsel (1997-2005). Na 2005 is de bank vrijwel niet meer terug te zien in de bodemkaarten.

Op de buitendelta hebben zich in de tussentijd grote veranderingen voorgedaan. Zoutkamperlaag is in de keel van het zeegat eigenlijk steeds verder gedraaid en heeft hier een noord-noordoostelijke oriëntatie. In 1989 nog een dominante geul Zoutkamperlaag met een westelijke uitstroom op de buitendelta, maar nu is deze westelijke uitstroom eigenlijk verdwenen. Zoutkamperlaag heeft nu een noordoostelijke uitstroom over een ondiepe buitendelta. Aan de westzijde hiervan ontwikkelen zich kleine geul-plaatsystemen in de vorm van ebschaar en -schild systemen. De vorming van deze kleine systemen heeft veel overeenkomsten met de ontwikkelingen op de buitendelta van Ameland. Deze systemen zijn variabel en er kunnen zich meerdere kleine systemen vormen die zeewaarts langs de geul verplaatsen. In 2000 is er nog 1 systeem aanwezig. In 2002 zien we 2 systemen, die zich noordoostwaarts verplaatsen. In 2005 is het meest zuidelijke systeem duidelijk dominant, maar in 2012 wordt ook dit weggedrukt en ligt nu bijna in het verlengde van Zoutkamperlaag. Als gevolg hiervan ontstaat er weer een duidelijke doorgaande hoofdgeul op de buitendelta. Dit soort kleinschalige dynamiek was misschien ook wel voor afsluiting van de Lauwerzee aanwezig, maar de resolutie van de bodemdata, zowel in tijd als ruimte, ontbreekt om dit goed weer te geven.



**Figuur 3.3** Een overzicht van verschillende perioden van sedimentatie en erosie: 1926-1967 (voor afsluiting van de Lauwerszee), 1967-1981 (aanpassing aan afsluiting), 1981-2012 (nieuwe "evenwicht") en de totale periode 1926-2012. Blauwe kleuren = erosie, Geel/rode kleuren = sedimentatie.





## 4 Een schatting van de sedimentbalans

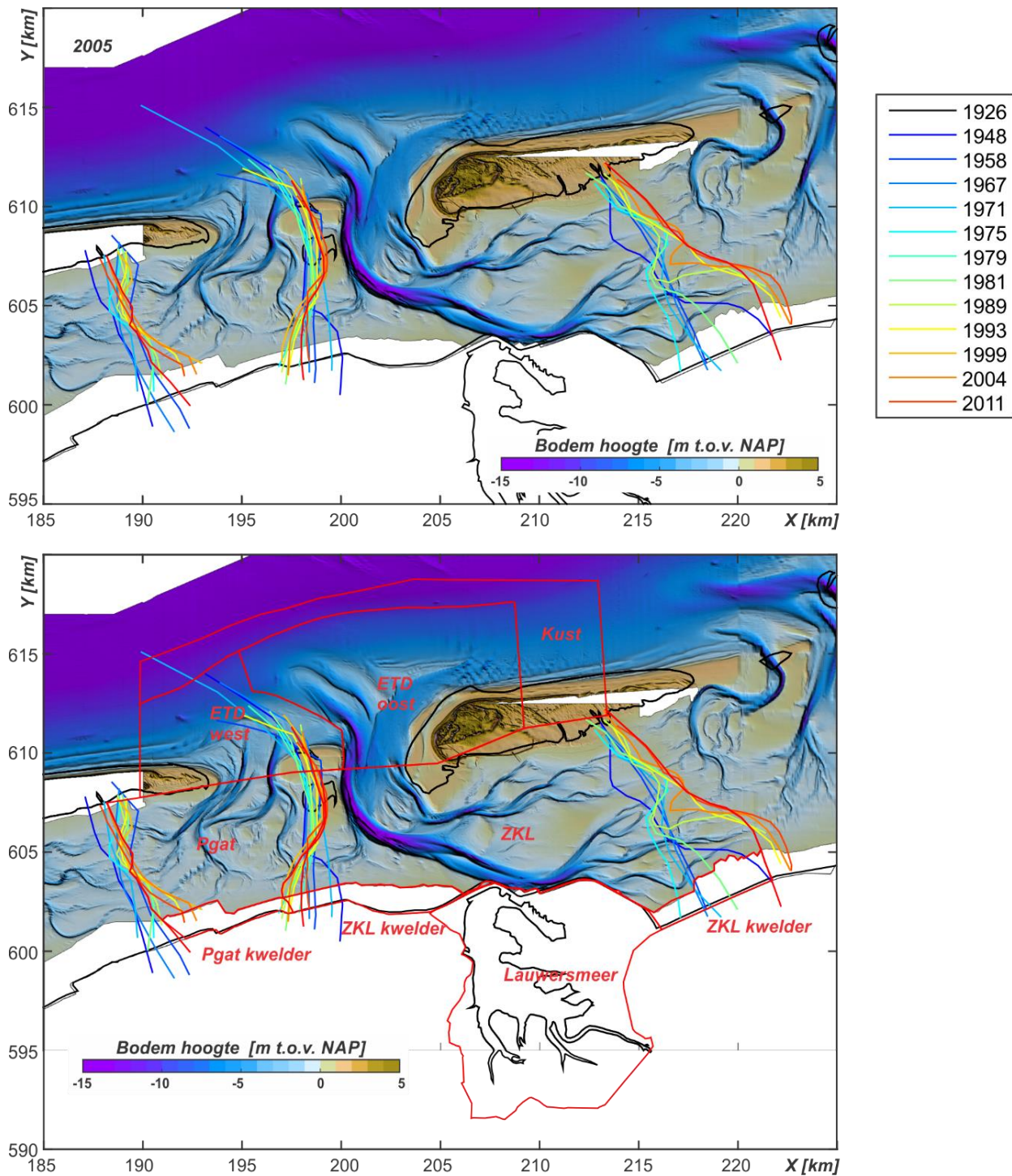
### 4.1 Methode

Als eerste stap in het begrijpen van de sedimentbalans gebruiken we in deze rapportage nog een “klassieke” methode. Deze bekkens worden ruwweg ingedeeld op basis van de wantijen (Figuur 4.1, boven). Deze wantijen zijn, ieder beschikbaar jaar, bepaald op basis van de minimale diepte en de oriëntatie, vorm van de geulen. De rode lijnen geven de gekozen afbakening voor de sedimentbalansstudie. Wat opvalt in de wantijligging is de grote verplaatsing van het Hornhuizer Wad sinds afsluiting van de Lauwerzee. Deze oostwaarts verplaatsing is wel bekend en ook verwacht. Door de afsluitdijk ter plaatse van de Lauwerszee wordt de getijstrooming naar het oosten geduwd. Het is dan ook te verwachten dat de geulen in die richting ontwikkelen en het wantij verdringen.

De ligging van het wantij op het Pinke Wad vertoont vooral een fluctuerend gedrag. Het wantij lijkt tot 1993-1999 vrij consistent oostwaarts te verplaatsen. Sindsdien blijft de ligging stabiel (1999-2004) of lijkt zelfs terug westwaarts te verplaatsen (2011). De 2011 positie is vrijwel identiek aan de 1993 ligging. De scheiding tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag is geschat door vanuit het centrum van de Engelsmansplaat de ondieptes richting de kust te volgen. Hier zien we een vrij continue trend van vervorming van het wantij. Nabij Engelsmansplaat beweegt het wantij iets oostwaarts, nabij de Friesche kust zien we een sterkere westelijke verplaatsing.

Als afbakening van onze sedimentbalans gebieden zijn lijnen (de rode lijnen in de figuur) getrokken die ongeveer in het midden van de wantijen liggen (zie Figuur 4.1, onder). Een uitzondering hierop is de ligging van het Hornhuizer Wad. Hier is de 2011 ligging gevolgd. Nabij de kust van Friesland ligt de lijn wel iets westwaarts, dit is om een goede dekking van de meetdata te waarborgen.

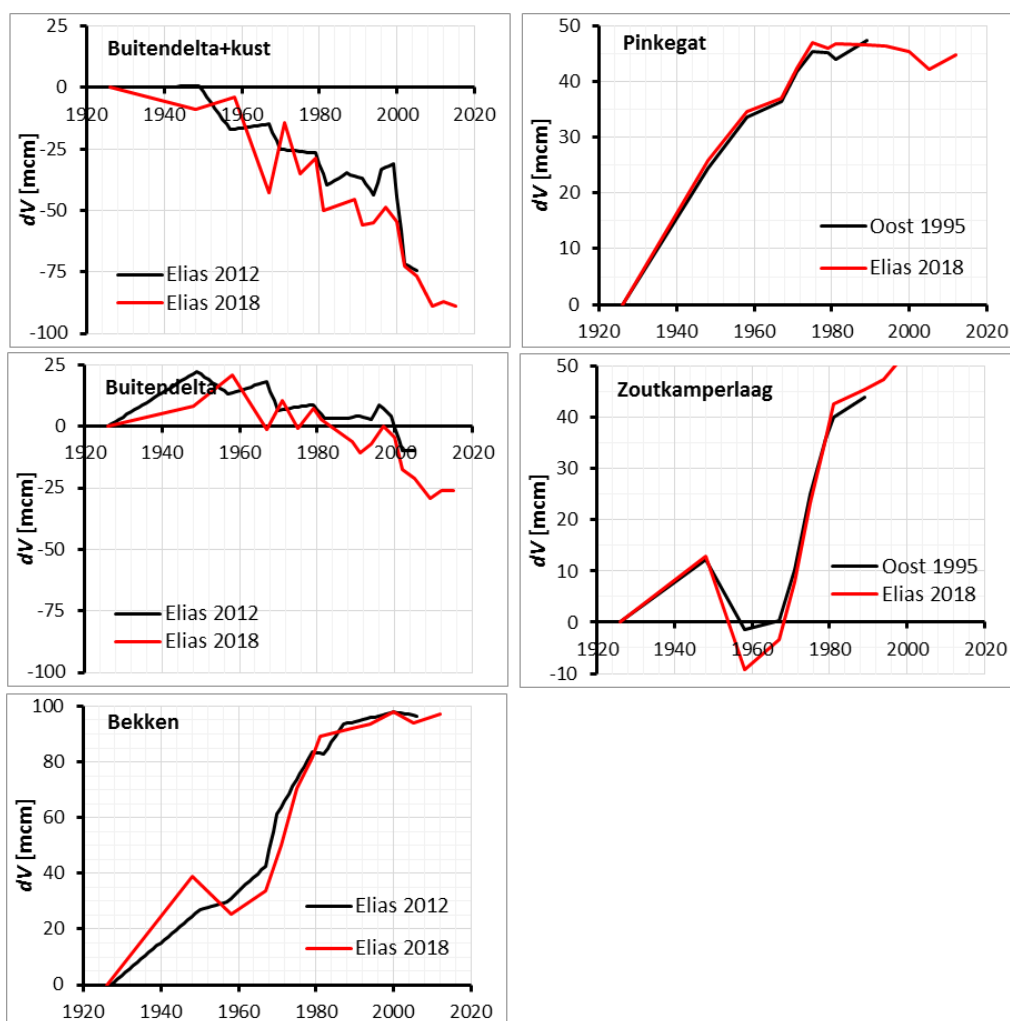
De kustzone is onderverdeeld in 3 gebieden: het westelijke deel van de buitendelta dat vooral geassocieerd is met het Pinkegat (ETD west), het oostelijke deel van de buitendelta dat vooral uitwisselt met de Zoutkamperlaag, en een Kust polygoon die de omliggende kust ontsluit. De meetdata in het diepere deel van de kust is slechts beperkt aanwezig. De kustpolygoon lag initieel op de -20m contour maar is landwaarts verplaatst naar ongeveer de -15m contour om beter aan te sluiten op de beschikbare meetdata. Eenzelfde opmerking moet gemaakt worden voor het landwaartse deel van het bekken. Metingen van de kweldergebieden is slechts beperkt aanwezig in de datasets. De landwaartse begrenzing van de Pgat (Pinke gat) en ZKL (ZoutKamperLaag) polygoon is gekozen op basis van de optimale dekking van de meetdata. In de volumebalans zal dan een schatting van kweldersedimentatie moeten worden toegevoegd om een bekken dekkend volume te verkrijgen. Het Lauwersmeer is wel toegevoegd als polygoon maar de data beschikbaarheid (en nauwkeurigheid) is hier waarschijnlijk ontoereikend om gefundeerde uitspraken te doen.



**Figuur 4.1 (boven):** Een schatting van de ligging van het wantij voor de verschillende bodems. Let op rode lijn geeft hier de gekozen wantij ligging aan zoals gebruikt in de sedimentbalans berekening. (Onder) Polygoon indeling en naamgeving zoals gebruikt in de grootschalige sedimentbalans.

## 4.2 Kwaliteitsborging, een toets van de berekende getallen

Een toets van de berekende getallen is uitgevoerd door de resultaten van de volumeberekening te vergelijken met de studies van Elias et al. (2012) en Oost (1995). De berekende volumes voor de bekkens komen over het algemeen goed overeen tussen de verschillende studies (Figuur 4.2). De buitendelta en kustzone vertonen hier relatief grotere verschillen dan het bekken. Deze verschillen zijn te verklaren. In het bekken ligt de begrenzing vrijwel vast. De ligging van de wantijen is voor alle studies wel ongeveer gelijk. In de kustzone is de afbakening veel minder duidelijk en zijn de volumeveranderingen groot. Kleine verschillen zorgen hier al gauw voor een zichtbaar verschil in volumes. Vergelijken we de resultaten van deze studie met die van Oost (1995), dan zien we dat gerapporteerde oppervlakten van de balansgebieden voor Pinkegat (56 km<sup>2</sup>) en Zoutkamerplaag (122 km<sup>2</sup>) goed overeen komen met de balansgebieden zoals bepaald in deze studie van respectievelijk 57 km<sup>2</sup> en 130 km<sup>2</sup>. Figuur 4.2 laat zien dat de berekende volumes tussen deze 2 studies dan ook vrijwel overeenkomen. Verschillen in de Zoutkamperlaag kunnen wellicht verklaard worden door de wat grotere afwijking in oppervlakte en het niet meenemen van bagger- en stortvolumes.



**Figuur 4.2 :** Een vergelijking tussen de deze studie en de volumes berekend door Eliast et al. (2012) -links- en de volumes van het bekken berekend door Oost (1995).

### 4.3 Sedimentbalans van het Friesche Zeegat

De resultaten van de volumeberekeningen worden getoond in Figuren 4.3 tot 4.5 en samengevat in Tabel 4.2. Kijken we naar het grootschalige beeld (Figuur 4.3 en Tabel 4.2), dan kunnen we concluderen dat er over de gehele periode (1926-2012) zandverlies optreedt aan de buitenkant van het zeegat (-88.7 miljoen m<sup>3</sup>-mcm-) Het merendeel van dit verlies is afkomstig uit de kustzone (-62.9 mcm). Met name het diepe deel langs de rand van de buitendelta verliest sediment. De verliezen van de buitendelta zelf zijn beperkt tot -26.1 mcm. Een groot deel van dit verlies treedt op door terugtrekking van de zeewaartse rand van de buitendelta. Deze terugtrekking treedt vooral na 1971 op. In de periode 1926-1971 lijkt de buitendelta zelf nog zeewaarts uit te breiden. In de voorliggende kuststrook is wel een verdieping te zien, maar dit zou ook met de meetnauwkeurigheid samen kunnen hangen. Het centrale gedeelte van de buitendelta lijkt flink te verdiepen doordat de Zoutkamperlaag aan de westzijde aanzandt, net buiten het balansgebied, en aan de oostzijde verdiept. De grote volumeaanwas aan de westzijde van de Zoutkamperlaag compenseert voor de verliezen in het westelijke deel van de buitendelta. Dit deel neemt over de gehele periode juist in volume toe (+16.9 mcm). Het grootschalige patroon van sedimentatie en erosie lijkt ook voor de meer recente periode, na afsluiting van de Lauwerzee, niet heel anders. Wel zijn de verliezen van het oostelijk deel van de buitendelta, met een gemiddelde van -1.1 mcm/jaar, veel hoger.

In het bekken zien we duidelijk verschil in het gedrag van het Pinkegat voor en na 1971. Over de gehele periode treedt er een significante aanzanding op in het Pinkegat van +45 mcm. Deze aanzanding wordt echter vrijwel geheel (+43 mcm) veroorzaakt door de volumetoename in de periode 1926-1971. Sinds 1971 lijken de volumes stabiel. De Zoutkamperlaag vertoont echter een omgekeerde trend. De volumeverandering tussen 1926-1971 was eerder beperkt met +8 mcm aanzanding. In de periode 1971-2012 treedt er vervolgens wel een significante aanzanding op van +44 mcm. Deze aanzanding concentreert zich vooral langs de Zoutkamperlaag en met name langs het zuidwestelijke deel van de geul. In totaal is het bekken van de Zoutkamperlaag met +52 mcm in volume toegenomen sinds 1926.

**Tabel 4.1** Een overzicht van berekende verliezen en trends voor het Friesche Zeegat. Onderverdeeld in de deelgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag

Beschrijving	Volumeverlies trend [mcm/jaar]		Volumeverlies 1926-2012 [mcm]		
	1926-2012	1971-2012	Erosie	Sedimentatie	Total
<b>Buitendelta</b>					
ETD west	+0.33	+0.29	-22.0	38.9	16.9
ETD oost	-0.44	-1.13	-68.1	25.1	-43.0
<b>Totaal ETD</b>	<b>-0.44</b>	<b>-0.84</b>	<b>-90.1</b>	<b>64.0</b>	<b>-26.1</b>
<b>Bekken</b>					
Pinkegat	+0.45	-0.02	-17.1	62.0	44.9
Zoutkamperlaag	+0.82	+0.92	-78.8	131.1	52.3
<b>Totaal Bekken</b>	<b>+1.28</b>	<b>+0.89*</b>	<b>-96.0</b>	<b>193.1</b>	<b>97.1</b>
<b>Totaal Bekken + ETD</b>	<b>0.25</b>	<b>-0.84</b>	<b>186.1</b>	<b>257.1</b>	<b>-71.0</b>
<b>Kust</b>	<b>-0.78</b>	<b>-0.84</b>	<b>-67.3</b>	<b>4.5</b>	<b>-62.9</b>
<b>Kust +ETD</b>	<b>-1.12</b>	<b>-1.56</b>	<b>-157.2</b>	<b>68.5</b>	<b>-88.7</b>

\* de trendlijn vanaf 1981 = +0.24 mcm/jaar

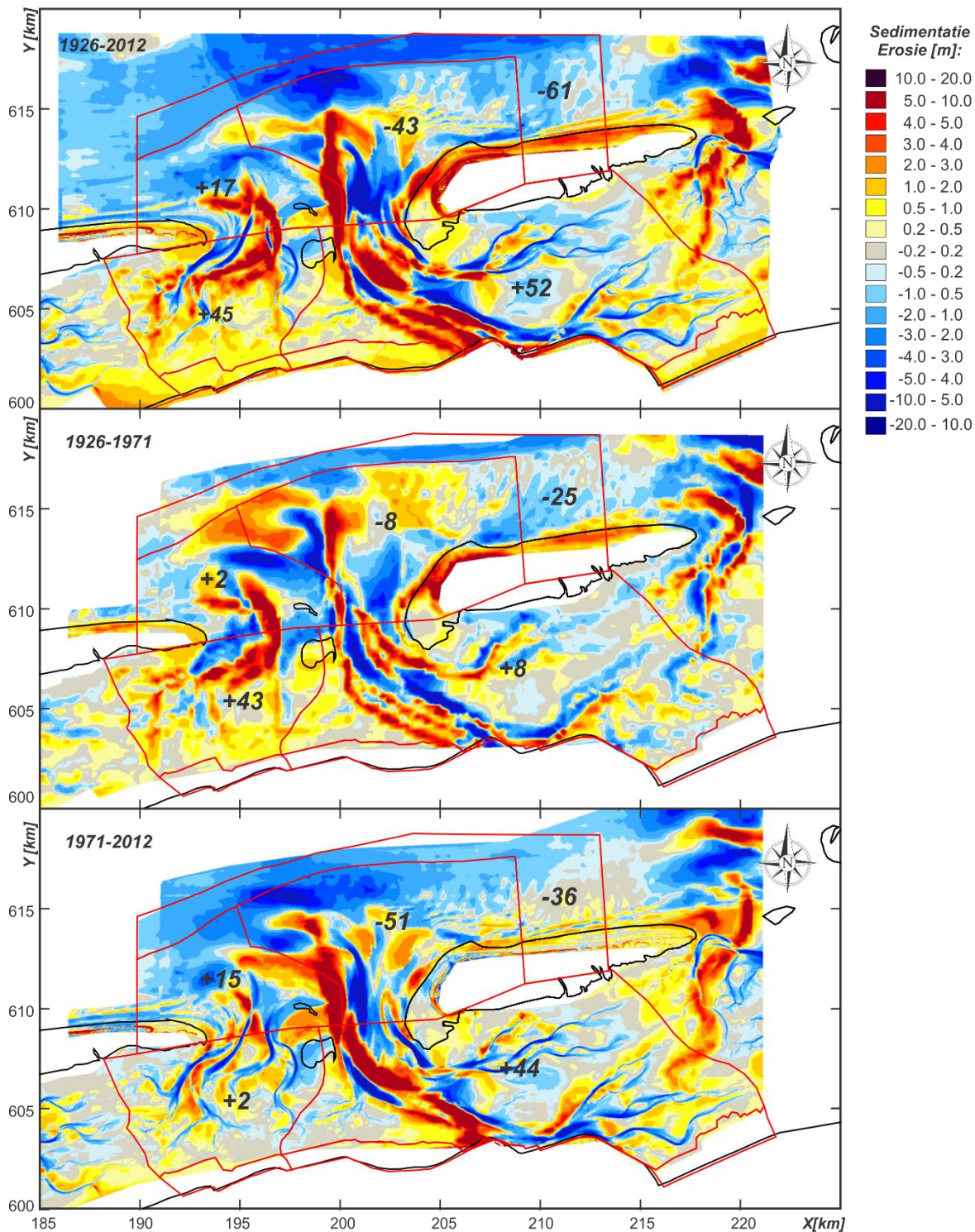
De tijdseries van volumeontwikkeling geven meer inzicht in de opgetreden veranderingen en trends (Figuur 4.4 en 4.5). Kijken we naar de totale volumeveranderingen van buitendelta en bekken (Figuur 4.4), dan zien we dat de erosie van de buitendelta (-1.1 mcm/jaar) en aanzanding in het bekken (+1.3 mcm/jaar) over de gehele periode vrijwel in evenwicht zijn. Kijken we alleen naar de periode sinds afsluiting, dan is er wel een groot verschil te zien. In het bekken stabiliseren de netto veranderingen; over de periode 1981-2012 is deze nihil. De erosie van de buitendelta lijkt in deze periode juist sterker door te zetten met een toename van de trend tot -1.6 mcm/jaar. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de laatste bodems (2009-2015) ook aan de buitenkant vrijwel geen erosie meer laten zien.

Als we in meer detail naar de volumeontwikkeling van het bekken kijken (Figuur 4.5, onder) dan zien we vooral bij het Pinkegat een vloeiend volumeverloop. De tijdserie geeft goed weer dat het Pinkegat tot 1971 een vrijwel lineair aanzandende trend had. Sindsdien zijn de volumeveranderingen zeer beperkt. De volumeverandering van de Zoutkamperlaag vertoont een grillig verloop. Met name in de periode 1926-1967 is hier een grote slingering te zien. Het is nog wel de vraag of dit daadwerkelijk is opgetreden of dat dit een meeton nauwkeurigheid betreft van de 1948 bodem. Ook in de eerdere studies van Oost (1995) was dit volumeverloop zichtbaar. Duidelijk zichtbaar in de tijdserie is de respons van het bekken op de afsluiting van de Lauwerszee met een maximale sedimentatie in de periode 1967-1980. De volumes namen hier met +35 mcm toe. Sinds 1980 is de volumetoename zeer beperkt (+10 mcm).

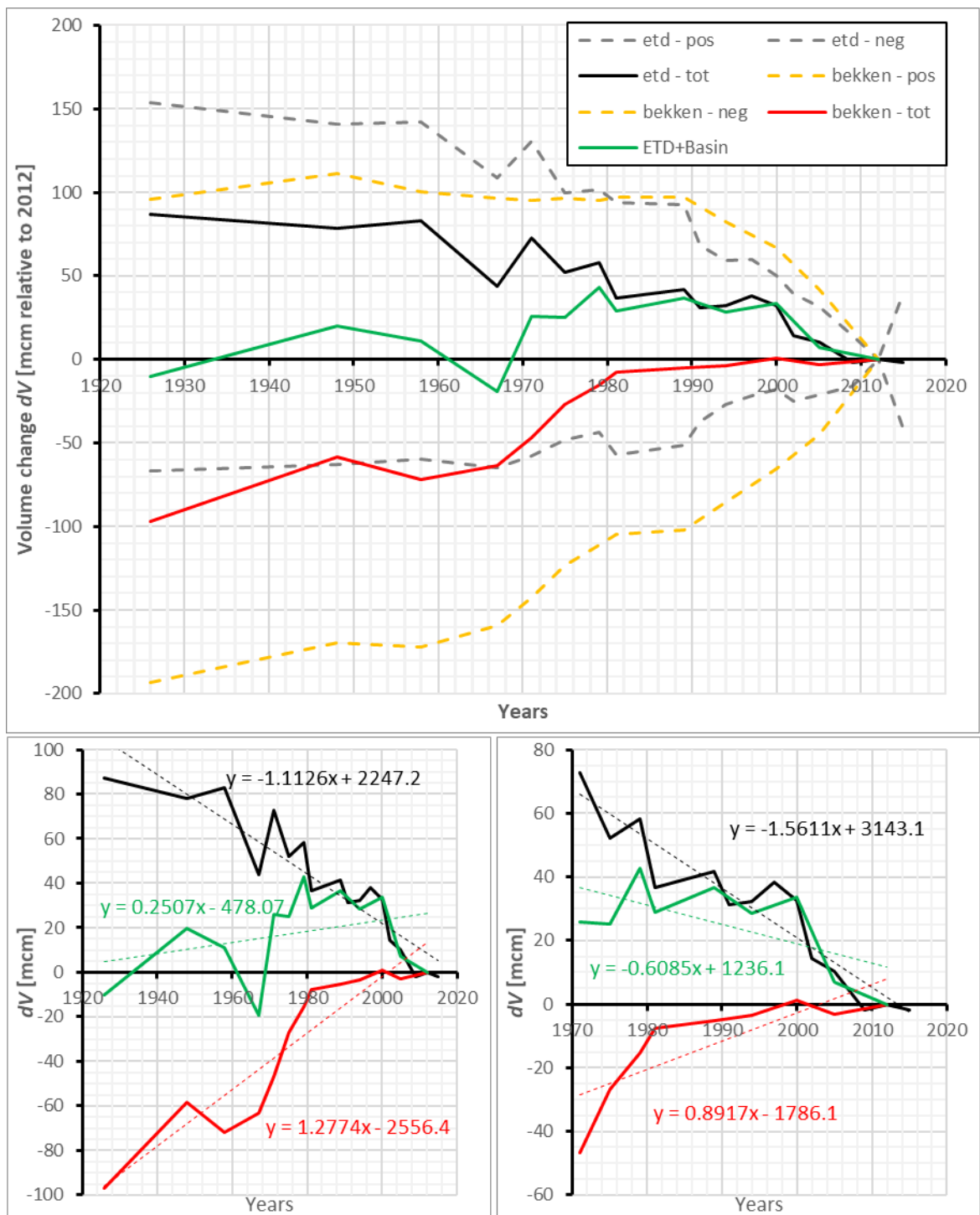
Ook het westelijke deel van de buitendelta vertoont een slingering in volumes in de periode 1926-1967. De totale verandering is echter beperkt. Ook hier zien we een maximale verandering, sedimentatie van de buitendelta met 38 mcm, tussen 1967 en 1997. Deze toename hangt vooral samen met de verzanding van het westelijke deel van de Zoutkamperlaag die in de Pinkegat polygoon optreden. Sinds 1997 nemen de volumes af. Het oostelijke deel van de buitendelta vertoont een vrijwel continue trend van erosie sinds 1958. De volumes nemen over de periode 1958-2012 met 69 mcm af. De erosietrend lijkt vanaf 1989 wel iets af te zwakken. De volumes in de periode 1926-1958 zijn wel iets toegenomen (+26 mcm), maar nadere analyse moet uitwijzen of dit toe te wijzen valt aan de meet(on)nauwkeurigheid.

De omliggende kustpolygoon vertoont over de gehele periode een vrijwel continue trend van erosie (-0.8 mcm/jaar).

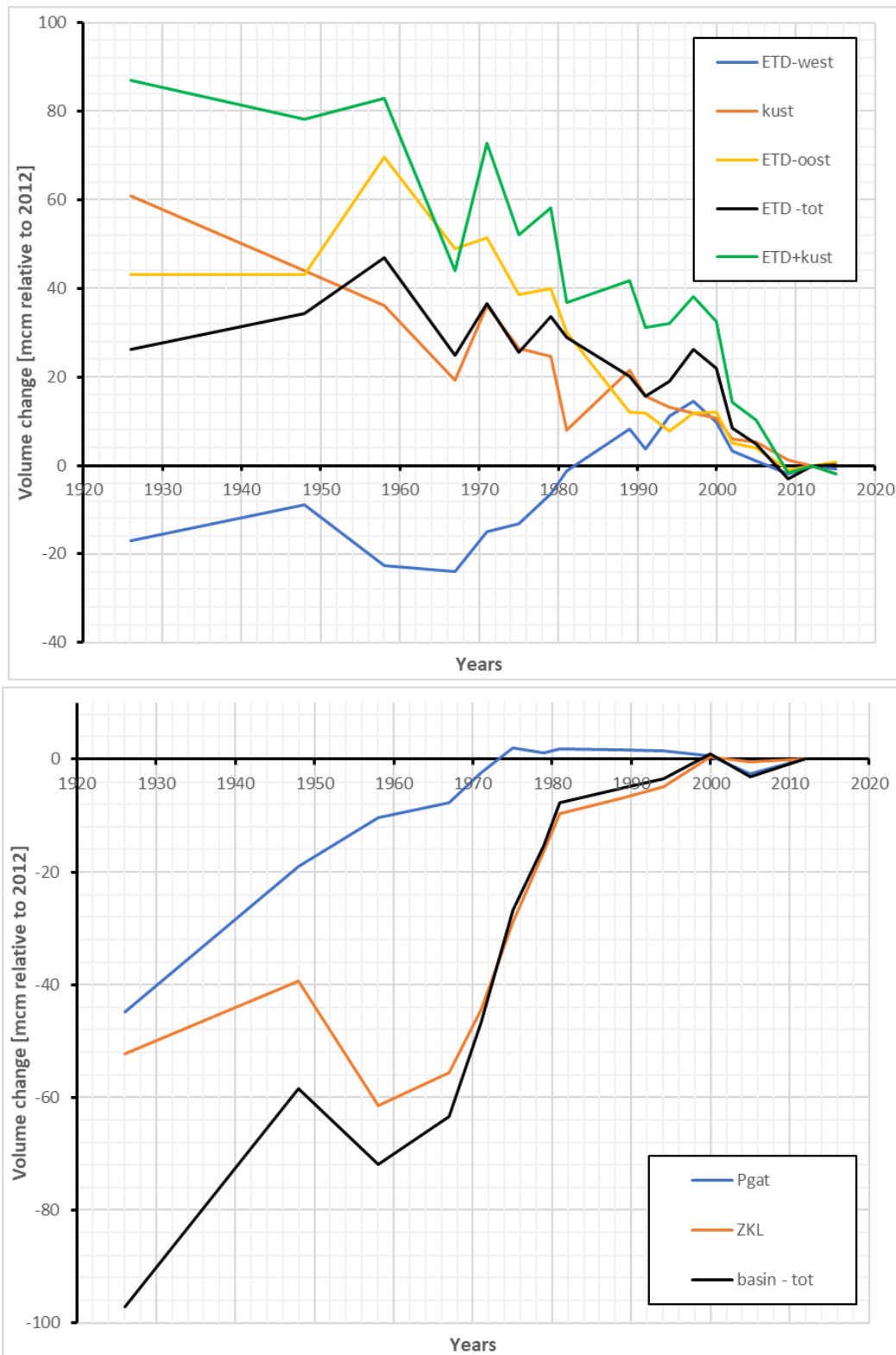
Het is voor Ameland wel bekend dat er sinds 1986 (extra) bodemdaling optreedt door de gaswinning (Ketelaar et al., 2011). Correcties voor deze bodemdaling zijn in deze studie niet uitgevoerd. Vermaas en Marges (2015) geven als schatting 12 – 14 mcm over de periode 1986-2009. In deze studie hebben we het kwelder gebied niet meegenomen in de berekeningen. Hier was de data beschikbaarheid niet voldoende om gefundeerde uitspraken te doen. In de studie van Vermaas en Marges is op basis van de verandering tussen 2005 en 2012 geconcludeerd dat er 5.7 mcm (0.82 mcm/jaar) aan kwelder sedimentatie optreedt.



**Figuur 4.3** : Een samenvatting van de geobserveerde trends over de totale periode 1926-2012 (boven). Voor de perioden 1926-1971 (midden) en voor de periode 1971-2012 (onder). Achtergrond geeft het sedimentatie-erosiepatroon over de getoonde periode weer.



**Figuur 4.4** (boven): Een overzicht van de tijdseries van waargenomen volumeveranderingen onderverdeeld in buitendelta (ETD incl. kust) en bekken. Onder: trendlijnen bepaald over de periode 1926-2012 (links) en 1971-2012 (rechts)



**Figuur 4.5** : Een overzicht van de tijdseries van waargenomen volumeveranderingen onderverdeeld in buitendelta (boven) met de deelgebieden ETD-west, ETD-oost en Kust, en bekken (onder) met de deelgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag



## 5 Conclusies en Aanbevelingen

- In totaal kunnen 18 bodems kunnen op basis van de Vaklodingen bestanden worden geconstrueerd van het Friesche Zeegat. Hiervan zijn 13 bodems vrijwel dekkend voor bekken en buitendelta. 5 bodems bevatten alleen de buitendelta.
- De meest recente complete bodem bevat de 2012 data. Voor 2015 is op dit moment alleen de buitendelta beschikbaar.
- De geconstrueerde sedimentbalans vertoont goede overeenkomsten met de reeds bestaande studies van Oost (1995) en Elias et al. (2012).
- Er is slechts een beperkte dekking van de kweldergebieden langs de kust van Friesland.
- In totaal vindt er over de periode 1926-2012 een volumeverlies van -26 mcm plaats van de buitendelta en -63 mcm van de aanliggende kust. In het bekken treedt een netto aanzanding op van 97 mcm. In totaal is het systeem vrijwel in balans.
- Het bekken Pinkegat vertoont aanzanding tot 1980 maar blijft sindsdien vrijwel stabiel in volume. Het bekken van de Zoutkamperlaag vertoont juist een versnelde aanzanding in de periode 1967-1980. Tussen 1980 en 2012 zijn de volumeveranderingen beperkt.

Deze studie geeft slechts een eerste aanzet in het begrijpen van de volumeveranderingen van het Friesche Zeegat. Een gedetailleerde analyse van de sedimentatie-erosie patronen kan ons een betere onderbouwing van de trends geven en tevens kunnen zo veel beter de meetonnauwkeurigheden worden bepaald. Voor het opstellen van de volledige volumebalans is het essentieel ook de sedimentatie van de kweldergebieden, de effecten van bodemdaling en de bagger- en stort volumes (inclusief zandwinning) in de berekening mee te nemen.



## 6 Referenties

Biegel, E. J., 1993, Morphological changes due to sea-level rise in tidal basins in the Dutch Wadden Sea versus morphological response model MORRES. Rapport IMAU-93.14. Institute for Marine and Atmospheric research Utrecht. Faculty of Geographical Sciences (Utrecht): 124 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 et al (2012)

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., (2018). Een actuele sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee (1933-2015). Rapport 11202190-000, Deltares, Delft.

Ketelaar, G. W. van der Veen, D. Doornhof, (2011). Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost 2005-2010 – Hoofdstuk 1-Bodemdaling. Rapportage Begeleidingscommissie bodemdaling (bron: [http://www.waddenzee.nl/Rapportage\\_2011.2785.0.html](http://www.waddenzee.nl/Rapportage_2011.2785.0.html))

Oost, A.p., de Haas, H., (1992). Het Friesche Zeegat. Morfologisch-Sedimentologische veranderingen in de periode 1927-1970. Cyclische veranderingen in een tidal-inlet systeem Deel 1 Tekst. Rapport in het kader van Kustgenese Werkgroep 1, Faculteit Aardwetenschappen, Universiteit Utrecht.

Oost, A.P., (1995). Dynamics and Sedimentary Development of the Dutch Wadden Sea with Emphasis on the Frisian Inlet. A Study of Barrier Islands, Ebb-Tidal Deltas, Inlets and Drainage Basins. Geologica Ultraiectina, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen, Utrecht University (Utrecht): 454 pp.

Vermaas, T., Marges, V., (2015). Detailanalyse volumeveranderingen rondom Ameland. Rapport 1220040-006, Deltares, Delft.

Wang, Z.B., 2007, Morfologische ontwikkeling van het Rif en de Engelsmanplaat. Analyse naar mogelijke invloed van de bodemdaling. Rapport Z3973 WL Delft Hydraulics, Delft.