

**Uitwerking sedimentbudget
van de
Westerscheldemonding**



Uitwerking sedimentbudget van de Westerscheldemonding

Edwin Elias
Ad van der Spek

1210301-012

Titel

Uitwerking sedimentbudget van de Westerscheldemonding

Opdrachtgever

Departement Openbare
Werken, Afdeling Maritieme
Toegang, Vlaamse Overheid

Project

1210301-012

Kenmerk

1210301-012-ZKS-0008

Pagina's

31

Trefwoorden

Sedimentbalans, Westerschelde, morfologie

Samenvatting

In het verleden zijn er meerdere sedimentbalansen van de Westerscheldemonding opgesteld. Toch blijven nog vele vragen onbeantwoord. Eén van de belangrijkste nog openstaande vragen is: verliest de Westerscheldemonding sediment? En zo ja, hoeveel? In deze rapportage geven we schattingen voor de volumeveranderingen van de Westerscheldemonding over de periode 1964-2011. Deze zijn gebaseerd op verschillende manieren van analyse (en correctie) van de meetdata. Daarnaast geven we een analyse van de opgetreden morfologische veranderingen.

Op basis van deze studie kan worden geconcludeerd dat de volumeverandering van het Nederlandse deel van het mondingsgebied wordt gekenmerkt door een kleine toename van de sedimentvolumes tot 1980, gevolgd door een vrijwel constante trend van afname tot 2008. Over de totale periode (1965-2011) is de trend een afname van -0.9 miljoen m³/jaar. Over de laatste 10 jaar zijn de erosietrends significant lager -0.3 miljoen m³/jaar. Dit komt mede door de uitgevoerde zandsuppleties die een groot sedimentvolume aan het systeem toevoegen. De erosie van het mondingsgebied neemt sterk toe als ook het Belgische gedeelte wordt meegenomen (-4.9 miljoen m³/jaar over de periode 1965-2010). Een gedeelte van deze verliezen kan worden verklaard door het baggeren en vervolgens storten van het sediment buiten het balansgebied zoals gebruikt in deze studie.

Referenties

Niet van toepassing

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1 ^{ste}	juli 2015	E. Elias		Mick van der Wegen		Frank Hoozemans	
		Ad van der Spek					
2 ^{de}	sept 2015	Edwin Elias		Mick van der Wegen		Frank Hoozemans	
		Ad van der Spek					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Morfologische Ontwikkelingen	3
2.1 Inleiding: de Voordelta	3
2.2 Grootschalige morfologische veranderingen	5
2.3 Westerscheldemonding	7
2.3.1 Huidige ligging van geulen en platen	7
2.3.2 Morfologische processen en veranderingen	10
3 Sedimentbalans van de Westerscheldemonding	15
3.1 Beschikbare Meetdata	15
3.2 Bestaande inzichten met betrekking tot de sediment balans	16
3.2.1 Walburg (2005) en de analyses van Duin (2005) en Nederbragt (2006)	16
3.2.2 De studie van Cleveringa (2008)	17
3.3 Nieuwe schatting van de sedimentvolume verandering (1964 – 2011)	20
3.3.1 Bodemdata en correcties.	20
4 Discussie en Conclusies	27
5 Literatuur	29
 Bijlage(n)	
A Beschikbare bodemgegevens	A-1
B Correcties per deelpolygoon	B-1

1 Inleiding

In het verleden zijn er meerdere sedimentbalansen van de Westerscheldemonding opgesteld (zie o.a. Haring, 1955; van der Slikke, 1997, Kornman, 2000; Nederbragt en Liek, 2004; Walburg, 2005; Haecon, 2006, Cleveringa, 2008). Toch blijven nog vele vragen onbeantwoord. Eén van de belangrijkste nog openstaande vragen is: verliest de Westerscheldemonding sediment? En zo ja, hoeveel? Walburg (2005), en in de aan deze studie gerelateerde analyse van en Nederbragt (2006), wordt geconcludeerd dat er in de periode 1964-1999 sprake is van een volumeverlies van -3.3 miljoen m³ per jaar. In de studie van Cleveringa (2008) wordt na uitvoerige analyse van de meetdata geconstateerd dat er significante meeton nauwkeurigheden in de data aanwezig zijn. Door correctie van de meetdata neemt de erosie sterk af en wordt deze erosie geschat tussen de 0.2 miljoen m³/jaar en 0.5 miljoen m³/jaar.

Met de doorgaande metingen, maar ook door het opstellen van meerdere sedimentbalansen met verschillende manieren van correctie, kan het inzicht in het gedrag van de Voordelta worden verbeterd en de mogelijke discrepantie tussen de volumeveranderingen zoals gepresenteerd in voorgaande studies worden opgehelderd. In deze rapportage geven we schattingen voor de volumeveranderingen van de Westerscheldemonding over de periode 1964-2011. Deze zijn gebaseerd op verschillende manieren van analyse (en correctie) van de meetdata. Daarnaast geven we een analyse van de opgetreden morfologische veranderingen.

In Hoofdstuk 2 bekijken we de morfologische verandering aan de hand van de sedimentatie-erosie patronen tussen de jaren 1964 en 2011. In Hoofdstuk 3 beschouwen we de sedimentbalans en corrigeren op verschillende manieren voor de geconstateerde onvolkomenheden in de meetdata. Hoofdstuk 4 geeft een samenvatting van de belangrijkste inzichten en conclusies.

2 Morfologische Ontwikkelingen

2.1 Inleiding: de Voordelta

De Westerscheldemonding is onderdeel van de Voordelta. De Voordelta bestaat uit een aaneengesloten ondiepte gevormd door de vier aan elkaar grenzende mondingsgebieden van de Westerschelde, Oosterschelde, Grevelingen en het Haringvliet (Figuur 2.1). Alleen bij de Westerschelde en Oosterschelde is er nog een verbinding van de monding met het achterliggende estuarium door grote getijgeulen. In noordwaartse richting neemt de diepte van de Voordelta af, zijn de geulen kleiner (ondieper) en neemt het ondiepe plaat-areaal toe. De estuaria (Grevelingen en Haringvliet) zijn hier door dammen afgesloten van de voorliggende monding. De monding van het Haringvliet is het meest ondiepe gebied. Aan de noordzijde wordt het Haringvliet begrensd door de eerste en de tweede Maasvlakte. De grote golfbrekers langs de vaargeul naar de haven van Rotterdam vormen een duidelijke scheiding tussen de Voordelta en de Hollandse kust. Aan de zuidzijde kan zo'n duidelijke grens van de Voordelta niet getrokken worden. Hier gaat de buitendelta van de Westerschelde (de Vlake van Raan) over in de Belgische Vlaamse banken. Deze diffuse afbakening van de Westerscheldemonding is één van de redenen waarom er onzekerheid is in de sedimentbalans; het is niet mogelijk een geheel sluitend balansgebied te definiëren. De landwaartse begrenzing in de Westerscheldemonding wordt vaak gekozen langs de denkbeeldige lijn tussen Vlissingen en Breskens.

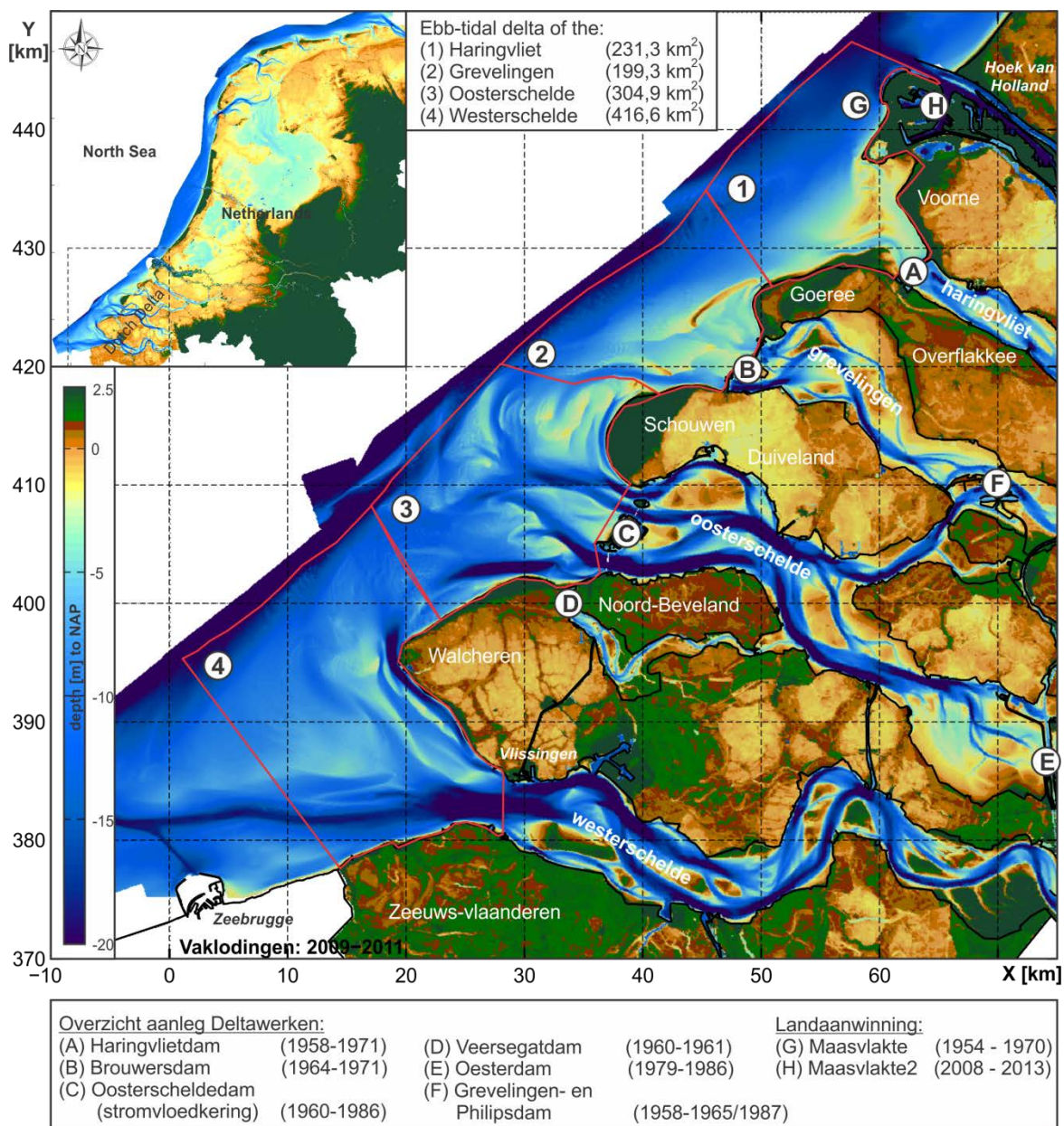
De Voordelta is al sinds de jaren zestig sterk beïnvloed door de Deltawerken. De aanleg van de Haringvlietdam en de Brouwersdam dam sluit deze estuaria, sinds 1971, vrijwel volledig af van de voorliggende buitendelta. In de Haringvliet zijn wel spuisluizen aanwezig met een maximale capaciteit van 25.000 m³/s. De monding van de Oosterschelde en Westerschelde maken nog wel verbinding met het achterliggende estuarium. Toch is de invloed van menselijk ingrijpen in beide estuaria zeer groot. De voltooiing van de Oosterschelde stormvloedkering in 1986 heeft het doorstroomoppervlak ter plaatse significant verkleind en zodanig de hydrodynamica en morfodynamica van de Oosterschelde beïnvloed. In het Westerschelde estuarium zijn geen dammen aangelegd. Toch speelt menselijk ingrijpen hier ook een grote rol. De aanleg van dijken en beschermingswerken heeft de begrenzing van het estuarium vastgelegd. Daarnaast zijn er 3 verdiepingen uitgevoerd (begin jaren '70, eind jaren '90 en 2010-2014) en zijn er doorgaande baggerwerkzaamheden die de hoofdgeul bevaarbaar houden.

In alle zeegaten spelen getij- en golfgedreven transporten een grote rol in de morfologische ontwikkelingen. Toch is er een duidelijk verschil tussen de twee zuidelijke, open, zeegaten en de twee noordelijke, afgesloten, zeegaten. In de Oosterschelde- en Westerscheldemonding bestaat het getij zowel uit een component langs de kust (gedreven door het getij op de Noordzee) en een component dwars op de kust door de in- en uitstroom uit het estuarium. De verhouding tussen deze twee is bepalend voor de morfologische ontwikkeling.

Op de buitendelta's van het Haringvliet en Grevelingen is alleen nog het kustlangse getij aanwezig. Door de gereduceerde (kustdwarse) getij-invloed overheersen op deze buitendelta's de golfgedreven transporten. De invloed van dichtheids-gedreven sediment transporten is op de Voordelta beperkt. Alleen in de monding van het Haringvliet zijn er (periodiek) duidelijke dichtheidsgradiënten in zoutgehalte te onderscheiden. Door de spuisluizen in de Haringvlietdam wordt zoet water vanuit de Nieuwe Waterweg en door het

Haringvliet gespuid. Vooral bij hoge rivierafvoer kan dit tijdelijk (lokaal) een groot dichtheidsverschil veroorzaken.

De bodem van de Voordelta en de Westerscheldemonding bestaat voornamelijk uit zand. Lokaal zijn er wel slibafzettingen aanwezig waar de stroomsnelheden en golven laag zijn. Ook zijn er afwijkende bodemsamenstellingen in de Westerscheldemonding, waar geulen oude geologische formaties aansnijden.



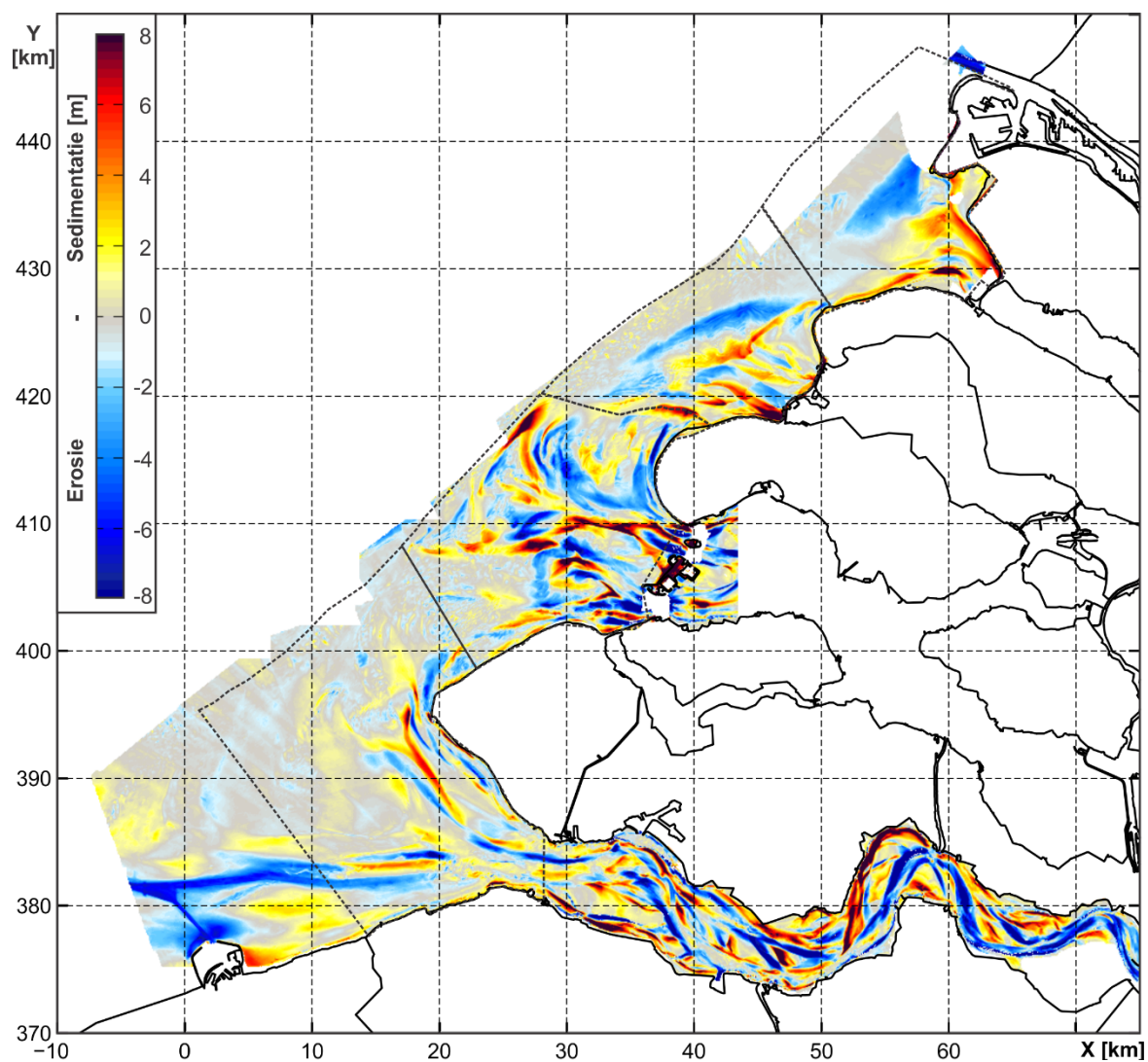
Figuur 2.1 Overzicht van de estuaria en voorliggende buitendelta die samen de Voordelta vormen. De onderliggende bodem is gebaseerd op bodemdata gemeten in de periode 2009-2011. De rode polygonen geven de afbakening weer van de 4 mondingsgebieden gebaseerd op de indeling zoals gebruikt door Rijkswaterstaat (zie Walburg, 2005).

2.2 Grootschalige morfologische veranderingen

Figuur 2.2 geeft een beeld van de grootschalige morfologische ontwikkeling van de Voordelta over de representatieve jaren 1965-2010¹. Gedurende deze periode vinden er grote morfologische veranderingen plaats. Dit komt vooral door de uitvoering van de Deltawerken, waardoor de hydrodynamica en de geassocieerde sedimenttransporten ingrijpend veranderd zijn. De wijzigingen in hydrodynamica resulteren in grootschalige morfologische veranderingen van met name de buitendelta's van de Oosterschelde, Grevelingen en Haringvliet (zie Elias en van der Spek, 2014 en 2015). De buitendelta van de Westerschelde is eigenlijk relatief stabiel. Er is wel een duidelijk verschil in gedrag tussen de buitendelta van de Oosterschelde en de buitendelta's van de Grevelingen en het Haringvliet. In de Oosterscheldemonding zien we een heroriëntatie van de geulen en banken door de veranderde getijstroming na voltooiing van de Oosterscheldekering. Hier domineren afwisselende patronen van sedimentatie en erosie. Zowel bij de Grevelingen en Haringvliet zien we dat de buitendelta in zijn geheel landwaarts verplaatst. Er vindt een grote erosie plaats aan de zeezijde en aangroei landwaarts. De grootste afzettingen vinden plaats in de voormalige geulen die (gedeeltelijk) zijn opgevuld. Deze veranderingen zijn eigenlijk wel te verwachten. Buitendelta's worden gevormd door de balans van zeewaarts transport door de getijstroming en landwaarts transport door golven (Oertel, 1975; Hubbard, 1979; Hayes, 1979). Het is aannemelijk dat voor uitvoering van de Deltawerken er een dynamisch evenwicht aanwezig was. Met het totaal wegvallen van de getijstroming vanuit het Haringvliet en de Grevelingen kunnen de buitendelta's niet op een gelijke positie gehandhaafd worden. De nu overheersende golf-gedreven transporten zorgt ervoor dat het sediment netto landwaarts verplaatst. Uit de buitendelta komt veel sediment vrij dat de geulen langzaam opvult, maar ook afgezet wordt langs de aanliggende kuststroken.

Relatief kleine veranderingen doen zich voor op de Westerscheldemonding. De vlakte van Raan (zie Figuur 2.3 en Figuur 2.4 voor het overzicht van de platen en geulen in de Westerscheldemonding) is eigenlijk gedurende de gehele periode vrij stabiel. In het zuiden is mede door baggeren de geul de Wielingen en de toegang tot de haven van Zeebrugge in diepte toegenomen. Het gebaggerde sediment is op stortlocaties aan de noord- en zuidzijde geplaatst en veroorzaakt hier sedimentatie. In Haecon (2006) wordt concludeert dat het effect van baggeren en storten op de volumebalans van het volledige mondingsgebied verwaarloosbaar zijn (in totaal is 1.1 miljoen m³ gestort over de periode 1972-2004). De afwisselende patronen van sedimentatie en erosie langs de zuidwestkust van Walcheren worden vooral veroorzaakt door plaat-geul migraties. Ook het Westerschelde estuarium vertoont gecompliceerde, afwisselende patronen van sedimentatie en erosie. Ook hier speelt baggeren en storten een rol. Gedurende de periode 1955-2004 is er meer dan 413 miljoen m³ gebaggerd en bijna net zoveel (20 miljoen minder) terug gestort (Haecon, 2006). Daarnaast heeft er 114 miljoen m³ aan zandwinning plaatsgevonden. Hoewel dit grote volumes zijn, moet hierbij wel opgemerkt worden dat volumeveranderingen ten gevolge van natuurlijke processen vele ordes groter zijn.

¹ Grootschalige bodems worden samengesteld uit Vaklodingen opgenomen over meerdere jaren. Het vermelde jaartal geeft hier het representatieve jaar voor de periode van opname.



Figuur 2.2 Overzicht van de bodemverandering tussen de representatieve jaren 1965-2010.

2.3 Westerscheldemonding

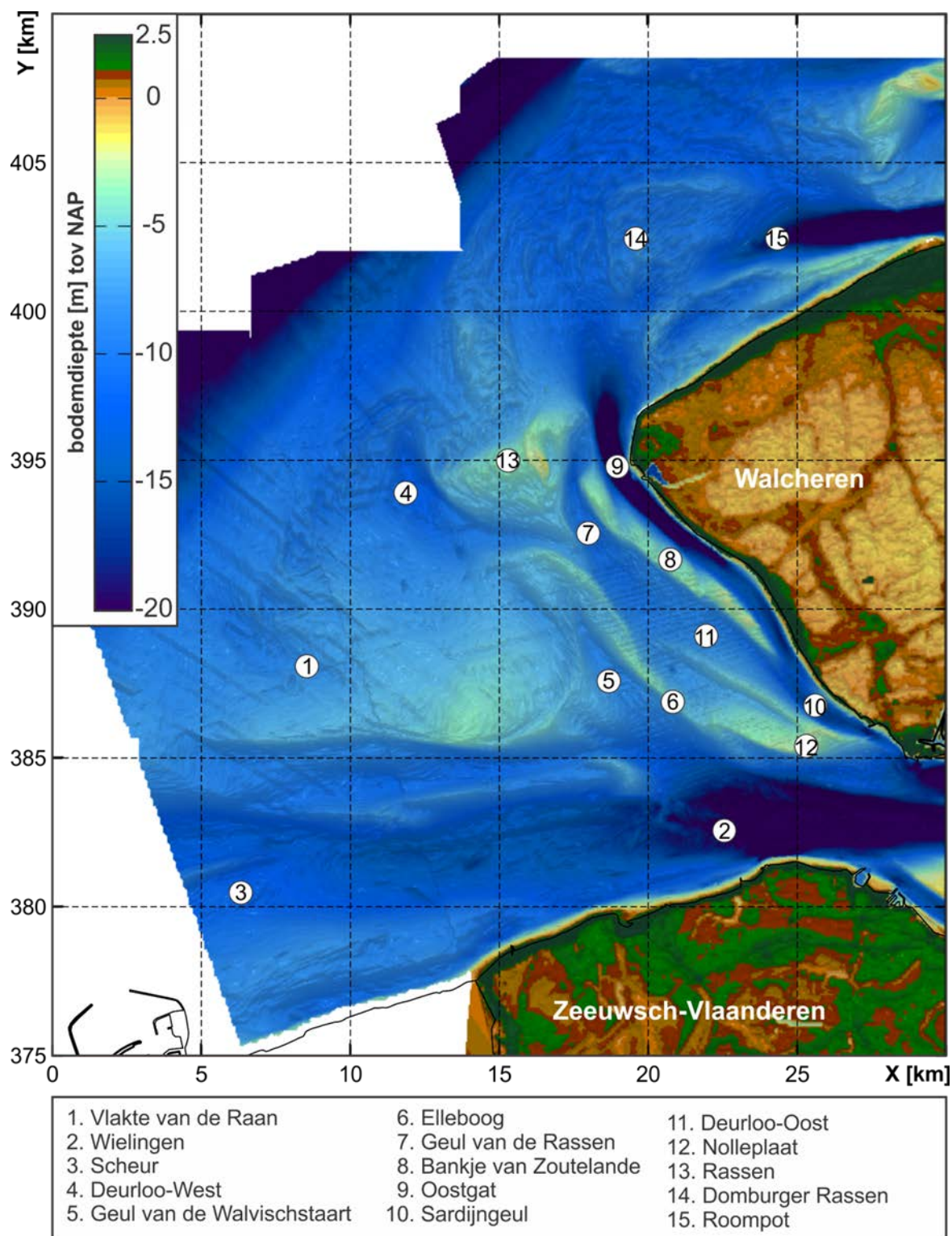
2.3.1 Huidige ligging van geulen en platen

De kop van Walcheren ligt ingeklemd tussen de estuaria van de Oosterschelde en Westerschelde. De grote, voorliggende ondiepte wordt de Vlake van de Raan genoemd en heeft een hoogte tussen de -2 en -10 m² (Figuur 2.3 en Figuur 2.4, [1]). De landwaartse begrenzing van de Westerschelde monding of buitendelta wordt vaak gekozen langs de lijn Vlissingen- Breskens. Ten oosten van deze lijn wordt het morfologische gedrag verstoord door het op diepte houden (en verdiepen) van de geulen in de Westerschelde ten behoeve van de scheepvaart naar de haven van Antwerpen. Een uitgebreide beschouwing van de morfologische veranderingen van de Westerschelde wordt gegeven in Cleveringa (2013) en Taal et al. (2013).

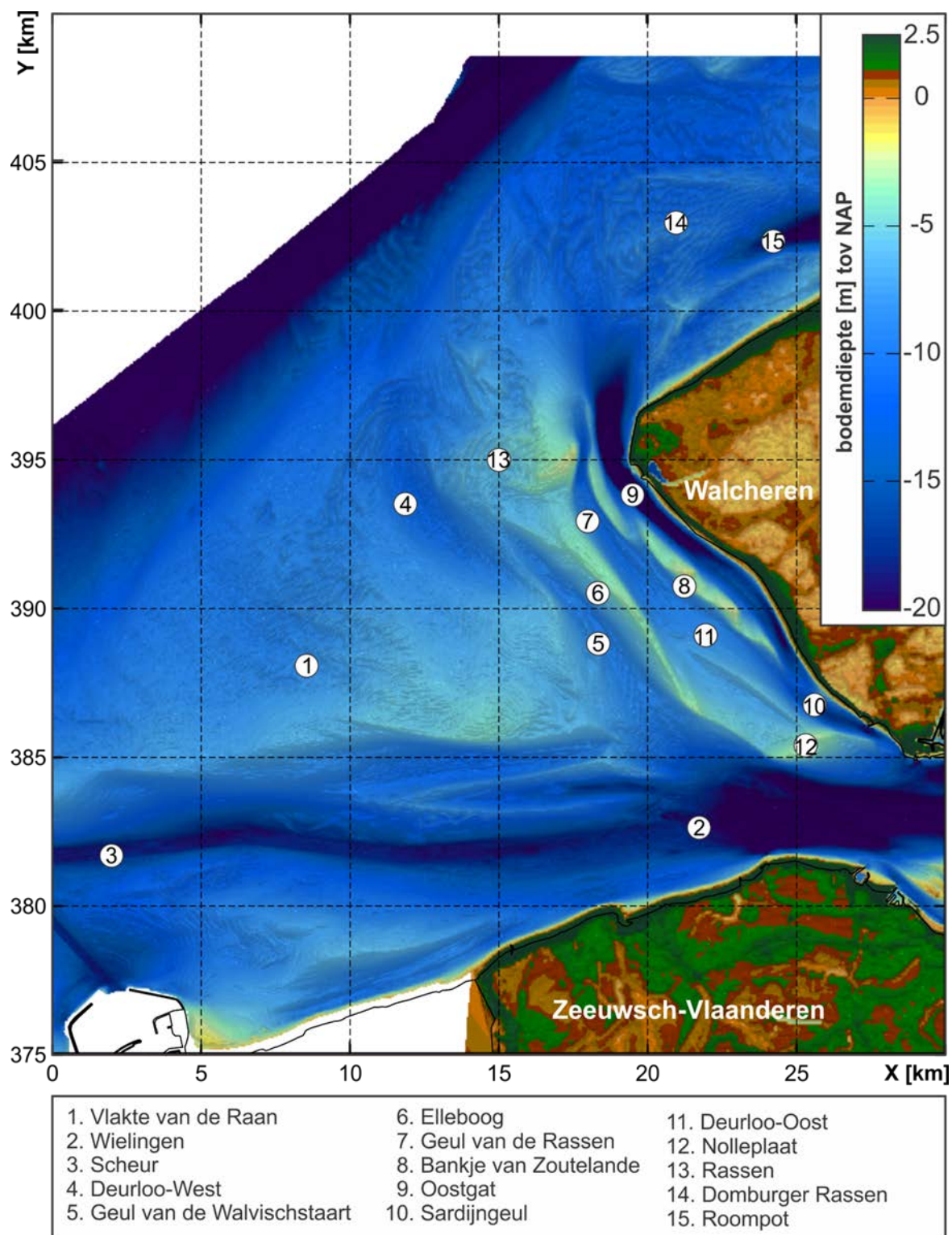
De Vlake van de Raan [1] kan gezien worden als het dominante platengebied behorende bij de buitendelta van het Westerschelde estuarium. Aan de zuidzijde ligt een brede en diepe oost-west lopende geul de Wielingen [2] die overgaat in Scheur [3]. Dit is de belangrijkste toegangsgeul voor de scheepvaart naar de Westerschelde en haven van Antwerpen. Sinds de jaren 60 wordt de Wielingen door baggerwerkzaamheden op een diepte van circa -20 m gehouden. Aan de noordzijde wordt de Vlake van de Raan begrensd door een complex geulen- en platenstelsel. Direct grenzend aan de zuidwestkust van Walcheren vinden we het Oostgat [9] en de Sardijngeul [10]. Het Bankje van Zoutelande scheidt het Oostgat van Deurlo-Oost [11] en Geul van de Rassen [7]. In de recente (2010-2011) bodem ligt een smal en langwerpig platencomplex Elleboog [6]), met een hoogte tussen de -2 en -3 m, die de Rassen [3] en de Nolleplaat [12] verbindt. Deze plaat heeft de geul Deurloo in een oostelijk [11] en westelijk [4] gedeelte verdeeld. Contractie en versnelling van de stroming rond de harde zeewering van Westkapelle heeft het Oostgat hier lokaal sterk verdiept [9] tot een diepte van -35 m. Ten noorden van Westkapelle bevindt zich een ondiepe vlakte: Domburger-rassen [14]. Deze vlakte vormt de natuurlijke scheiding tussen de mondingsgebieden van de Oosterschelde en Westerschelde. De hierop uitstromende geul Roompot [15] is onderdeel van het Oosterschelde estuarium.

Bij de bepaling van de volumeveranderingen is een correctie voor de baggerwerkzaamheden in de Westerscheldemonding (en met name de Wielingen) eigenlijk niet nodig. Vrijwel al het gebaggerde materiaal wordt binnen het balansgebied teruggestort (Haecon, 2006).

² In deze rapportage zijn alle dieptes en hoogtes relatief tot NAP



Figuur 2.3 Overzicht geulen en platen in de Westerscheldemonding. De onderliggende bodem is gebaseerd op de 1964 metingen.



Figuur 2.4 Overzicht geulen en platen in de Westerscheldemonding. De onderliggende bodem is gebaseerd op de 2010-2011 metingen.

2.3.2 Morfologische processen en veranderingen

De morfodynamiek van de geulen en platen in de Westerscheldemonding wordt vooral gedreven door de interactie tussen het kustlangse (noord-zuid) getij in de Noordzee en het kustdwarse (west-oost) getij in het Westerschelde estuarium. In het werk van Bliek et al. (1998) is de waterbeweging uitvoerig in kaart gebracht.

Het getij plant zich als lopende golf vanuit het zuiden in noordelijke richting voort langs de Zeeuwse en Hollandse kust. Bij de Westerscheldemonding splits het getij in twee componenten. De noordelijke component, langs de kust, neemt daarbij in getijamplitude geleidelijk af. De oostwaartse component, het inkomende getij van de Westerschelde, neemt in amplitude toe en stroomt voornamelijk via de Wielingen het estuarium binnen, het getijvolume van het Oostgat is aanzienlijk kleiner.

De stromingen door de zuidelijke hoofdgeul (Scheur – Wielingen) worden voornamelijk opgewekt door waterstandsverschillen, die veroorzaakt worden door faseverschillen tussen het getij op zee (bij Zeebrugge) en het getij in de hals (bij Vlissingen). Dit komt overeen met een beschrijving van het getij in zeegaten door Van Veen (1936), die schematisch is weergegeven in figuur 5.1. Sha en Van den Berg (1993) benadrukken dat voor het getij in de zeegaten in zuidwest Nederland naast het faseverschil ook de noordwaartse afname van getijamplitude van belang is. Dit is met name het geval voor het Oostgat. De stromingen door het Oostgat worden opgewekt door waterstandsverschillen over de geul, die niet alleen door faseverschillen veroorzaakt worden, maar ook door verschil in getijamplitude. De maximale waterstandsverschillen langs de kust van Walcheren treden op rond stroomkentering. De stroom kentert langs de noordelijke oever dan ook eerder dan langs de zuidelijke oever. Als gevolg hiervan zijn de stroomsnelheden door het Oostgat tijdens het begin van eb en vloed het hoogst, terwijl de stroomsnelheden in Scheur/Wielingen tijdens het eind van eb en vloed het hoogst zijn. Bij Westkapelle en Vlissingen speelt de contractie van de stroming een grote rol. De stromingen in het tussenliggende gebied (de huidige Vlake van de Raan) hebben een rondgaand karakter.

Steijn en Van der Spek (2005) geven een uitgebreide analyse van de waterbeweging ter plaatse van Walcheren. De waterbeweging is als volgt samen te vatten: In het noordelijke gedeelte van het Oostgat (bij Westkapelle) domineert de ebstroming, terwijl het zuidelijke gedeelte (nabij Zoutelande) door de vloed gedomineerd wordt. Deze tegenstelling komt door de relatief grote vloeddominante stroming over het Bankje van Zoutelande. De geulen Deurloo en Geul van de Rassen zijn overwegend eb-dominant. Gezien het feit dat de buitendelta van de Westerscheldemonding relatief diep ligt, is onder gemiddelde condities het belang van golven beperkt tot vooral opwoelling. Tijdens stormen kunnen de golven wel breken op de buitendelta. Voor meer details over de waterbeweging wordt verwezen naar Steijn en Van der Spek (2005).

Op dit moment heeft de monding twee dominante hoofdgeulen. Ongeveer een eeuw geleden heeft deze omslag, van een systeem met drie hoofdgeulen naar een systeem met twee hoofdgeulen, plaats gevonden (Van der Slikke, 1997). De huidige ligging van de geulen en platen, met de grootste geul (Wielingen) in het zuiden en een uitgebreid stelsel van geulen en platen langs de kust van Walcheren, bestaat op hoofdlijnen al sinds deze omslag. Ondanks de gedeeltelijke afsluiting van de Oosterschelde (voltooid in 1986) en de veranderingen in het Westerschelde estuarium, zijn de morfologische kenmerken van dit twee hoofdgeulensysteem over de laatste 45 jaar behouden gebleven (zie Figuur 2.3 en Figuur 2.4). Zie Van der Slikke (1997), Van Enckevoort (1996), Cleveringa (2006) en Cleveringa (2008) voor uitgebreide beschrijvingen.

Menselijk ingrijpen heeft wel een grote invloed gehad op de morfologie van de monding. Vooral in de afgelopen eeuw hebben vele ingrepen plaatsgevonden om de scheepvaart naar Zeebrugge en door de Westerschelde naar Antwerpen te bevorderen. Baggeren in de geul en storten op aangewezen stortlocaties beïnvloedt niet alleen lokaal de morfologie. De verdiepte geulen beïnvloeden ook de grootschalige voortplanting van het getij en de door getijasymmetrie bepaalde residuele sedimentimport of –export (Bolle, 2010). In Figuur 2.4 is duidelijk te zien dat de Wielingen sterk verdiept is door dit baggeren. Aan weerszijden van de geul is lokaal de hoogte toegenomen op de stortlocaties. Voor de kust van zuidwest Walcheren is vooral de interactie van de geulen Oostgat en Sardijngeul met de kustbeschermingsconstructies van belang. Harde verdedigingswerken beschermen zowel de noord- als zuidzijde bij Westkapelle en Vlissingen. Deze harde constructies vormen ‘ophangpunten’ waaromheen, door de contractie van stroming, de geulen lokaal zeer diep zijn uitgeschuurd. In de periode 1964-2011 bedroeg de verdieping enkele meters per jaar (zie Figuur 2.5 voor de sedimentatie-erosie patronen). Tussen deze ‘ophangpunten’ wordt de kust grotendeels beschermd en in stand gehouden door strandhoofden c.q. palenrijen. Verhagen en van Rossum (1989) geven een overzicht van de aanleg van de strandhoofden bij Walcheren. Met de aanleg van strandhoofden is begonnen in 1856. Tussen 1861-1866 is deze verdediging zuidwaarts, richting de Westkapellse Zeedijk, uitgebreid. Aan de noordkant is tussen 1876 en 1891 2-km kust uitgebouwd, aangevuld met 1,5 km in 1955. Met de bouw van 1,5 km aan paalrijen in 1965 is vrijwel de gehele Zuidwest kust van Walcheren beschermd door harde constructies. Ten westen van Vlissingen is al in 1856 begonnen met het bouwen van strandhoofden over een lengte van 3 km. Deze zijn in de volgende jaren zowel noord- als zuidwaarts verder uitgebreid.

De sedimentatie-erosiepatronen in Figuur 2.5 geven de morfologische veranderingen over de laatste 47 jaar weer. In deze figuur zijn voor alle individuele sedimentatie en erosiegebieden de volumeverandering bepaald. Deze afbakening is gebaseerd op de 0 contour. De periode 1964-2011 is gekozen, omdat de 1964 bodem de eerste goed bemeten bodem is, en deze periode een redelijk representatief beeld vertoont voor de lange termijn trend (zie Hoofdstuk 3). In totaal verliest de Westerscheldemonding zand (-84 miljoen m^3). De totale bodemverandering (niet gecorrigeerd voor bagger, storten en supplementies) vertoont een verlies van -55 miljoen m^3 (-1.2 miljoen m^3 /jaar) binnen het getoonde balansgebied. Dit verlies is groter (-84 miljoen m^3 ofwel -1.8 miljoen m^3 /jaar) als we de sedimentatie rond de Oosterscheldemonding (polygonen 44-46) niet meenemen. Het bepalen van de sedimentbalans van de Westerschelde is overigens niet triviaal. Er is geen duidelijke noordelijke en zuidelijke begrenzing, waardoor de grootte van de volumeverandering sterk afhankelijk is van het gekozen balansgebied. In Figuur 2.6 is voor een iets groter balansgebied de totale erosie berekend op -206 miljoen m^3 (deelgebied 11 is niet meegenomen) over de periode 1970-2011. Het merendeel van deze erosie vindt plaats nabij Zeebrugge (-114 miljoen m^3). Een (gedeeltelijke) verklaring voor de sterk negatieve balans van dit gebied is mogelijk dat de belangrijkste stortlocatie voor de baggerspecie uit de omgeving van Zeebrugge net ten oosten buiten het balansgebied ligt.

De dominante veranderingen tussen 1964 en 2011 treden vooral op in en rond de geulen. In het zuiden zien we een verdieping van de Wielingen. Deze verdieping is mede veroorzaakt door baggeren (bijna 30 miljoen m^3). In de geselecteerde erosie polygonen van de Wielingen (Figuur 2.5 [1,3,4,11]) vindt er een afname in volume van -116 miljoen m^3 plaats. Een gedeelte van dit gebaggerde sediment wordt zowel ten noorden als ten zuiden van de Wielingen gestort (Figuur 2.5 [2,10,13]). Dit storten is een belangrijke reden voor de aanzanding van 86 miljoen m^3 in de sedimentatie polygonen in dit gebied (Figuur 2.5 [2,10,12,13]). Richting de Westerschelde, ten oosten van de Wielingen, vindt er vooral

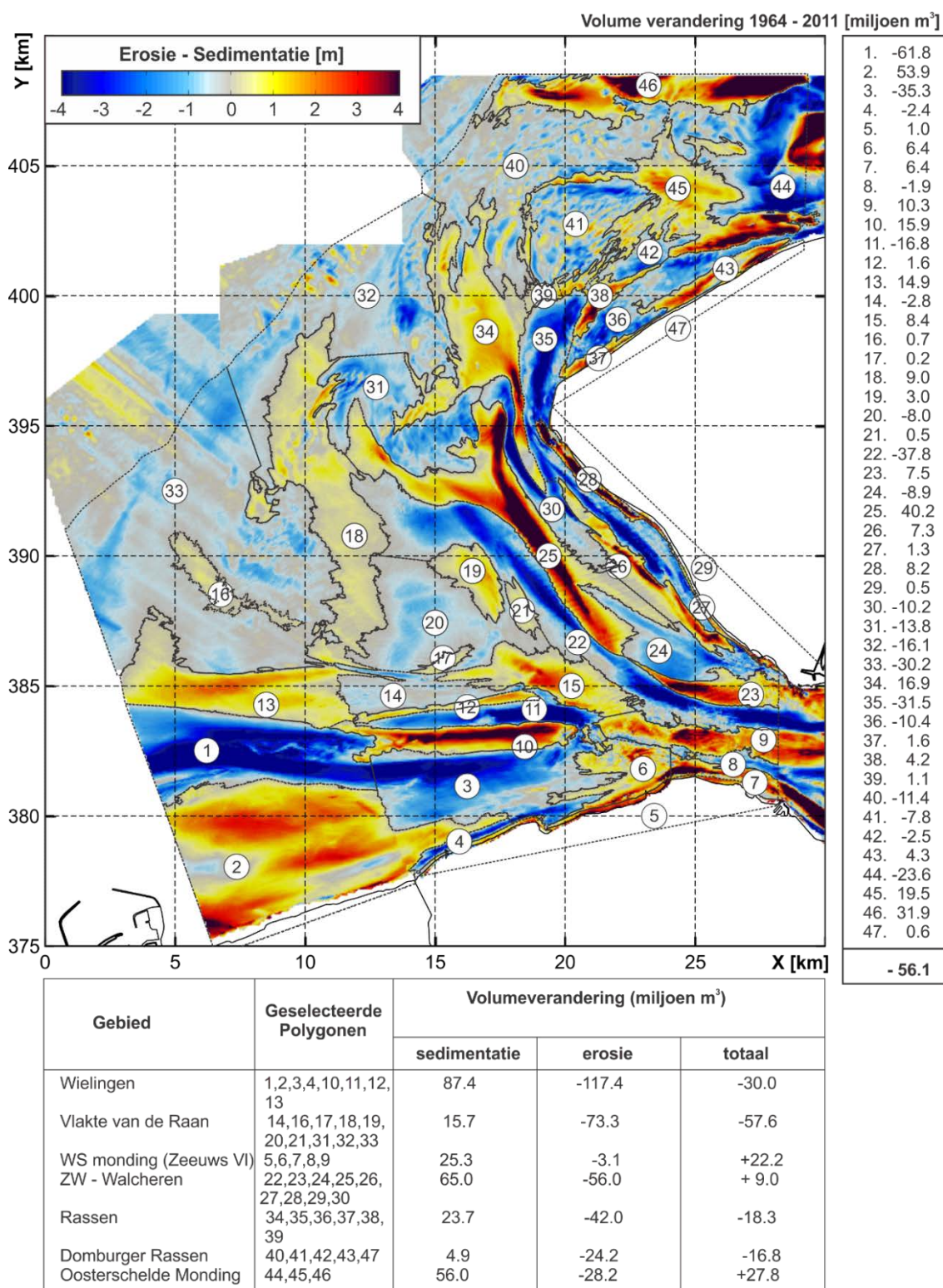
aanzanding plaats. De netto sedimentatie in de polygonen rond de Westerschedemonding [5-9] is 31 miljoen m³. Deze sedimentatie in de Westerscheldemonding is in overeenstemming met de recente inzichten in de sedimentbalans van de Westerschelde (Taal et al. 2013). In deze studie wordt geconcludeerd dat het Schelde estuarium al geruime tijd zand exporteert en slib importeert.

Langs de zuidwestkust van Walcheren zijn in de recente bodem van 2010 (Figuur 2.4), eigenlijk drie parallelle geulen: (1) Oostgat, (2) Geul van de Rassen - Deurloo-Oost en (3) Deurloo-West - Walvisstaart). Deze geulen worden gescheiden door twee bankcomplexen te zien. Het Bankje van Zoutelande scheidt het Oostgat van de Geul van de Rassen – Deurloo-Oost. De Rassen, Elleboog en Nolleplaat waren in 1964 nog losse platen, maar zijn in de huidige bodem met elkaar verbonden. Hierdoor is een langgerekt platengebied gevormd dat zich vrijwel langs de gehele zuidwestkust van Walcheren uitstrekt. Dit bankencomplex vormt de scheiding tussen de geulen) Geul van de Rassen - Deurloo-Oost en Deurloo-West – Walvisstaart. Het Oostgat ligt vrijwel stabiel in positie maar is sinds 1965 wel over vrijwel de gehele lengte dieper geworden. Langs de zuidwestkust van Walcheren geeft de geulverdieping een erosie van -43 miljoen m³ (Figuur 2.5, [30,35]). De stabiliteit van het Oostgat is mede gerelateerd aan de aanwezige resistente lagen en het aanbrengen van bestortingen (Van der Spek, 1997, Steijn en van der Spek, 2005). Een grote erosie (-32 miljoen m³) vindt plaats bij Westkapelle waar het Oostgat noordwaarts uitbreidt (Figuur 2.5, [35]). Zeewaarts hiervan vindt er sedimentatie plaats op de Rassen (17 miljoen m³ [34]). Het bankje van Zoutelande neemt met meer dan 7 miljoen m³ in volume toe [26]. Sedimentatie vindt ook plaats langs de geul van de Walvisstaart. Hierdoor neemt de langwerpige bank Elleboog met 40 miljoen m³ in volume toe en vormt het (bijna) een verbinding tussen de Rassen en Nolleplaat [25]. De geul van de Walvisstaart is sterk verdiept (-38 miljoen m³) en noordwestelijk uitgebreid [22]. De Vlake van de Raan vertoont netto een volume afname van -57 miljoen m³. Deze afname vindt vooral plaats aan het front van de buitendelta dat langzaam landwaarts opschuift [33], maar ook het centrale gedeelte lijkt overwegend iets dieper te worden.

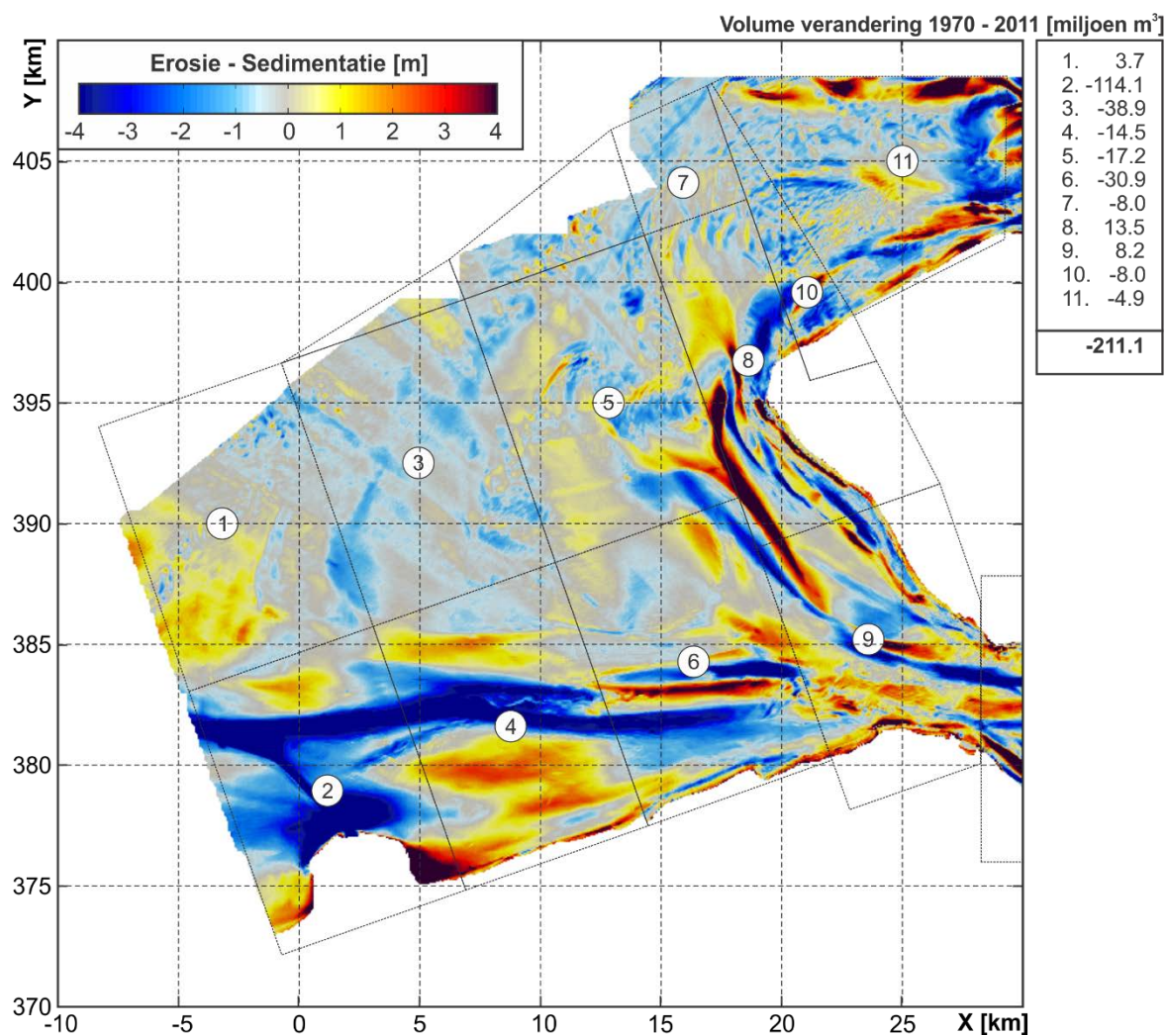
Voor de noordwestkust van Walcheren treden de dominante veranderingen op rond de uitstroming van het Oostgat bij Westkappelle en de rond de geulen van de Oosterscheldemonding. De voorliggende banken nemen met 28 miljoen m³ in volume toe. Het centrale gedeelte (aangeduid als Domburger Rassen) verliest sediment (-17 miljoen m³).

Er bestaan verschillende hypothesen met betrekking tot de sedimenttransport patronen die de sedimentatie-erosie patronen kunnen verklaren. Steijn en Van der Spek (2005) vatten de zandtransporten als volgt samen: “Onder invloed van de dominante vloedstroming wordt zand over de Nolleplaat/Elleboog en het Bankje van Zoutelande naar de kust getransporteerd. Dit zand wordt door de kustlangse stroming in het Oostgat noordwaarts en zuidwaarts afgevoerd. In het noorden draagt dit zand onder andere bij tot de vorming van de Rassen. In het zuiden wordt het zand vooral langs de flank van het Bankje van Zoutelande getransporteerd. Gedeeltelijk wordt dit zand weer noordwaarts verplaatst door het Deurloo, langs de zeezijde van het Bankje van Zoutelande. Er ontstaat een soort circulatie cel wat mogelijk een verklaring geeft voor de aanwezigheid en stabiele positie van het Bankje”. Dit concept sluit in hoofdlijnen aan bij de geschatte transportrichtingen gebaseerd op de dominante bodemvormen (Erkens, 2003). Golfgedreven transporten lijken vooral van belang op de kust waar golfbreking extra sediment transport veroorzaakt. Conclusies met betrekking tot het belang van deze grotere transporten zijn niet eenduidig. Croqué (1998) concludeert dat er een duidelijke verandering in het Oostgat optreedt tijdens stormen. Van der Slikke (1999) heeft juist aangetoond dat de morfologische veranderingen van de Walcherse kust zelfs

tijdens stormen relatief klein zijn. Dit duidt er op dat de kustachteruitgang samenhangt met continue processen (zoals getij) en niet met incidentele stormcondities. De recente studie van Damen (2015) bevestigt dit beeld.



Figuur 2.5 Overzicht van de totale volumeverandering in geselecteerde polygonen over de periode 1964- 2011.



Figuur 2.6 Overzicht van de totale volumeverandering in geselecteerde polygonen over de periode 1970- 2011.

3 Sedimentbalans van de Westerscheldemonding

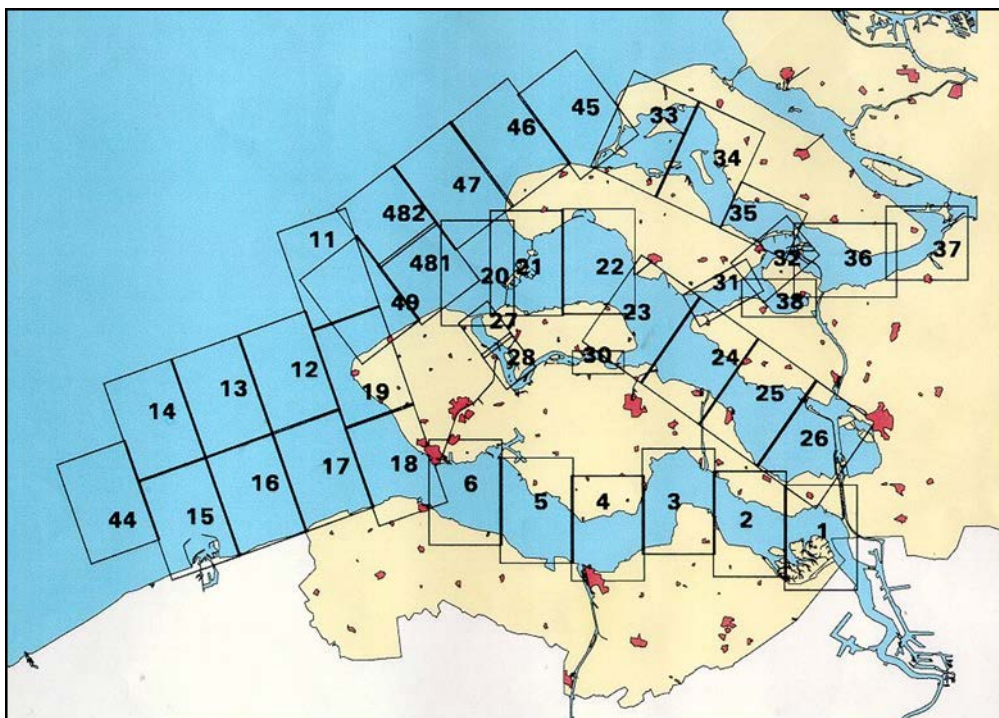
3.1 Beschikbare Meetdata

Er zijn verschillende bronnen voor de (Nederlandse) bodemdata. De belangrijkste zijn de Jaarlijkse Kustmetingen (JaKus) en de Vaklodingen. Deze twee datasets worden centraal bij Rijkswaterstaat gearcheveerd. De JaKus metingen worden al sinds 1964 opgenomen. Deze profielmetingen worden loodrecht op de kust uitgevoerd met een tussenafstand van 200-250 m en een lengte van 800-1200 m vanaf de RijksStrandPalen (RSP-lijn). De Vaklodingen daarentegen zijn gebiedsdekkend, beslaan het hele mondingsgebied tot ruwweg de -20 m contour, maar worden minder frequent opgenomen. Sinds 1950 zijn Vaklodingen beschikbaar, maar de eerste digitale opname van de volledige Westerscheldemonding is aanwezig in 1964. In deze studie worden alleen de digitale opnamen gebruikt. Vaklodingen worden opgeslagen als 10x12.5 km blokken met 20 m resolutie. In de Zeeuwse Delta worden de Vaklodingen uitgevoerd door Rijkswaterstaat Dienst Zee en Delta (voorheen Dienst Zeeland). Sinds 1970 wordt de Delta frequent gemeten en zijn er kaarten aanwezig met een opname interval tussen de 1 en 3 jaar. Vrijwel alle kaarten bestaan uit twee opnamen om een volledige dekking te krijgen. In Appendix A is een compleet overzicht van de data zoals gebruikt in deze studie gegeven. Om gebiedsdekkende kaarten te maken zijn waar nodig aanliggende jaren samengevoegd.

Een uitgebreide inventarisatie van de centraal gearcheveerde, meetdata is gemaakt door de Kruif (2001). In dit document wordt een overzicht gegeven van alle bodemdata aanwezig bij Rijkswaterstaat in de periode 1925-2000 (met een accent op de periode 1965-2000). In het algemeen kan gesteld worden dat Rijkswaterstaat vanaf 1985 de bodemdata digitaal heeft ingewonnen en opgeslagen. Data van voor 1985 bestaat hoofdzakelijk uit gedigitaliseerde bodemkaarten.

De bodemdata zijn gearcheveerd bij Rijkswaterstaat en op te vragen bij de Helpdesk Water van Rijkswaterstaat. Op dit moment bestaan er echter twee databases met bodemdata voor de Zeeuwse Delta. De data is zowel gearcheveerd volgens de originele Zeeuwse opnamegebieden (zie Figuur 3.1) en volgens de landelijke kaartblad Vakloding indeling. Uit nadere inspectie van de kaartblad Vaklodingen blijkt dat deze niet geheel accuraat zijn. Er zijn meerdere Zeeuwse Kaartbladen, van verschillende jaren, gebruikt om een gebiedsdekkende Vakloding te verkrijgen. Dit geeft een onnauwkeurigheid in deze vakloding. Als onderdeel van deze studie zijn het kaartblad Vaklodingen gecorrigeerd zodat deze alleen de juiste opnamedata bevatten. De gecorrigeerde data is beschikbaar via het OpenEarth initiatief (<http://openearth.deltares.nl>) en te vinden onder:

<http://opendap.deltares.nl/thredds/dodsC/opendap/rijkswaterstaat/vaklodingen/catalog.html>
<http://kml.deltares.nl/kml/rijkswaterstaat/vaklodingen.kml>.

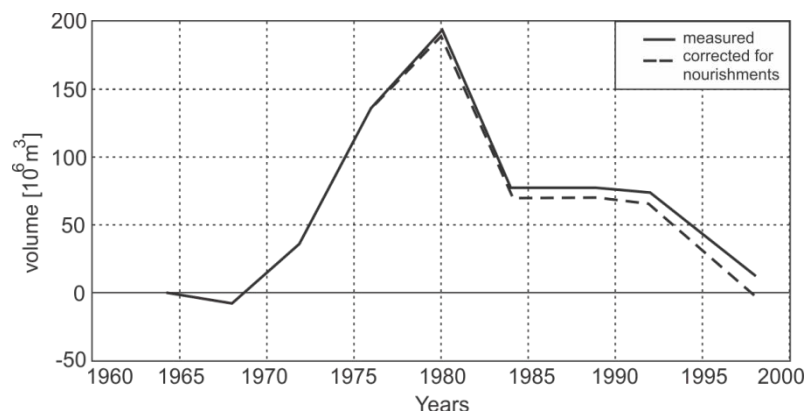


Figuur 3.1 De lodingsvakken van Directie Zeeland. De Zeeuwse delta bevat de mondingsgebieden van de Westerschelde, Oosterschelde en Grevelingen (het Haringvliet is geen onderdeel van deze lodingen omdat dit behoort tot de provincie Zuid-Holland).

3.2 Bestaande inzichten met betrekking tot de sediment balans

3.2.1 Walburg (2005) en de analyses van Duin (2005) en Nederbragt (2006)

De studie van Walburg (2005) was de eerste studie waarin op een coherente manier de beschikbare data (de Kruif, 2001) is gebruikt voor het maken van gebiedsdekkende bodemkaarten en het opstellen van een sedimentbalans van de Voordelta. Deze sedimentbalans is door Duin (2005) en Nederbragt (2006) gebruikt als basis voor de morfologische analyse van het kuststelsel. Representatieve bodemkaarten voor de gehele Voordelta zijn hiervoor geconstrueerd voor de jaren 1968, 1972, 1976, 1980, 1984, 1989, 1992 en 1998. De belangrijkste resultaten voor de Westerscheldemonding worden in Figuur 3.2 weergegeven. Tussen 1968 en 1975 nemen de volumes met 80 miljoen m^3 toe, gevolgd door een vrijwel even grootte daling tot 1997. Alleen in de periode 1984-1989 is er tijdelijk een positieve trend. Door deze golfbeweging zijn de verliezen over de totale periode beperkt (-42 miljoen m^3).



Figuur 3.2 Zandvolumeverandering van de Westerscheldemonding (Walburg, 2005). Zie Figuur 2.1 (rode polygoon 4) voor afbakening balansgebied.

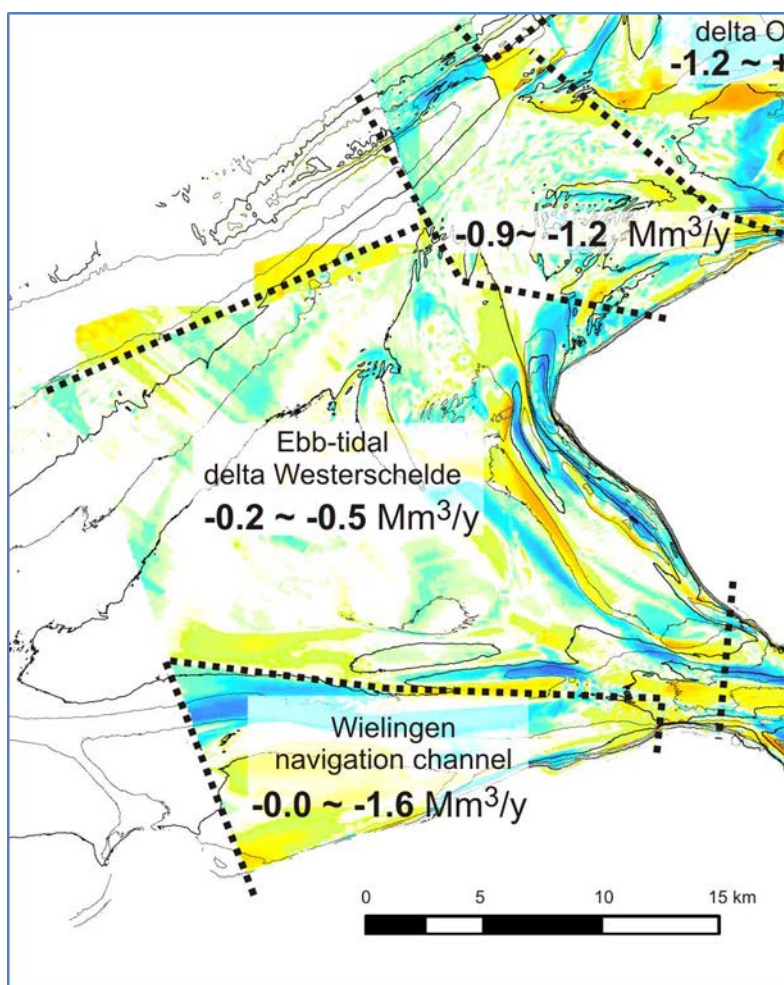
In van Duin 2005 wordt, op basis van de Walburg data, de trend van volume veranderingen geschat op -3.3 miljoen m^3/jaar . Op basis van het 90% betrouwbaarheidsinterval worden de ondergrens en bovengrens van de trend geschat op respectievelijk -3.9 en -0.4 miljoen m^3/jaar .

3.2.2 De studie van Cleveringa (2008)

De grote, niet logische, sedimentvolumeveranderingen zoals afgeleid door Walburg (2005) roepen vragen op. Een verklaring voor deze grote verliezen wordt echter niet gegeven. Ook het volumeverloop door de tijd roept vraagtekens op. Er vindt een zeer groot volume toename en vervolgens weer afname plaats. Het is niet duidelijk waar deze grote sedimentvolumes vandaan komen of waar ze naar toe verplaatsen.

Cleveringa (2008) heeft de sedimentbalans over de periode 1964-2004 in meer detail uitgewerkt. Er is niet alleen gekeken naar de berekende volumeverandering, maar ook naar de volumeontwikkeling van de verschillende morfologische elementen van de buitendelta's. Het grote voordeel van de laatste methode is dat duidelijk wordt hoeveel de afzonderlijke elementen bijdragen aan het totale sedimentvolume. Daarnaast is geprobeerd de onzekerheid binnen de sedimentbalans te verkleinen. Volumeveranderingen onder een bepaalde grenswaarde (0.5 m en 1.0 m) zijn dan niet meegenomen in de analyse.

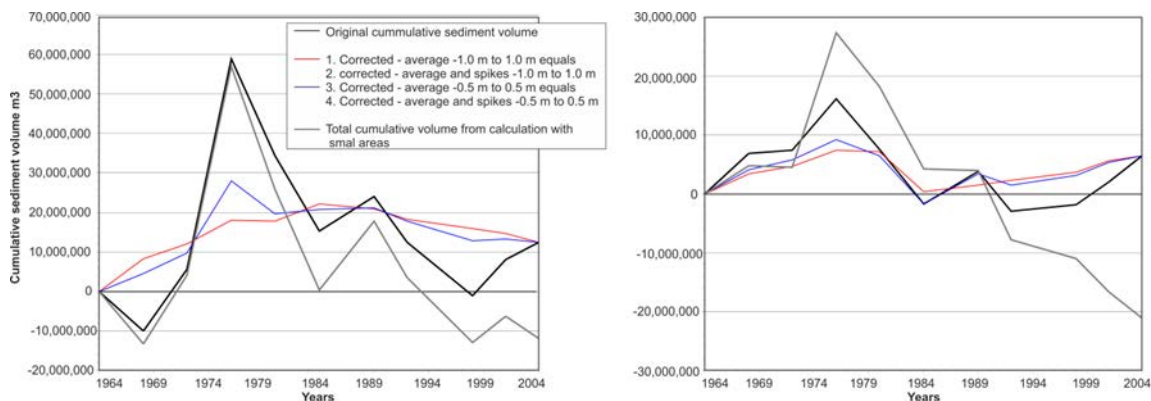
Onderstaande samenvatting geeft slechts een zeer beknopte beschrijving van de resultaten van Cleveringa (2008) voor een uitgebreide beschrijving van de methode en onderliggende aannames wordt verwezen naar de oorspronkelijke rapportage.



Figuur 3.3 Trend van volumeverandering in de periode 1976/1980 tot 2004 voor de verschillende deelgebieden van de Westerscheldemonding (gebied 5: buiten delta Westerschelde en gebied 6: Wielingen). De onderliggende kaart geeft het sedimentatie-erosie patroon over de periode 1964-2004). Overgenomen uit Cleveringa (2008).

De belangrijkste conclusies uit het onderzoek van Cleveringa worden hieronder weergegeven:

“Een belangrijk deel van de erosie en sedimentatie in de Deltakust bestaat uit relatief kleine veranderingen van de bodemhoogte (niet meer erosie dan -1 m, of niet meer sedimentatie dan $+1$ m). Een deel van de in de data waargenomen kleine veranderingen bestaat uit werkelijke veranderingen, maar een ander deel wordt veroorzaakt door de beperkte nauwkeurigheid van de gegevens. In deze studie is een analyse uitgevoerd naar de invloed van deze onnauwkeurigheid op de sedimentbalans. Vervolgens zijn de sedimentbalansen gecorrigeerd, waarna de trends in de ontwikkelingen van het sedimentvolume zijn berekend. De voorlopig beste bepalingen van de ontwikkeling van het sedimentvolume van de Westerscheldemonding (exclusief Wielingen) is -0.2 miljoen m^3 /jaar tot -0.5 miljoen m^3 /jaar. Voor de Wielingen wordt de erosie geschat tussen de -1.6 miljoen m^3 /jaar tot 0.0 miljoen m^3 /jaar (zie ook Figuur 3.3). Deze getallen zijn gebaseerd op de gedetailleerde sedimentbalansen; zie Figuur 3.4 en de beknopte beschrijving daaronder.”



Figuur 3.4 Sedimentbalans Westerscheldemonding voor deelgebieden: Vlake van de Raan (links) en Wielingen (rechts). Gebaseerd op Cleveringa et al. (2008).

Cleveringa (2008) geeft als belangrijkste conclusies m.b.t de Vlake van de Raan:

- De ontwikkeling van de sedimentvolumes door de tijd vertoont een zaagtandpatroon, met een grote piek van +50 miljoen m³ in 1972-1976 en minima van -40 miljoen m³ en -20 miljoen m³ in 1976-1980 en 1980-1984. Deze zaagtand is ook duidelijk in de cumulatieve waarden te onderscheiden (Figuur 3.4).
- Deze zaagtand vindt zijn oorsprong niet in een coherente volumeverandering van de gehele monding, maar in de wisseling van erosie naar sedimentatie voor elementen van de buitendelta. Het gaat dus om een grote volume verandering door kleine bodem veranderingen die deels door meetfouten veroorzaakt worden. Dit geeft een bevestiging dat deze pieken waarschijnlijk door meetfouten worden bepaald.
- De rode en blauwe lijn geven de volumeontwikkeling na correctie van respectievelijk de -1 tot 1 m bandbreedte en de -0.5 en 0.5 m bandbreedte. Deze correctie resulteert in een veel geleidelijker verloop van de volumeverandering. Tot 1984 vindt er sedimentatie plaats van ongeveer +1 miljoen m³/jaar, sindsdien domineert erosie met -0.5 miljoen m³/jaar.

De belangrijkste conclusies voor het gebied rond de Wielingen zijn:

- Ook in de Wielingen is er een zaagtandpatroon in de sedimentvolumes zichtbaar. Een dominante piek (25 miljoen m³ aanzanding) is aanwezig in 1972-1976. Een kleinere piek (10 miljoen m³) is zichtbaar in 1984-1989.
- De erosie tussen 1976 en 1984 is waarschijnlijk het gevolg van baggeren.
- De vrijwel identieke waarden van de rode en blauwe lijnen geven aan dat de dominante verschillen in de -0.5 tot 0.5 m bandbreedte plaatsvinden.

In de synthese vat Cleveringa (2008) de belangrijkste trends voor de Westerscheldemonding samen (zie Tabel 3.1). De erosie en depositie in de monding vindt voornamelijk plaats op de noordelijke rand, langs het Oostgat, en in het zuiden langs de Wielingen. Een analyse van de sedimentbalans laat zien dat de gebieden van erosie en sedimentatie niet in balans zijn. De cumulatieve volume veranderingen nabij het Oostgat is -14 miljoen m³ en rond de Wielingen -15 miljoen m³. In vergelijking met de grote volumeveranderingen in de erosie en depositie gebieden is de cumulatieve verandering klein. De cumulatieve volumeverandering van de Vlake van de Raan bedraagt in deze periode -20 miljoen m³. De volumeverandering is voor een groot deel te wijten aan kleine (<0.5m) bodemveranderingen. Deze kunnen daadwerkelijk opgetreden zijn, maar zijn ook (deels) het gevolg van meetfouten of onnauwkeurigheden. Correctie van de meetdata resulteert in een afname van de erosietrend van -2.2 miljoen

m³/jaar naar -0.2 miljoen m³/jaar (correctie op basis van een bandbreedte van +/-1 m). Voor de Wielingen geeft een soortgelijke correctie een afname van de erosie van -1.6 miljoen m³/jaar naar -0.0 miljoen m³/jaar.

Tabel 3.1 Overzicht van de trends in sediment volumes (in miljoen m³/jaar) voor verschillende berekeningsmethoden (zie Cleveringa, 2008 voor uitleg). Zie Figuur 3.3 voor gebiedsindeling.

	Kleine gebieden	Grote gebieden	1. Gecorrigeerd gemiddelde bandbreedte: -1.0 - 1.0m	2. Gecorrigeerd gemiddelde + pieken bandbreedte: -1.0 - 1.0m	3. Gecorrigeerd gemiddelde bandbreedte: -0.5m - 0.5m	2. Gecorrigeerd gemiddelde + pieken bandbreedte: -0.5m - 0.5m
Area 5 Westerschelde	-2.2 (1976-2001)	-1.5 (1976-2004)	-0.2 (1976-2004)		-0.5 (1976-2004)	
Area 6 Wielingen	-1.6 (1976-2001)	-0.3 (1976-2004)	-0.0 (1976-2004)		-0.0 (1976-2004)	

3.3 Nieuwe schatting van de sedimentvolume verandering (1964 – 2011)

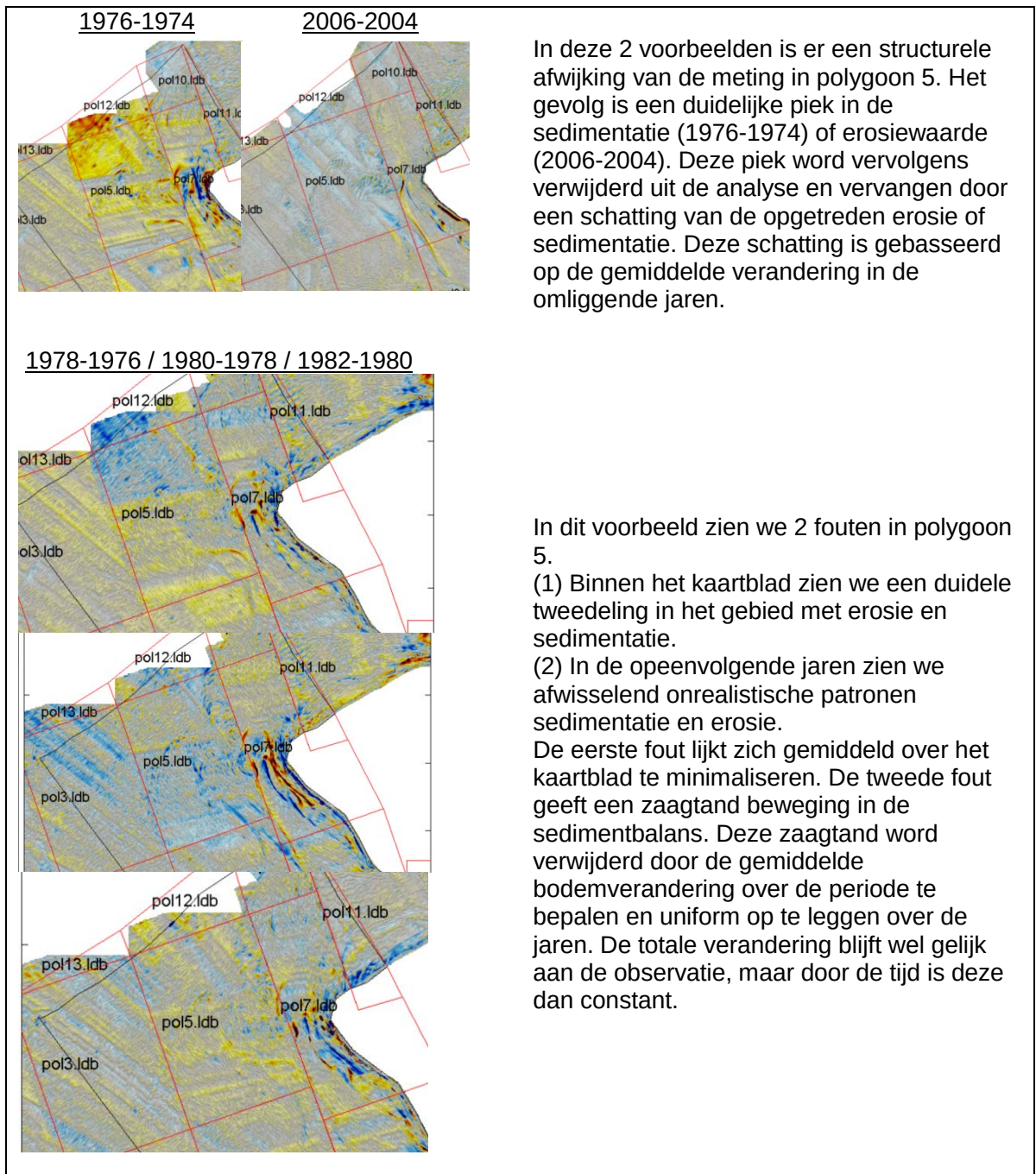
In lijn met de conclusies van Cleveringa (2008), observeren ook Elias en Van der Spek (2014) dat een sedimentbalans van de Westerscheldemonding op basis van de “ruwe” bodemdata eigenlijk niet correct is. Gezien het grillige volumeverloop en de inconsistenties hierin, het sediment moet ergens naar toe of ergens vandaan komen, is het zeer waarschijnlijk dat de data beïnvloedt wordt door meeton nauwkeurigheden. Elias en Van der Spek (2014) corrigeren daarom voor meetfouten door uitschieters in volumeverandering tussen opeenvolgende jaren uit te middelen. In deze studie is deze methode verder en netter uitgewerkt en een herberekening van de sedimentbalans uitgevoerd.

3.3.1 Bodemdata en correcties.

De basis van deze sedimentbalans wordt gevormd door de samengestelde bodems zoals weergegeven in Appendix A (zie figuur A.1 – A.5). Op basis van de Zeeuwse Kaartbladen worden gebiedsdekkende bodems aangemaakt. Voor de meeste bodems betekent dit dat er twee aangrenzende jaren gebruikt zijn om een volledige bodem te maken (Appendix A, Tabel A.1). Het representatieve jaar is bepaald door de dominante bodem (bodem met de meeste meetdata).

Nadere analyse van de geconstrueerde bodems laat wel zien dat er tussen verschillende jaren onrealistische bodemveranderingen plaatsvinden (zie Appendix A, figuur A.6 tot A.8). De sedimentatie-erosievolumes zijn gecorrigeerd zodat onrealistische bodemveranderingen niet worden meegenomen. Een volledig overzicht van de uitgevoerde correcties wordt gegeven in Appendix B. Op basis van het geobserveerde patroon van sedimentatie-erosie en het verloop van deze patronen door de opeenvolgende jaren wordt bepaald of het patroon realistisch is of het gevolg van een meetfout.

In onderstaande figuren worden aan de hand van twee voorbeelden de meetfouten beschreven en geven we een beknopt overzicht van daarop uitgevoerde correctie.

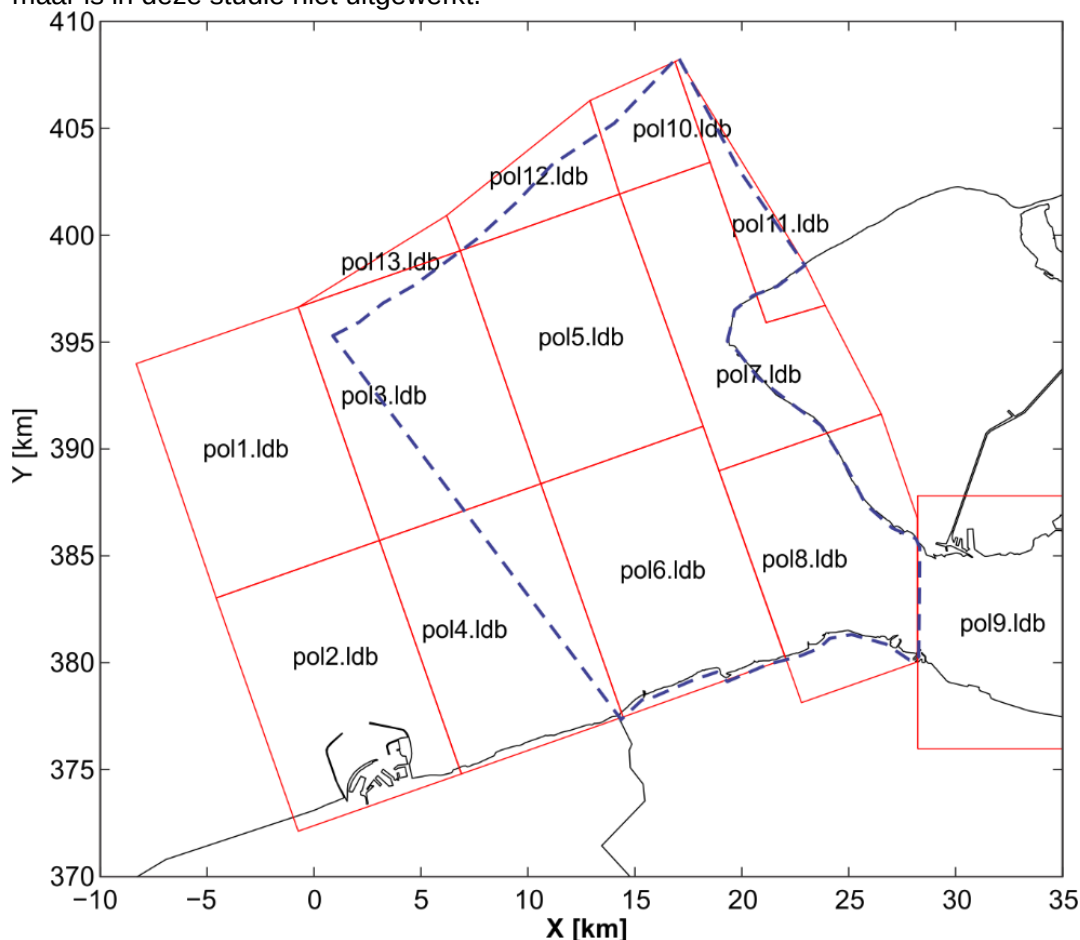


Figuur 3.5 Voorbeelden fouten en correctie van de meetdata.

De sedimentbalans in dit hoofdstuk is bepaald aan de hand van een indeling gebaseerd op Zeeuwse kaartbladen zoals weergegeven in Figuur 3.6. Het gebruik van een kaartblad indeling heeft een aantal voordelen. Ten eerste worden kaartbladen over het algemeen in 1 keer opgenomen en onnauwkeurigheden door het creëren van representatieve jaren worden hierdoor voorkomen. Daarnaast is het mogelijk jaren met onrealistische waarden uit de individuele lodingsvakken te verwijderen uit de analyse, zodat niet de gehele dataset hoeft te worden verwijderd.

Een geheel sluitende sedimentbalans van de Westerscheldemonding is eigenlijk (met de data beschikbaar in deze studie) niet te maken. Aan de zuidwestzijde is er geen gesloten grens te definiëren. De Westerscheldepolygoon zoals gebruikt in de eerdere studie van Walburg (2005) en weergegeven in Figuur 2.1 (rode polygoon 4) omsluit slechts het Nederlandse gedeelte van de monding. De grootschalige volumeveranderingen in en rond de Wielingen zijn hierin slechts beperkt meegenomen. Conclusies over volumeafname of –toename zijn op basis van dit beperkt gebied eigenlijk niet representatief voor het gehele systeem. In deze paragraaf bepalen we daarom de volumebalans voor zowel het Nederlandse deel van de monding en voor het totale gebied zoals weergegeven in Figuur 3-6. Deze polygoon geven een optimale dekking van de meetdata en bevatten een groot deel van het Belgische mondingsgebied.

Aan de landzijde is de 0 m contour als begrenzing gebruikt. Het “droge” strand en de duinen landwaarts van de 0 m contour zijn niet meegenomen in de analyse. Deze aanname is gedaan omdat: (1) de resolutie van de Vaklodingen hier eigenlijk niet toereikend is om de duinen in detail weer te geven. Een relatief kleine interpolatiefout kan door de steile duinprofielen al een grote volumeverandering van de duinen geven; en (2) de kuststrook is vooral in de oudere kaartbladen niet volledig beschikbaar is. Een schatting van de veranderingen kan wel worden verkregen door nadere analyse van de JarKus en Lidar data, maar is in deze studie niet uitgewerkt.



Figuur 3.6 Overzicht van de gebruikte polygoon in de volumebepaling voor de monding van de Westerschelde. De blauwe lijn geeft het balansgebied van het Nederlandse deel van de Westerscheldemonding.

De resultaten van de volumeberekeningen worden weergegeven in Figuur 3.7 en Figuur 3.8. In de bovenste twee deelfiguren wordt de totale volumeontwikkeling weergegeven voor respectievelijk het Nederlandse deel van het mondingsgebied en de totale. Polygonen 11, 12 tot 13 zijn niet meegenomen in de analyse. In deze deelpolygonen is de dekking beperkt waardoor een nauwkeurige volumeverandering niet te maken is. Op basis van de aanwezige data (zoals bijv. weergegeven in Figuur 2.6) kan wel worden geconcludeerd dat de volumeveranderingen hier beperkt zijn. Het niet meenemen van deze polygonen zal naar waarschijnlijkheid de sedimentbalans niet significant beïnvloeden. In beide deelfiguren zijn zowel de volumeveranderingen van de ongecorrigeerde en de gecorrigeerde data weergegeven door de rode en zwarte lijn. De onderste figuren geven de volumeverandering van de afzonderlijke deelpolygonen weer voor de gecorrigeerde data. De uitgevoerde correcties per deelpolygoon worden weergegeven in Appendix B, Figuur B.1 en Figuur B.2. Correctie van individuele uitschieters is uitgevoerd door de gemiddelde sedimentatie-erosievolumes van de 2 naastliggende punten op te leggen. Voor deelpolygonen 1, 9 en 10 zijn de uitgevoerde correcties beperkt tot een individuele uitschieter. Voor deelpolygoon 3, 4 en 7 zijn er meerdere uitschieters per deelpolygoon gecorrigeerd. Grote correcties zijn uitgevoerd in deelpolygoon 2, 5, 6 en 8. In deelpolygoon 2 bevinden zich zeer grote negatieve waarden, deze zijn verwijderd uit de berekening. Polygoon 5 en 6 vertonen een “zaagtand” in de metingen door afwisselende jaren van negatieve en positieve uitschieters. In deze polygonen is er voor gekozen deze zaagtand te verwijderen door de totale volumeverandering over de periode te beschouwen en uniform over de periode op te leggen. In polygoon 8 zijn de zeer grote positieve uitschieters verwijderd.

Figuur 3.7 en Tabel 3.2 vatten de volumeontwikkeling van het Nederlandse deel van de Westerscheldemonding samen. De ontwikkeling volgens de ongecorrigeerde en gecorrigeerde data is hier duidelijk verschillend. De grote toe- en afname in volume in de periode 1970-1985 is sterk gereduceerd na correctie. Analyse van de meetdata laat duidelijk zien dat voornamelijk meeton nauwkeurigheden deze piek veroorzaken. Op basis van de gecorrigeerde meetdata wordt, afhankelijk van de beschouwde periode, een erosietrend geobserveerd van tussen de -0.9 en -1.5 miljoen m³/jaar. Nadere analyse van de deelpolygonen laat zien dat de erosie vooral optreedt in polygoon 5 en 6. Vanaf 2000 lijkt de erosietrend af te zwakken (naar -0.3 miljoen m³/jaar). De vele uitgevoerde suppleties dragen hier waarschijnlijk sterk aan bij. Sinds 1951 is er 38 miljoen m³ gesuppleerd op langs de aanliggende kusten van Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen, hiervan is 28 miljoen m³ uitgevoerd in de periode 1991-2013.

Tabel 3.2 Overzicht volumeverandering en trends voor Nederlandse deel van het mondingsgebied.

Periode		Volumes (10 ⁶ m ³)		Trend (10 ⁶ m ³ /jaar) *	
begin	eind	Orgineel	Correctie	Orgineel	Correctie
1965	2010	-44	-21	-1.8	-0.9
1965	1978	+65	+20	+5.0	+1.4
1978	2011	-109	-41	-2.8	-1.4
1990	2010	-40	-28	-2.9	-1.5
2000	2010	-18	-1	-1.7	-0.3

*Trends zijn bepaald m.b.v. lineaire regressie over de betreffende tijdsperiode

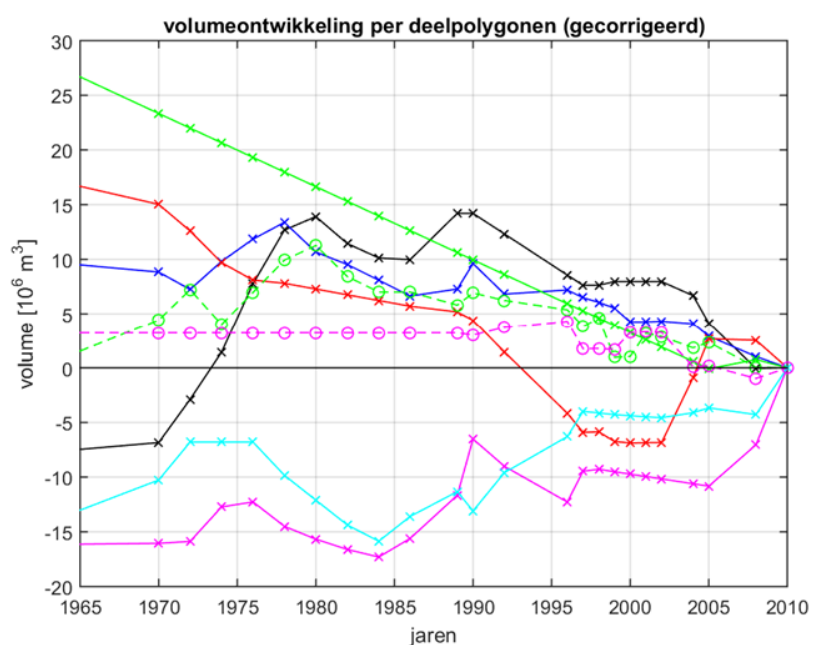
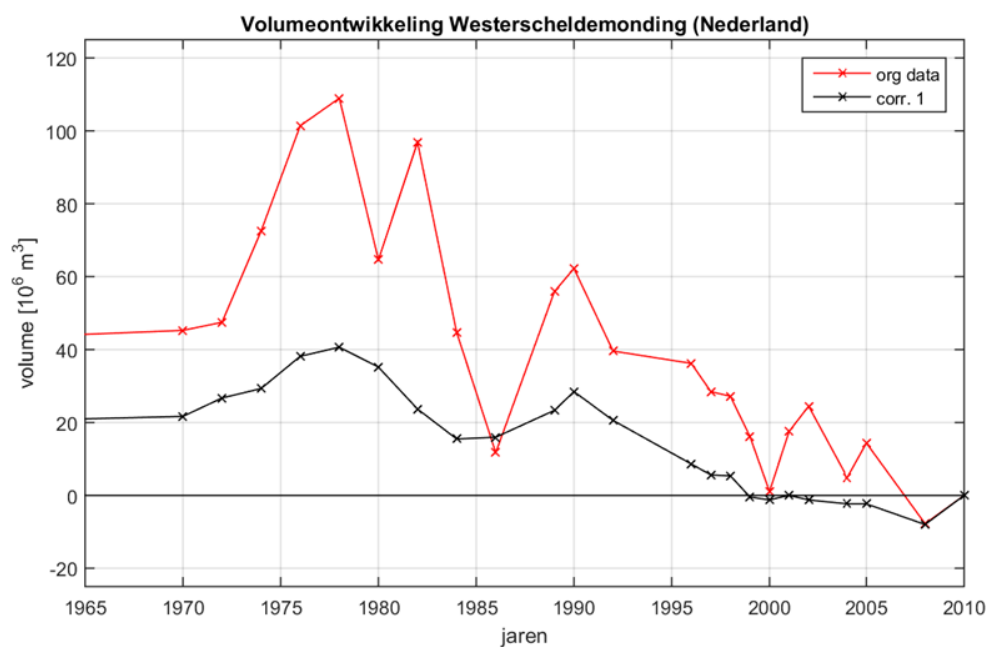
Kijken we naar het totale mondingsgebied (polygonen 1-11) dan zien we een soort gelijk beeld, maar is de totale verandering wel groter. Na correctie verliest de gehele monding 129 miljoen m³ sediment sinds 1970 of 197 miljoen m³ vanaf de 1978 piekwaarde. Dit komt overeen met een volumeverlies tussen de -5 en -6 miljoen m³/jaar. Bijna de helft van dit verlies treedt op in deelpolygoon 2 en met name rond de haven van Zeebrugge. Deze zeer grote verliezen zijn wel opvallend, maar de sedimentatie-erosie patronen geven geen duidelijk aanwijsbare meetfout aan. De patronen zouden opgetreden kunnen zijn.

Het is echter wel opvallend dat het Belgische deel van de monding bijna 100 miljoen m³ sediment verliest. Dit sediment is binnen de gebruikte data niet terug te vinden. Het is ook onwaarschijnlijk dat dit volume westelijk is verplaatst buiten het balansgebied. Het lijkt daarom waarschijnlijk dat de echt opgetreden verliezen wat kleiner zijn dan hier gevonden.

Tabel 3.3 Overzicht volumeverandering en trends voor het gehele mondingsgebied.

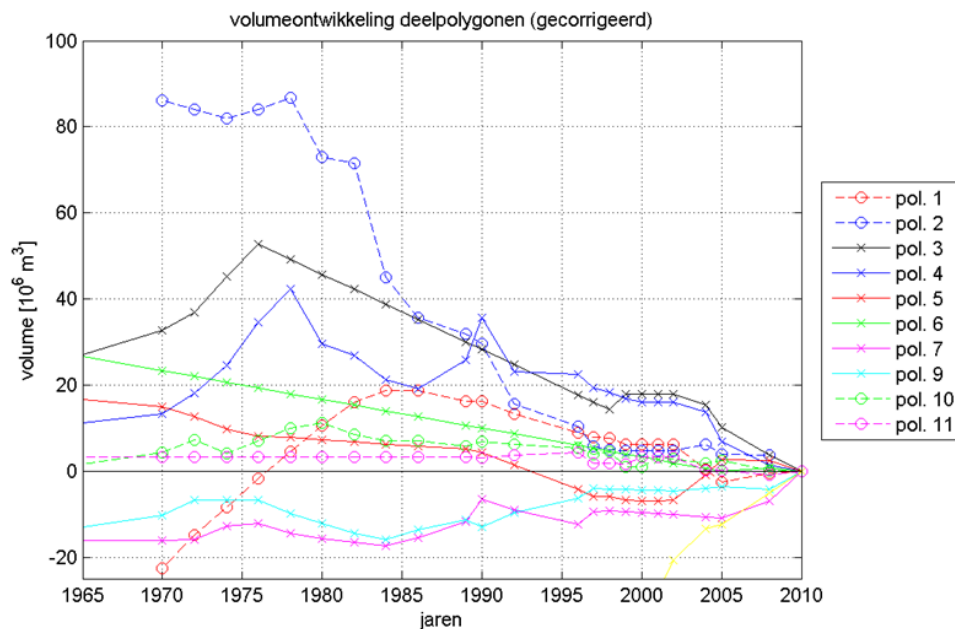
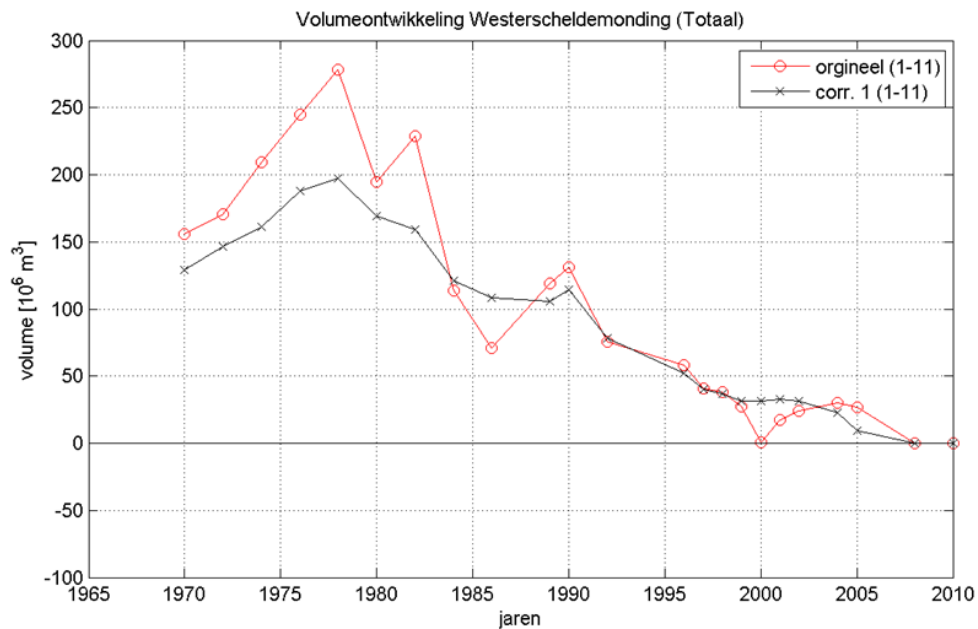
Periode		Volumes (10 ⁶ m ³)		Trend (10 ⁶ m ³ /jaar) *	
begin	eind	Orgineel	Correctie	Orgineel	Correctie
1970	2010	-156	-129	-4.9	-4.9
1970	1978	+123	+68	+16.6	+1.5
1978	2010	-278	-197	-7.6	-6.0
1990	2010	-131	-115	-5.3	-5.1
2000	2010	0	-32	-1.3	-3.8

*Trends zijn bepaald m.b.v. lineaire regressie over de betreffende tijdsperiode



Deltares (10:14:54 on Fri 8th May 2015)

Figuur 3.7 (boven) Cumulatieve volumeveranderingen in het Nederlandse deel van de Westerscheldemonding op basis van "ruwe data" (rode lijn) en de beste schatting (zwarte lijn) t.ov. de 2010 bodem. Onderste figuur geeft het aandeel van de afzonderlijke deelpolygoon binnen het balansgebied. De uitgevoerde correcties staan beschreven in Appendix C.



Deltares (20:48:01 on Fri 22th May 2015)

Figuur 3.8 (boven) Cumulatieve volumeveranderingen voor de gehele Westerscheldedemonding (deelpolygoon 1-11) op basis van "ruwe data" (rode lijn) en de beste schatting (zwarte lijn) t.o.v. de 2010 bodem. Onderste figuur geeft het aandeel van de afzonderlijke deelpolygoon binnen het balansgebied. De uitgevoerde correcties staan beschreven in Appendix C.

4 Discussie en Conclusies

Frequente bodemmetingen van de Westerscheldemonding zijn sinds 1964 digitaal beschikbaar. Deze data geven (in theorie) de mogelijkheid de morfologische veranderingen in de monding goed in kaart te brengen. Ten opzichte van de grote morfologische veranderingen in overige mondingsgebieden van de Voordelta, is er in de Westerscheldemonding over de periode 1964 -2011 maar weinig veranderd, Zie een uitgebreide beschrijving van de gehele Voordelta in Elias en van der Spek (2014). De dominante geulen, de Wielingen in het zuiden en het Oostgat langs de kust van Walcheren blijven vrijwel stabiel aanwezig. Baggeren van de Wielingen en het storten van het gebaggerde sediment aan weerszijden veroorzaken de dominante veranderingen in het zuidelijke gedeelte van het mondingsgebied. De geul-plaatsystemen aan de noordelijke kant van de monding, langs de kust van Walcheren, veranderen wel iets in ligging en configuratie, maar blijven in hoofdlijnen goed behouden. Dit wil niet zeggen dat er geen grote morfologische veranderingen plaatsvinden. De sedimentatie-erosie patronen laten over de periode 1964-2010, miljoenen m^3 aan sediment verplaatsing zien. Echter, op de schaal van heel de monding vertonen de 1964 en 2010 bodems een gelijk beeld ondanks alle ingrepen die in de Westerschelde, de monding en langs de kusten hebben plaatsgevonden.

Conclusies over de huidige volumeverandering van het mondingsgebied zijn niet eenduidig. De schattingen van erosie van de Westerscheldemonding variëren tussen de -0,2 en -3,3 miljoen m^3 /jaar (Walburg, 2005; Van Duin, 2005; Cleveringa, 2008). Deze grote spreiding wordt waarschijnlijk veroorzaakt door meeton nauwkeurigheden (Cleveringa, 2008). Een belangrijke conclusie van deze studie, en in overeenstemming met Cleveringa, is dat er puur op basis van de beschikbare (ruwe) bodemmetingen geen betrouwbare schatting van de volumeverandering van de Westerscheldemonding kan worden gemaakt. Er zijn correcties nodig om deze onnauwkeurigheden te ondervangen. In deze studie is er voor gekozen om zichtbaar onrealistische waarden niet mee te nemen in de analyse. De uitgevoerde correcties zijn vervolgens duidelijk weergegeven en beschreven.

Na correctie van de meetdata kunnen we de onderstaande conclusies trekken:

- (1) De volumeverandering van het Nederlandse deel van het mondingsgebied wordt gekenmerkt door een kleine toename van de sedimentvolumes tot 1980, gevolgd door een vrijwel constante trend van afname tot 2008. Over de totale periode (1965-2011) is de trend een afname van -0.9 miljoen m^3 /jaar. Construeren we trendlijnen over de periode 1978-2011, dan liggen de erosiewaarden iets hoger met -1.4 miljoen m^3 /jaar. Over de laatste 10 jaar zijn de erosietrends significant lager -0.3 miljoen m^3 /jaar. Dit komt mede door het grote sedimentvolume dat door zandsuppleties aan het systeem is toegevoegd. De geobserveerde volumeveranderingen op basis van alleen de bodems 1964 en 2011 (zie Figuur 2.6) geeft een representatief beeld voor de gehele periode.
- (2) De erosie van het mondingsgebied neemt sterk toe als ook het Belgische gedeelte wordt meegenomen (-4.9 miljoen m^3 /jaar over de periode 1965-2010). Deze grote waarden komen vooral door de zeer grote volumeverliezen rond de havenmonding van Zeebrugge. Een gedeelte van deze verliezen kan worden verklaard door het baggeren en vervolgens storten van het sediment buiten het balansgebied van deze studie.

De uitgevoerde correcties zoals gepresenteerd in deze studie zijn zeker niet zonder discussie, maar lijken wel essentieel om een helder beeld van de morfologische veranderingen te verkrijgen. Deze conclusie geldt niet alleen voor de Westerscheldemonding, maar voor de Vaklodingen in het algemeen. De Vaklodingen dataset met frequente, lange-termijn bodemopnamen voor vrijwel de gehele Nederlandse kust is uniek in de wereld. Deze dataset geeft een goed beeld van de opgetreden morfologische veranderingen. Zeker in gebieden die aan grote verandering onderhevig zijn (zoals bijv. het Haringvliet of de Waddenzee nabij de Afsluitdijk). In deze gebieden ligt de morfologische verandering ver boven de meetfout. In gebieden waar de morfologische verandering relatief klein is, is de nauwkeurigheid van de Vaklodingen niet optimaal. Vooral in gebieden met groot oppervlak geeft een kleine onnauwkeurigheid in de data al een groot verschil in volume. Op de schaal van de Westerscheldemonding geeft dit volumeveranderingen met een zelfde orde grootte als de werkelijk opgetreden veranderingen. In deze gebieden is het opstellen van een sedimentbalans ontoereikend om de volumeveranderingen te bepalen. Zoals ook uitgevoerd in deze rapportage moeten juist de morfologische veranderingen (en bijbehorende volumeveranderingen) in detail worden beschouwd. Alleen op deze manier is het mogelijk onrealistische veranderingen in bodemligging te onderscheiden en vertrouwen te krijgen in de sedimentbalans.

Een zeer zorgvuldige verwerking van de ruwe meetdata naar Vaklodingen, het identificeren van onrealistische meetdata door te vergelijken met voorgaande jaren en het eventueel opnieuw inwinnen van gebieden met onnauwkeurige meetdata, kan de nauwkeurigheid van toekomstige data aanzienlijk vergroten.

5 Literatuur

Bliek, B, de Gelder, A., Gautier, C., Les B. 1998. De rol van het getij in de morfologische ontwikkeling van de Westerscheldemondd. Een modelmatige onderbouwing. Eindrapport getijreconstructie Westerscheldemondd. Project: K2000*KOP. Svasek, Nederland.

Bolle, A., Wang, ZB, Amos, De Ronde, J. (2010). The Influence of Changes in Tidal Asymmetry on Residual Sediment Transport in the Western Scheldt, Continental Shelf Research, doi:10.1016/j.csr.2010.03.001.

Cleveringa, J., (2006). Morphodynamische ontwikkeling Voordelta. Rapport Alkyon A1698.

Cleveringa, J., (2008). Morphodynamics of the Delta coast (south-west Netherlands). Quantitative analysis and phenomenology of the morphological evolution 1964-2004. Rapport Alkyon A1881.

Cleveringa (2013). Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde. Project LTV Veiligheid en Toegankelijkheid; LTV V&T-RAPPORT K-17. Rapport 076945827:0.4 – Definitief, Arcadis.

Croqué, J., (1998). Onderzoek naar de oorzaak van de erosie aan de zuidwestkust van Walcheren, deel 1 & 2. Werkdocument RIKZ/OS98.876x, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Damen, J. (2014). Coastward erosion of tidal channel Oostgat. Afstudeerverslag, Universiteit Twente.

Dissanayake, D. M. P. K., J. A. Roelvink, and M. van der Wegen (2009), Modelled channel patterns in a schematized tidal inlet, Coastal Eng., 56, 1069–1083, doi:10.1016/j.coastaleng.2009.08.008.

Duin, R.N.M. van, (2005). Trends in de zandhuishouding van het Nederlandse kuststelsel. Werkdocument RIKZ/KW/2005.132w, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

Elias, E., van der Spek, A.J.F. (2014). Grootschalige morfologische veranderingen in de Voordelta. 1964-2013 (werkdocument), Deltares, Delft.

Enckevoort, I. van, (1996). Morfologisch onderzoek Westerscheldemondding; deel 2 Morfologische ontwikkeling van de Westerschelde monding sinds 1800, Universiteit Utrecht IMAU rapport R 96-21.

Erkens, G. (2003). Analyse Multibeam data Oostgat. (102 p.). Den Haag: Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Haecon (2006). Actualisatie van de zandbalans van de Zee- en Westerschelde. Rapport 1249760008/lvp.

Haring, J. 1955. Zandbalansen van de zuidwestelijke wateren van Nederland over de perioden 1872-1933 en 1933-1952, report No 3. Rijkswaterstaat, studiedienst dir. Benedenrivieren.

Hayes, M.O., 1979. Barrier Island morphology as a function of tidal and wave regime. In: Leatherman, S.P. (Ed.), *Barrier Islands: From the Gulf of St Lawrence to the Gulf of Mexico*, p. 1-27. Academic Press, New York.

Hubbard, D.K., Oertel, G., Nummedal, D., 1979. The role of waves and tidal currents in the development of tidal-inlet sedimentary structures and sand body geometry: examples from North Carolina, South Carolina and Georgia. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49 (4), 1073-1092.

Kornman, B., Arends, A., Dunsbergen, D. (2000). *Westerscheldemonnd 1970-2020. Een morfologische blik op de toekomst*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Rijkstinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

Kruif, A.C. de, (2001). *Bodemdieptegegevens van het Nederlandse kuststelsysteem, beschikbare digitale data en een overzicht van aanvullende analoge data*. Rapport RIKZ/2001.041, Rijkstinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

Nederbragt, G., (2006). *Zandvoorraden van het kuststelsysteem, onderbouwing van een conceptueel model met behulp van trends van de winst- en verliesposten over de periode 1973-1997*. Rapport RIKZ/2005.033. Rijkswaterstaat, Rijkstinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

Nederbragt, G. En G.J. Liek, (2004). *Beschrijving zandbalans Westerschelde en monding* Rijkswaterstaat RIKZ Rapport RIKZ/2004.020, 70 p.

Oertel, G.F., 1975. Ebb-tidal deltas of Georgia Estuaries. In: Cronin, L.E. (Ed.), *Estuarine Research*, Vol. 2, p. 267-276. Academic Press, New York.

Steijn, R.C., van der Spek, A.J.F. (2005). *Mogelijkheden voor geulwandversterking of verlegging Oostgat/Sardijneul*. Verslag van bureaustudie. Rapport Alkyon A1431.

Sha, L.P., 1989. Variation in ebb-delta morphologies along the West and East Frisian Islands, The Netherlands and Germany. *Marine Geology* 89, 11–28.

Slikke, M.J. van der (1997). *Grootschalige zandbalans van de Westerscheldemonding (1969-1993), een inventarisatie van dieptegegevens (1800-1996)*. Rapport R97-18, IMAU, Utrecht.

Slikke, M.J. van der (1999). *Invloed van stormen op de zuidwest kust van Walcheren; uitwerking van de meetcampagne 1997/1998*, Rapport IMAU, Utrecht.

Spek, A. van der (1997). *De geologische opbouw van de ondergrond van het mondinggebied van de Westerschelde en de rol hiervan in de morfologische ontwikkeling*. Rapport NITG 97-284B.

Taal, M., Wang, Z.B., Cleveringa, J. (2013). *LTV Veiligheid en Toegankelijkheid. G-13: Synthese en conceptueel model. Basisrapport grootschalige ontwikkeling*. Rapport 1207720-000, Deltares.

Van Veen, J., 1936. *Onderzoekingen in de hoofden, in verband met de gesteldheid der Nederlandsche kust* (in Dutch), Algemeene Landsdrukkerij's Gravenhage, the Netherlands.

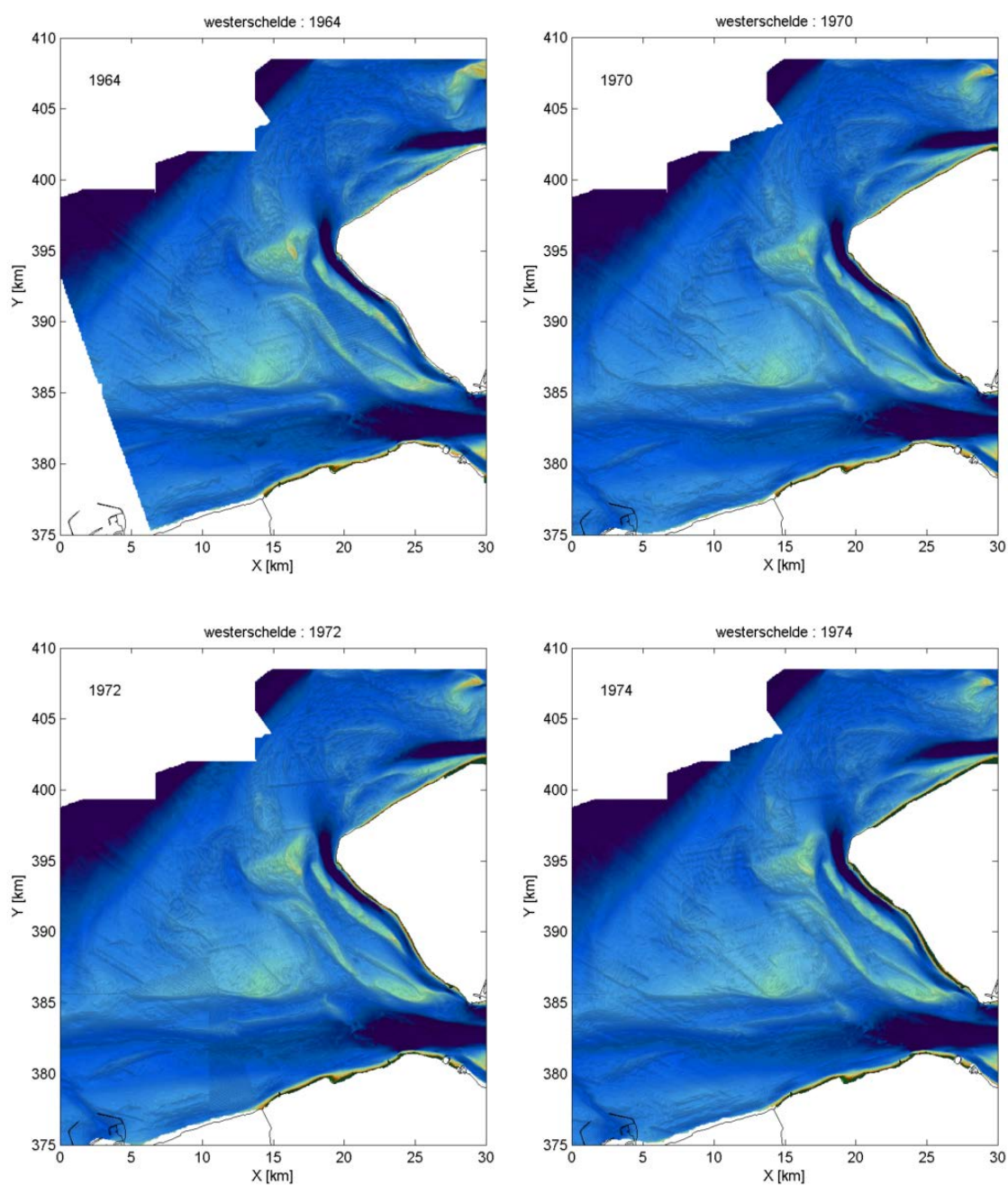
Verhagen, H.J., van Rossum, H. (1989). Kustverdediging na 1990, Technisch Rapport 12: Strandhoofden en paalrijen: evaluatie van hun werking. Min V&W, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, 's-Gravenhage.

Walburg, L. (2005). Zandvolumes in het Nederlandse kustsysteem. Werkdocument RIKZ/KW/2005.133w. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat- RIKZ, Den Haag.

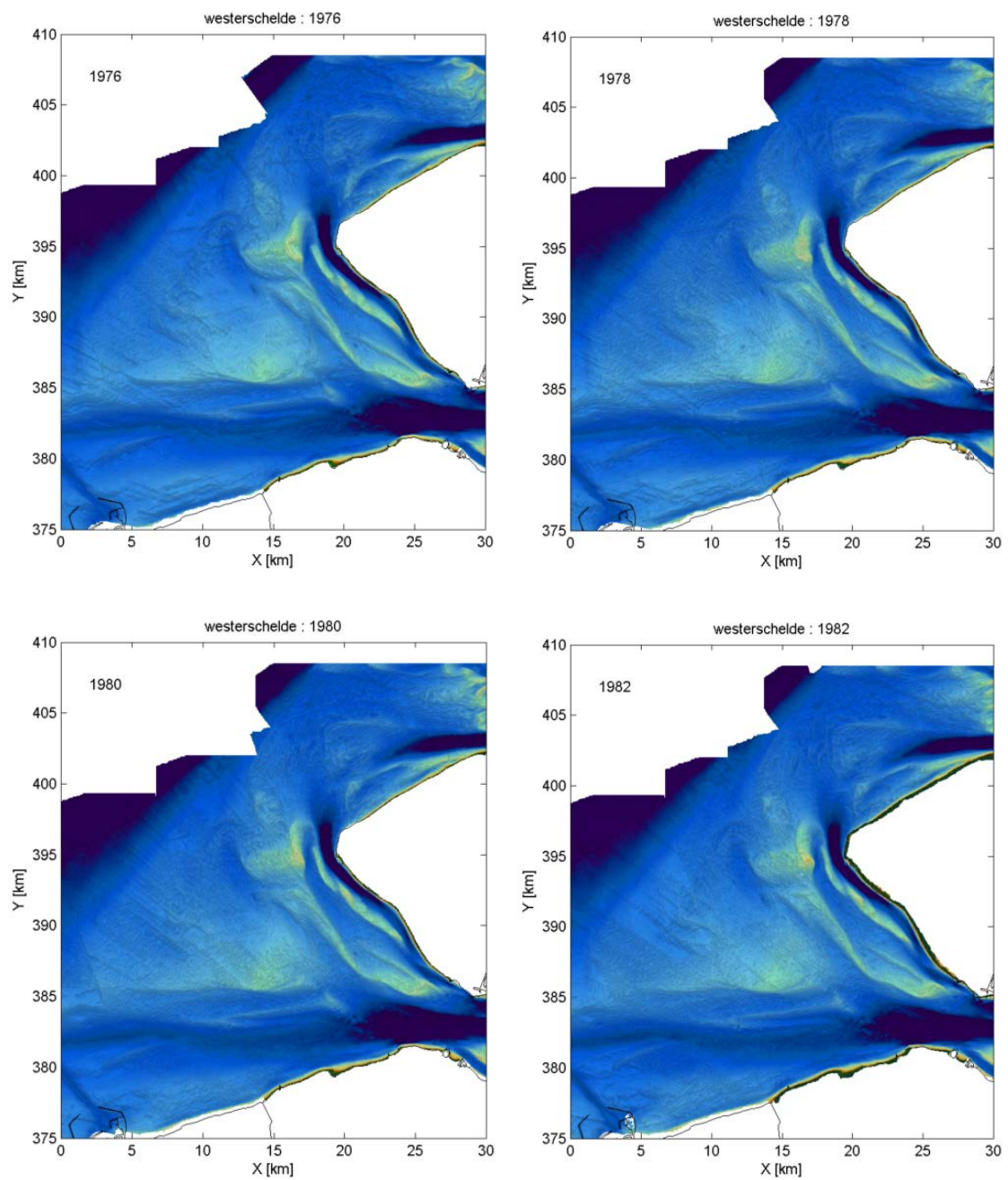
A Beschikbare bodemgegevens

Tabel A.1 Overzicht van de beschikbare jaren van bodemdata voor de verschillende deelsystemen. Deeljaren geeft de samenstelling van de data weer.

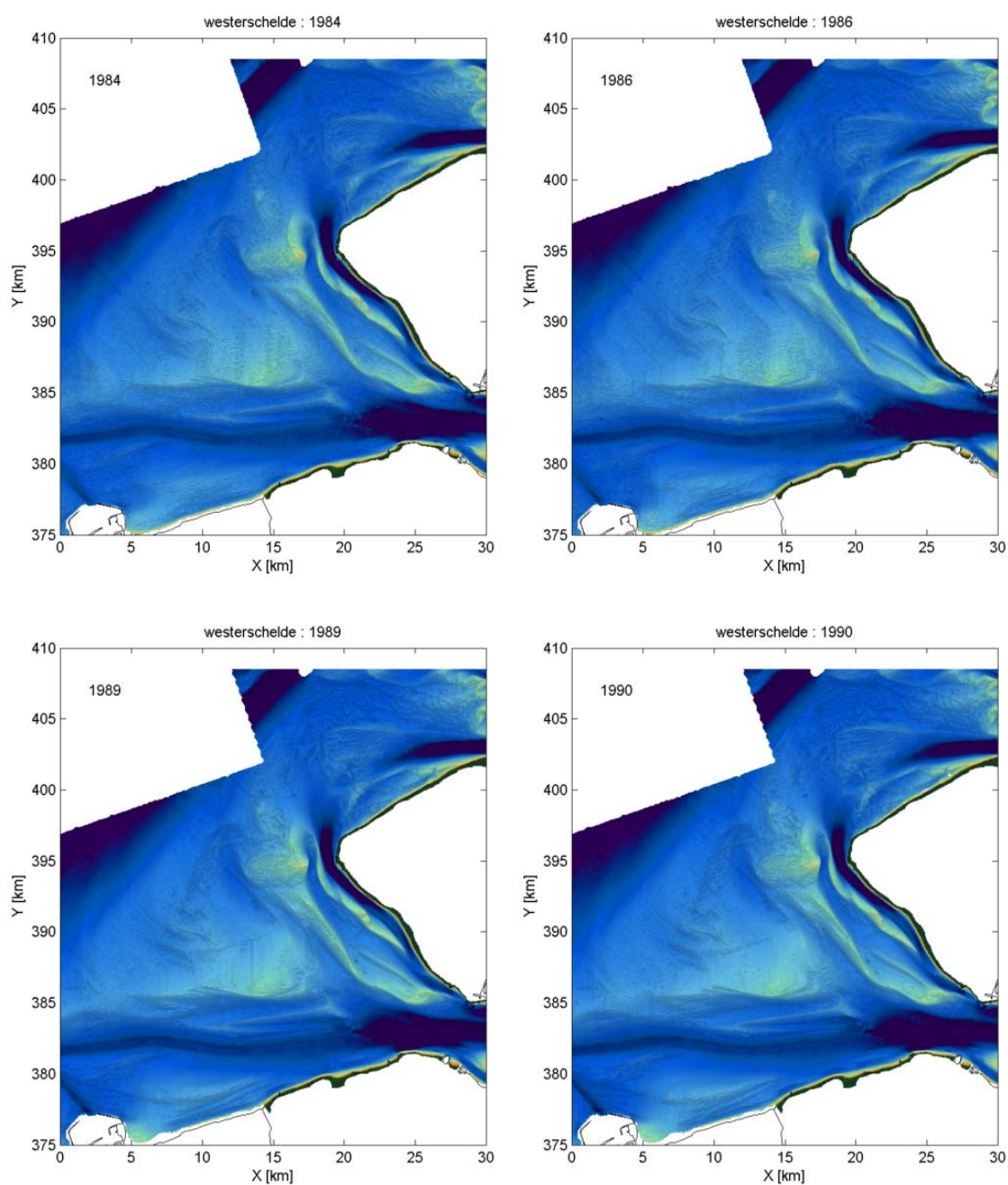
Westerschelde					
jaar	deeljaren	jaar	deeljaren	jaar	deeljaren
1964	1964	1986	1986+1985	2000	2000+2001
1970	1970+1969	1989	1989+1990	2001	2001+2002
	+1968	1990	1990+1989	2002	2002+2001
1972	1972	1992	1992+1993	2004	2004+2003
1974	1974+1975	1994	1994+1993	2005	2005
1976	1976+1975	1996	1996+1995	2008	2008
1978	1978+1979	1997	1997+1998	2011	2011
1980	1980	1998	1998+1997		
1982	1982+1981	1999	1999+2000+		
1984	1984+1985		1998		



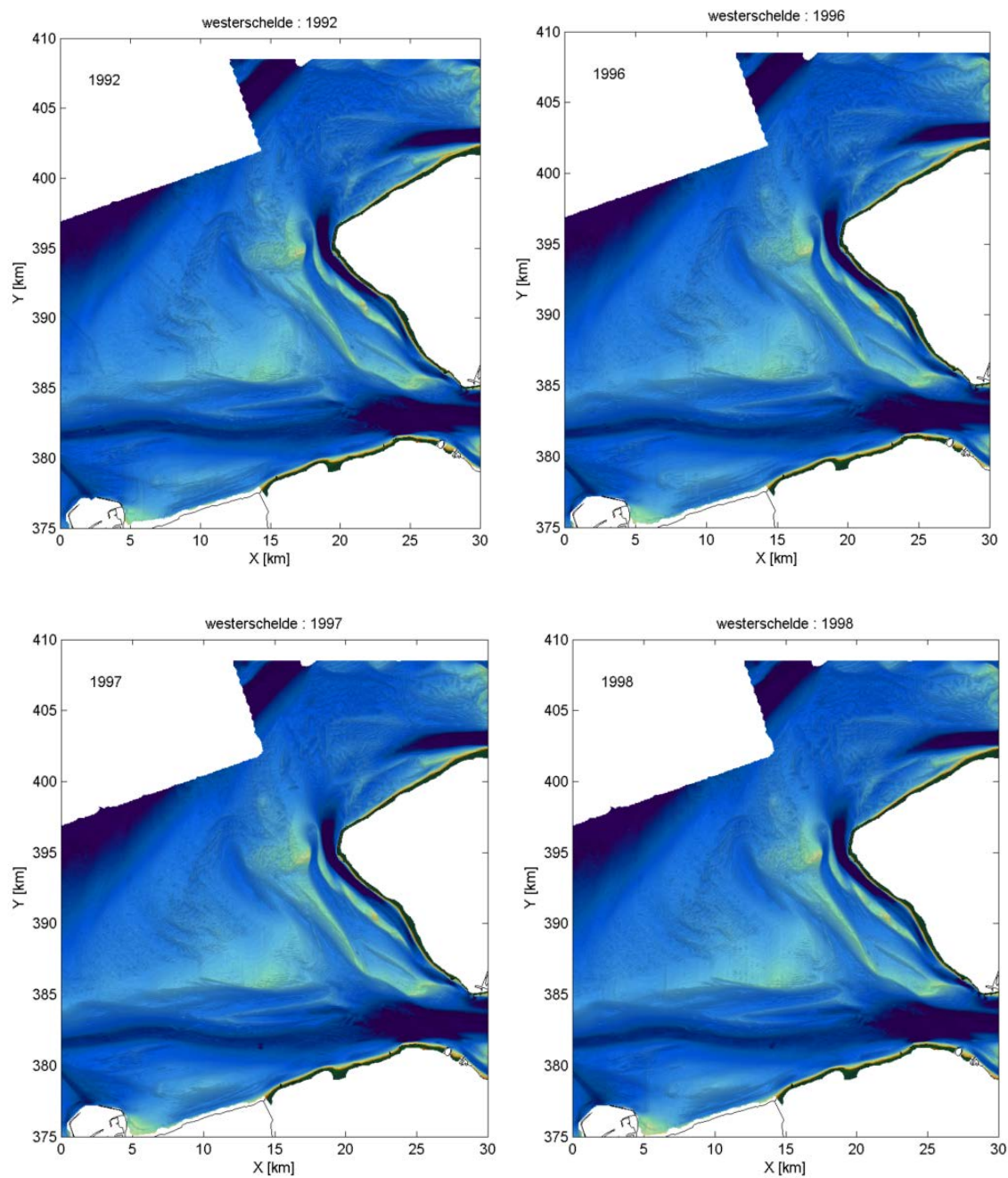
Figuur A.1 Samengestelde (geselecteerde) kaarten Westerscheldemonding 1964, 1970, 1972, 1974



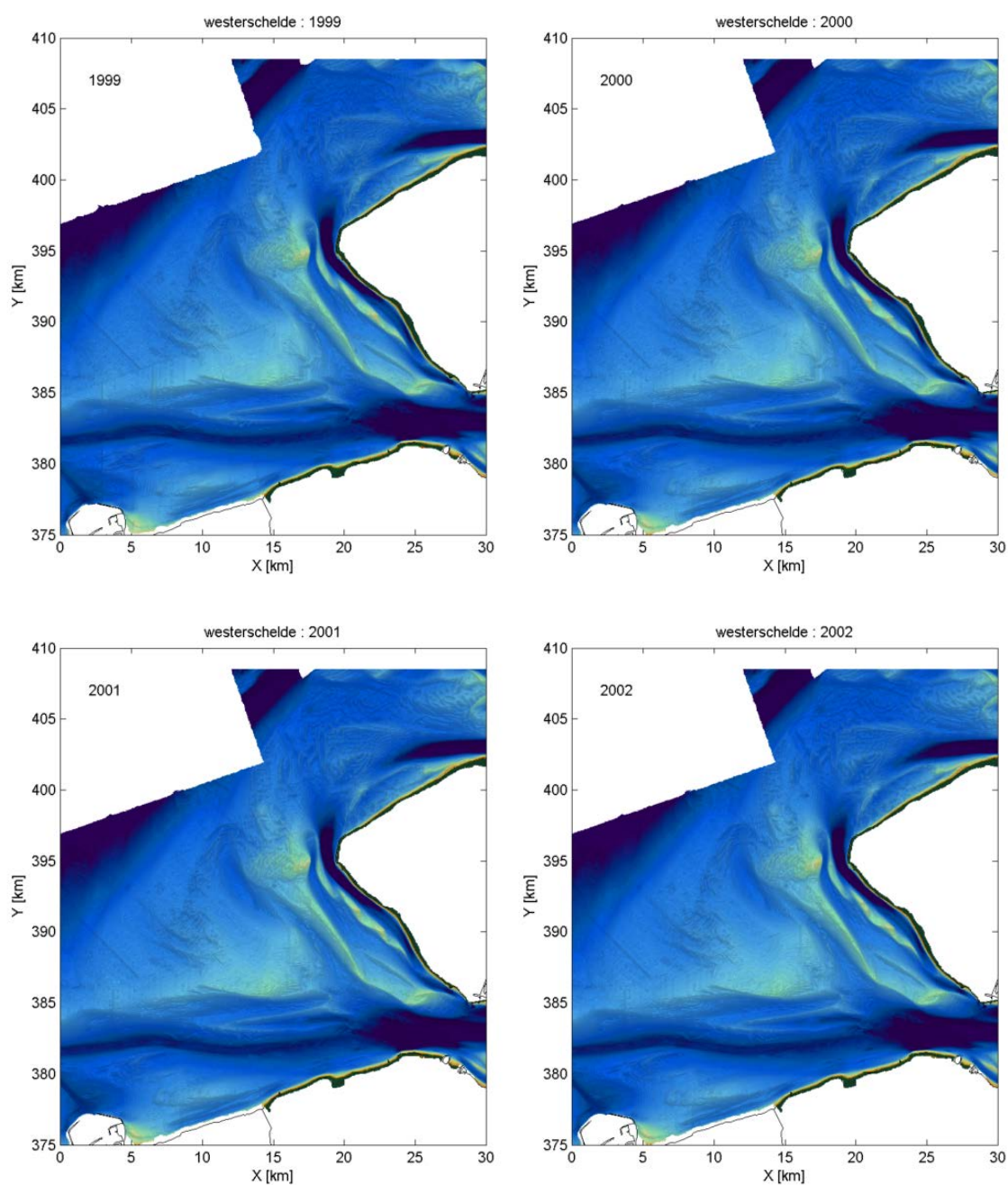
Figuur A.2 Samengestelde (geselecteerde) kaarten Westerscheldedemoning 1976, 1978, 1980, 1982



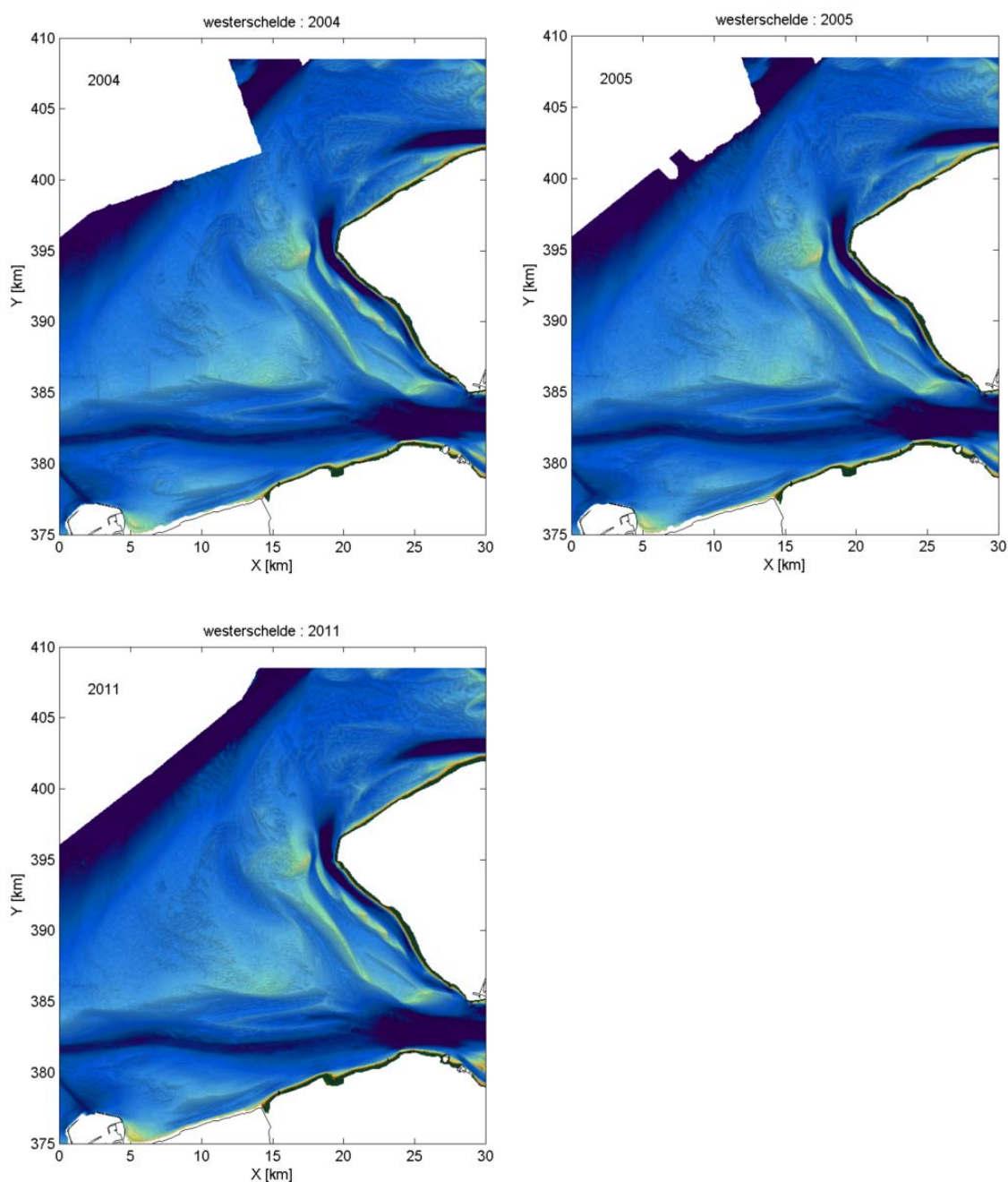
Figuur A.3 Samengestelde (geselecteerde) kaarten Westerscheldemonding 1984, 1986, 1989, 1990



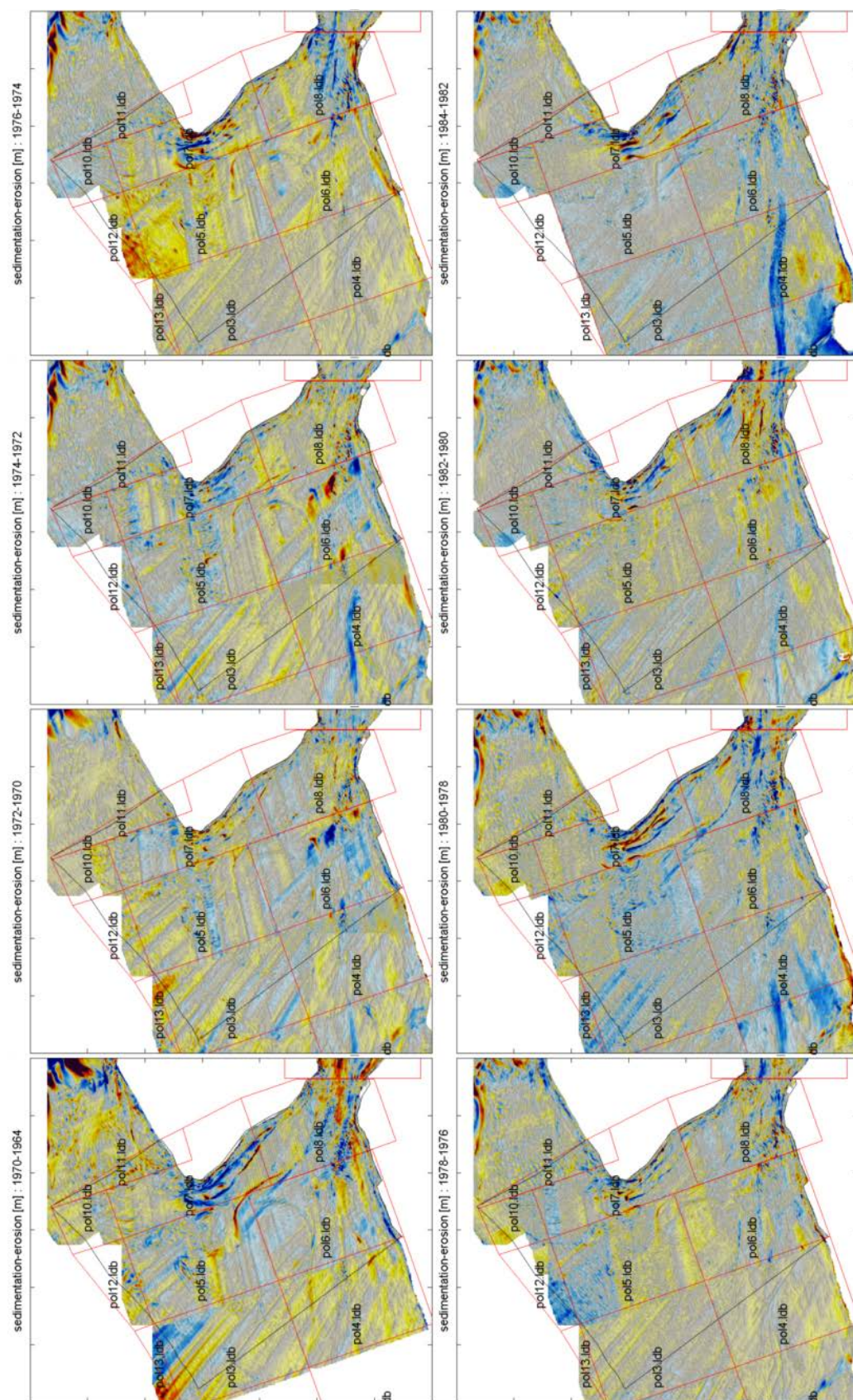
Figuur A.4 Samengestelde (geselecteerde) kaarten Westerscheldemonding 1992, 1996, 1997, 1998.



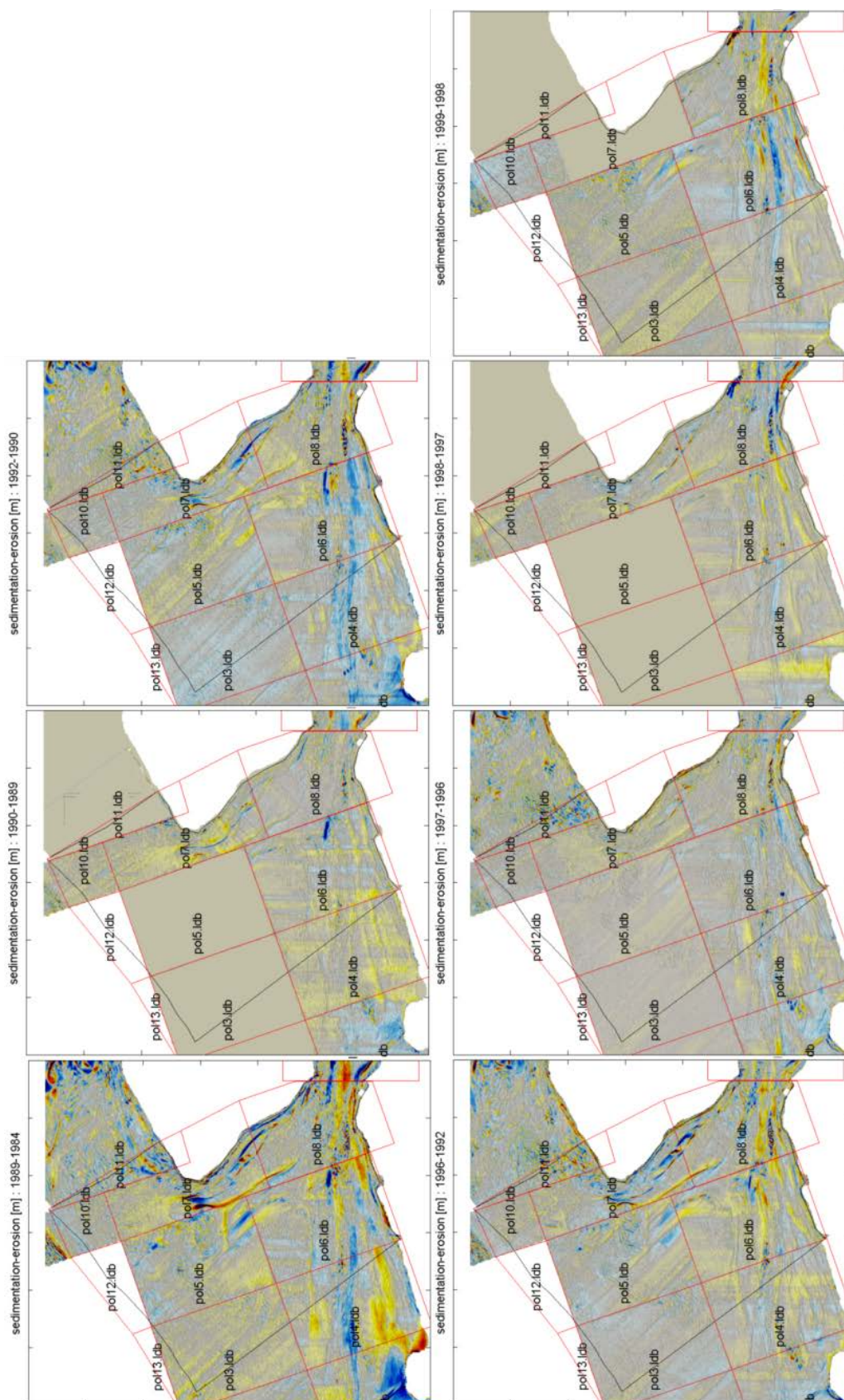
Figuur A.5 Samengestelde (geselecteerde) kaarten Westerscheldemonding 1999, 2000, 2001, 2002.



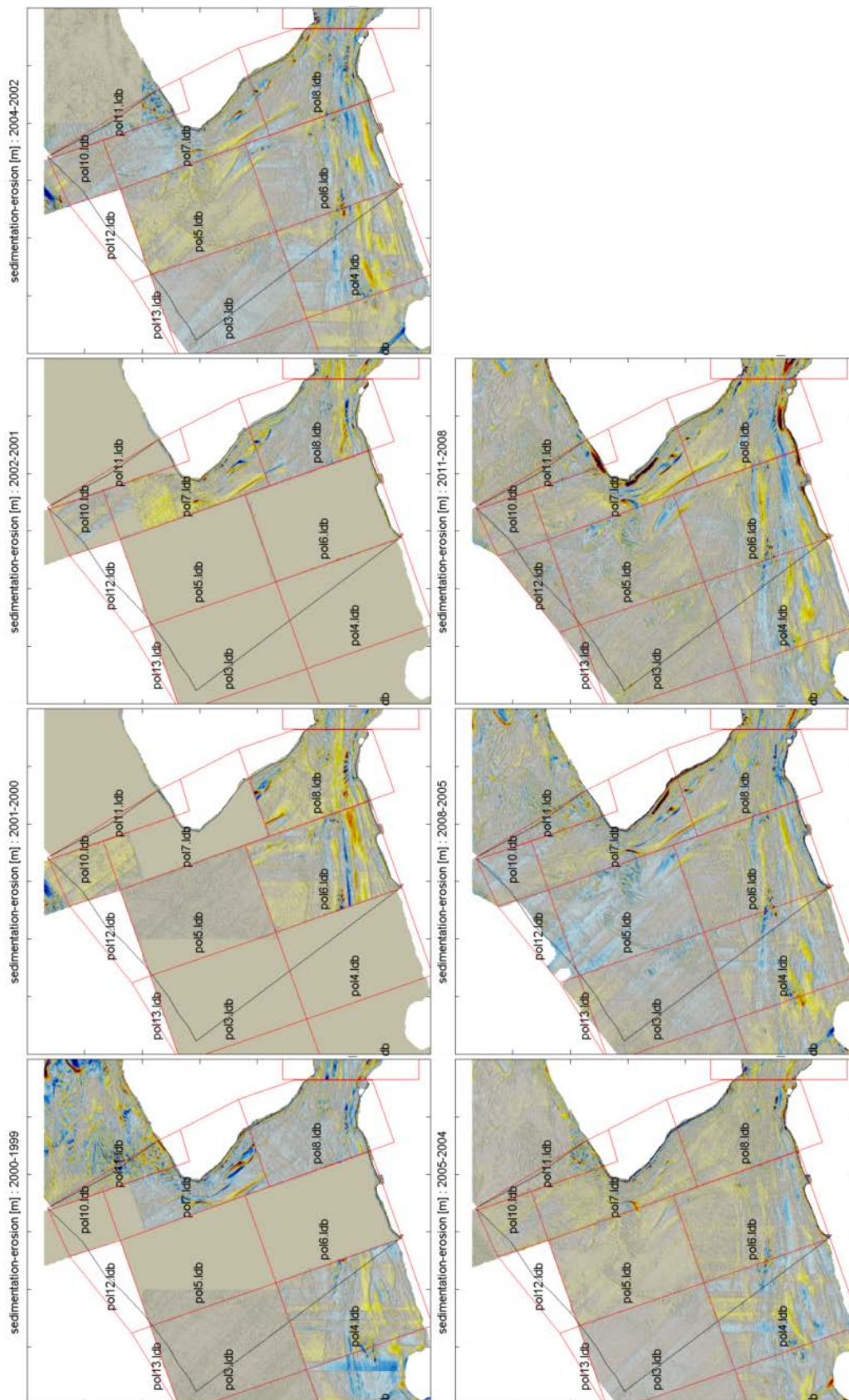
Figuur A.6 Samengestelde (geselecteerde) kaarten Westerscheldemonding 2004, 2005, 2011.



Figuur A.7 Sedimentatie-erosiepatronen voor de periode 1964 – 1982..



Figuur A.8 Sedimentatie-erosiepatronen voor de periode 1982 – 1999 Gebieden zonder veranderingen zijn het resultaat van de samengestelde bodems waarin kaartbladen dubbel gebruikt worden.



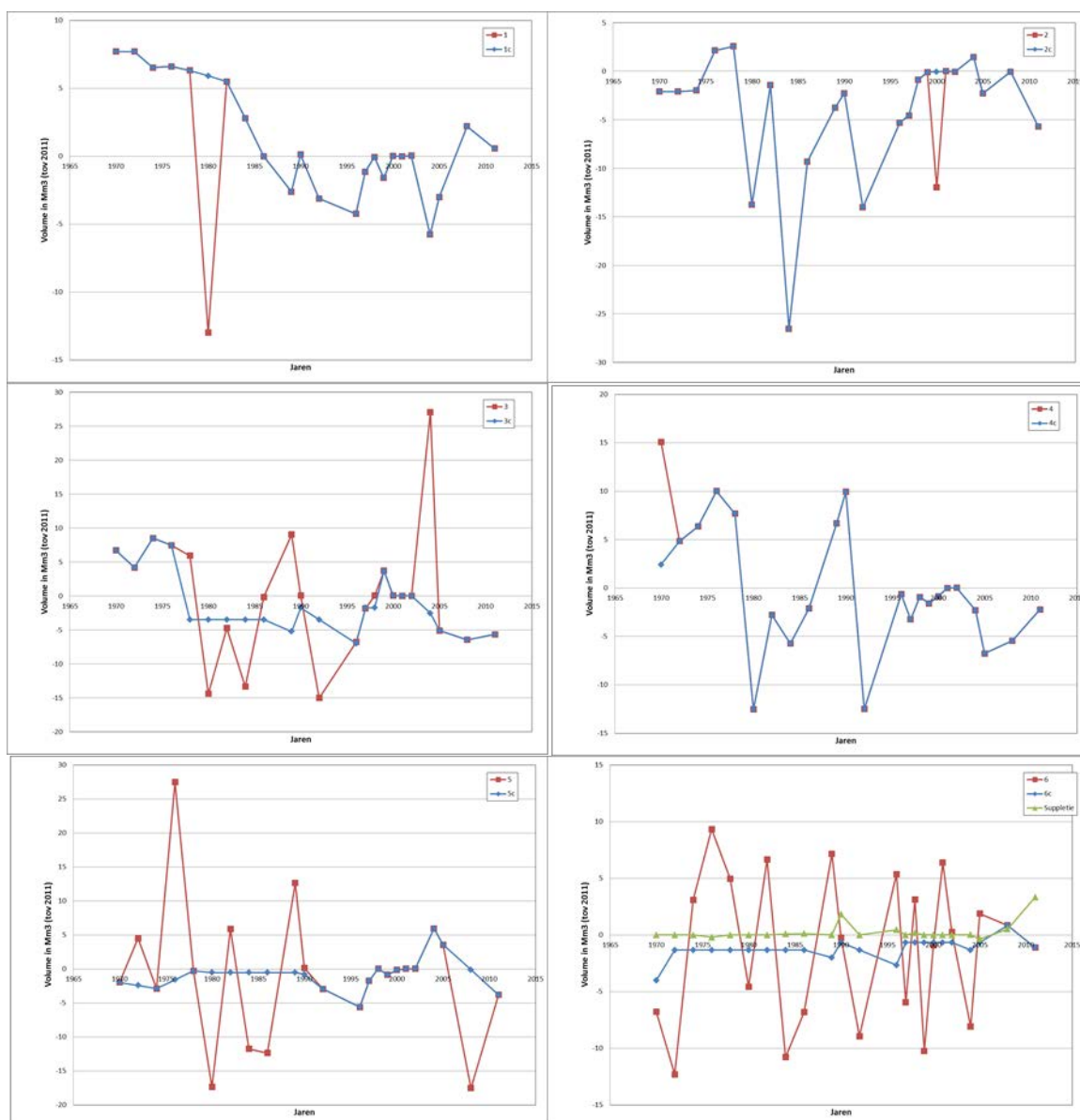
Figuur A.9 Sedimentatie-erosiepatronen voor de periode 1999 – 2011. Gebieden zonder veranderingen zijn het resultaat van de samengestelde bodems waarin kaartbladen dubbel gebruikt worden.

B Correcties per deelpolygoon

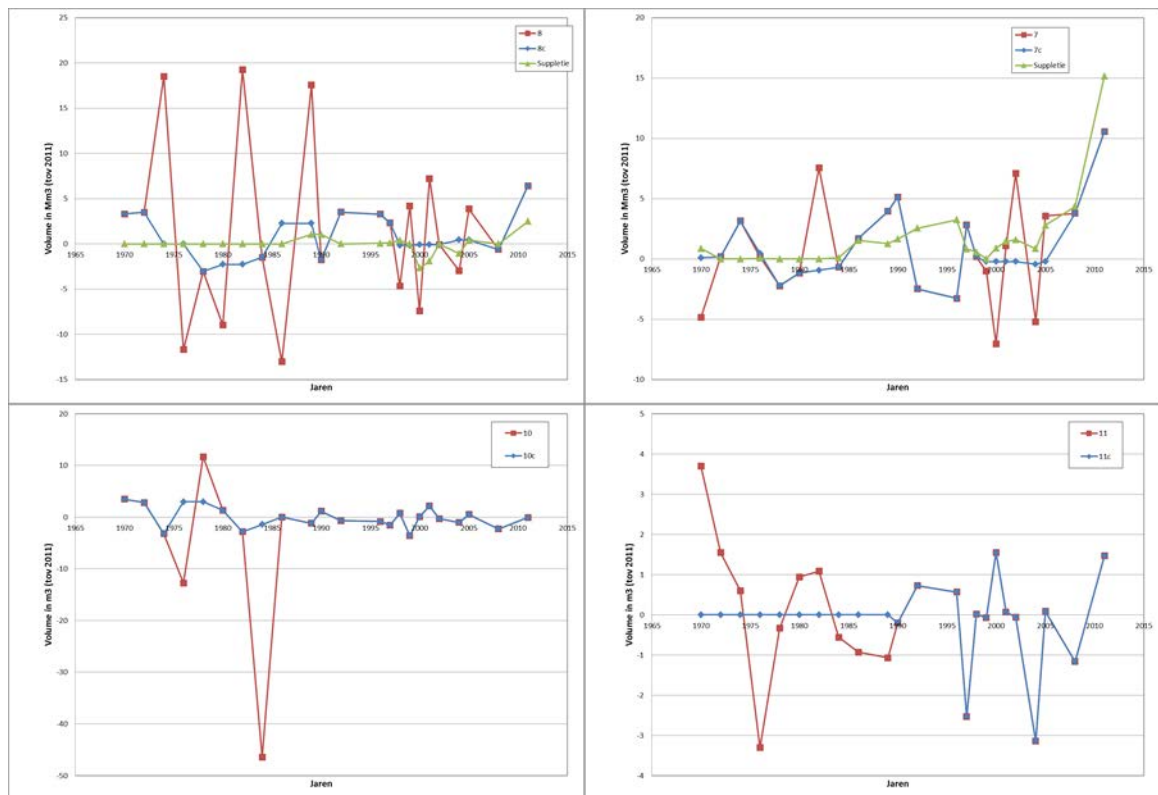
Tabel B.1 Overzicht uitgevoerde correcties per deelpolygoon en motivatie.

Pol	Jaar van afwijking	Correctie	Uitleg
1	1980	Ja	Deze extreme waarde lijkt niet waarschijnlijk. Gecorrigeerd met gemiddelde omliggende jaren.
2	1980 1984 1992 2000	Nee	Niet gecorrigeerd. Alhoewel erosie wel erg groot lijkt. Toch kan dit gedeeltelijk wel samenhangen Zeebrugge en verdieping van de Wielingen. duidelijke meetfout (streeppatroon).
3	1980 1978-1990 2004	Ja Ja	Streeppatroon, duidelijk te erosief. Afwisseling van positief en negatief. Gemiddelde trend bepaald over deze periode en opgelegd.
4	1970 1980 1992	Ja Nee Nee	Sedimentatie overschat. Erosie is mogelijk ivm aanleg zeebrugge Erosie is mogelijk ivm geulverdieping?
5	1972 1976 1978-1992 2008	Ja Ja Ja Ja	Sedimentatie overschat (streeppatroon) Sedimentatie overschat. Duidelijke fout in gehele kaartblad Duidelijke fouten in kaartblad, zowel positief als negatief en verspringing van sedimentatie naar erosie door de jaren. Over deze periode de gemiddelde bodemverandering van alle punten opgelegd Deze waarde is duidelijk te erosief. Gemiddelde van de omliggende waarde
6	1970-2004	Ja	Duidelijke opeenvolging van te negatief en positief. Daarom middeling over de gehele periode en deze trend opgelegd. Een gedeelte van de erosie zal wel terecht zijn door geulverdieping.
7	1970 1982 2000-2005	Ja Ja Ja	Erosie lijkt hier sterk overschat. Daarom correctie op basis van 1972. Geen duidelijke aanwijzing waarom sedimentatie veel hoger is dan omliggende jaren. Lokaal een paar zeer hoge (onrealistische) uitschieters. Duidelijke opeenvolging van te positieve en negatieve bodems. Over deze periode word een middeling uitgevoerd en opgelegd. In deze periode zijn wel grote suppleties uitgevoerd. Die zijn hier dus gemiddeld meegenomen.
8	1974,1976 1980,1982 1984-1989 1998-2008		Onrealistisch bodemveranderingen. Verschillen middelen hier niet uit over de jaren. Gemiddelde verandering tussen 1972 en 1978 genomen als representatief. Onrealistisch bodemveranderingen. Verschillen middelen hier niet uit over de jaren. Gemiddelde verandering tussen 1978 en 1982 genomen als representatief. Deze bodem is te negatief en positief. Hier wel middelen. Duidelijk positief-negatief over gehele kaartblad. Middelen levert hier bijna 0 verandering (suppleties worden er wel

			uitgemiddeld). Trend over de gehele periode blijft correct.
9		Nee	Geen onderdeel van de monding.
10	1970-1984		In deze gehele periode lijken de metingen niet betrouwbaar. De grote fluctuaties zijn uitgefilterd.
11	1970 1972-1984 1995-2010	Ja Ja Nee	Onwaarschijnlijk hoge sedimentatie. Opeenvolging van te hoge sedimentatie en erosie. De gemiddelde trend over de gehele periode is 0. Dit is opgelegd voor de gehele periode tussen 1970 en 1984. Grote fluctuaties. Alleen geen duidelijk aanwijsbare meetfout (niet gecorrigeerd).
12, 13		Nee	Niet gebruikt vanwege geringe dekking en duidelijke meetfouten.



Figuur B.1 Instantané volumeveranderingen voor ruwe data (rood) en gecorrigeerde data (blauw) voor deelpolygoenen 1 tot 6.



Figuur B.2 Instantané volumeveranderingen voor ruwe data (rood) en gecorrigeerde data (blauw) voor deelpolygonen 7,8, 10 en 11.