

## Memo

**Aan**

Laura Brakenhoff

**Datum**

6 juli 2023

**Contactpersoon**

Edwin Elias

**Doorkiesnummer**

+31(0)88 335 8372

**E-mail**

Edwin.Elias@deltares.nl

**Aantal pagina's**

1 van 31

**Onderwerp**

Sedimentbalans Westerscheldemonding

## 1 Doelstelling en opbouw van de memo.

### 1.1 Aanleiding tot het onderzoek

Het onderzoek in het programma *Beheer & Onderhoud Kust* ondersteunt Rijkswaterstaat bij het onderhoud en beheer van de kust. Sinds 1990 is het kustbeheer gericht op dynamisch handhaven van de kustlijn (Rijkswaterstaat, 1990; Hillen & de Haan 1993; Hillen & Roelse, 1995; de Ruig, 1998). Met name bij de zeegaten treden structurele zandverliezen en erosieproblemen op. Het beter begrijpen van het morfologische systeem en de sedimentuitwisselingen tussen kust, zeegat en bekken is een belangrijk doel van het deelproject Zeegaten. Met de systeemkennis over de werking van zeegatsystemen wordt het beheer van en onderhoud aan eilandkoppen ondersteund.

In de afgelopen jaren is er veel inzicht verkregen in de werking en ontwikkeling van de Voordelta, de mondingsgebieden van de (voormalige) estuaria in zuidwest Nederland (o.a. Elias et al. 2016). Toch rijzen er nog veel vragen over de sedimentuitwisseling tussen de monding en het estuarium. Een wel bekend probleem is hierbij de afbakening van het studiegebied. In het noorden wordt de monding van de Westerschelde begrenst door de kust van Walcheren. Deze grens is duidelijk te trekken, zowel geografisch als morfologisch gezien. Aan de zuidzijde is het lastiger. De landgrens tussen België en Nederland ligt ruwweg over het midden van de Vlakte van de Raan, waardoor deze geen morfologische afbakening geeft. De Vlakte van de Raan strekt zich in het Belgische deel nog ver zeewaarts en zuidelijk uit en gaat dan min of meer vloeiend over in de Vlaamse Banken. Naast een onduidelijke morfologische begrenzing is er ook een verschil in meetfrequentie en nauwkeurigheid tussen het Belgische en Nederlandse meetdata te onderscheiden. Ook zijn de vele ingrepen en baggerwerkzaamheden rond en in de Haven van Zeebrugge een complicerende factor.

In deze memo wordt een verdiepende slag gemaakt in het beter begrijpen van de sedimenthuishouding van de monding en de sedimentuitwisseling tussen de Westerschelde en de monding door:

- (1) uitwerking van het sedimentboxmodel van het Nederlandse deel van de monding en
- (2) berekening van de actieve volumebalans van het gehele mondingsgebied.

De memo bestaat uit 4 inhoudelijke hoofdstukken. In Hoofdstuk 2 worden de beschikbare bodemkaarten voor het mondingsgebied beknopt beschreven. Hoofdstuk 3 geeft een actualisatie van de sedimentbalans van het Nederlandse deel van de monding. Dit hoofdstuk vat eerdere studies samen, geeft de resultaten van de berekende volumeveranderingen en vat deze volumes samen in een sedimentboxmodel. Ter discussie is een gedetailleerde balans bijgevoegd waarin de sedimentuitwisseling tussen de verschillende morfologische

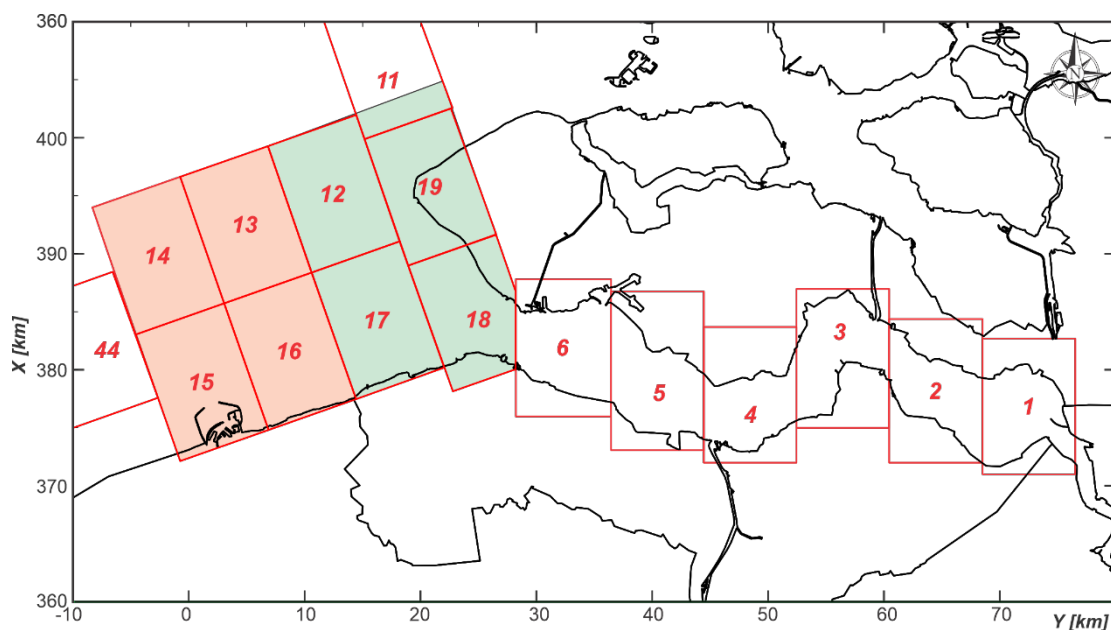
onderdelen van de monding wordt gegeven. Hoofdstuk 4 bevat de resultaten van een volumeberekening op basis van de actieve volumebalans van het gehele mondingsgebied gepresenteerd. Hoofdstuk 5 vat de resultaten van deze memo beknopt samen.

## 2 Beschikbare meetdata, bodemkaarten en ingrepen

### 2.1 Inleiding

De monding van de Westerschelde bestaat uit een Nederlands en een Belgisch deel. De grootste onzekerheid in bodemligging en volumeontwikkeling ligt in het Belgische deel. Gedeeltelijk komt dit door een mindere dekking daarnaast wordt dit deel sterk beïnvloed door baggerwerkzaamheden waarvan de gegevens onzekerheid bevatten.

De volumebalans wordt dan ook voor beide delen afzonderlijk uitgewerkt. Het onderscheid tussen de 2 delen is gebaseerd op de meetvakindeling (Figuur 2-1). Deze indeling is niet exact gelijk aan de staatsgrens, maar geeft wel een goede benadering hiervan. Soortgelijke indelingen zijn ook in de eerdere studies van Elias et al. (2016) en Nederbragt en Liek (2004) gehanteerd.



Figuur 2-1: Onderscheid in Belgische deel van de monding (rood) en Nederlandse deel (groen) op basis van de Zeeuwse Kaartbladindeling.

### 2.2 Meetdata en Bodemkaarten

Voor de berekening van de volumeveranderingen is het nodig een volledige dekking van het interessegebied te hebben in alle beschouwde jaren (zie Appendix A voor dekking van de meetdata). Een keuze kan zijn om alleen de bodemkaarten met volledige dekking mee te nemen. Dit zou betekenen dat veel van de oudere datasets niet gebruikt worden. Een andere optie is om de bodemkaarten te combineren om zo de beschikbare data optimaal te benutten. Bij het samenvoegen van data worden de volgende richtlijnen gebruikt:

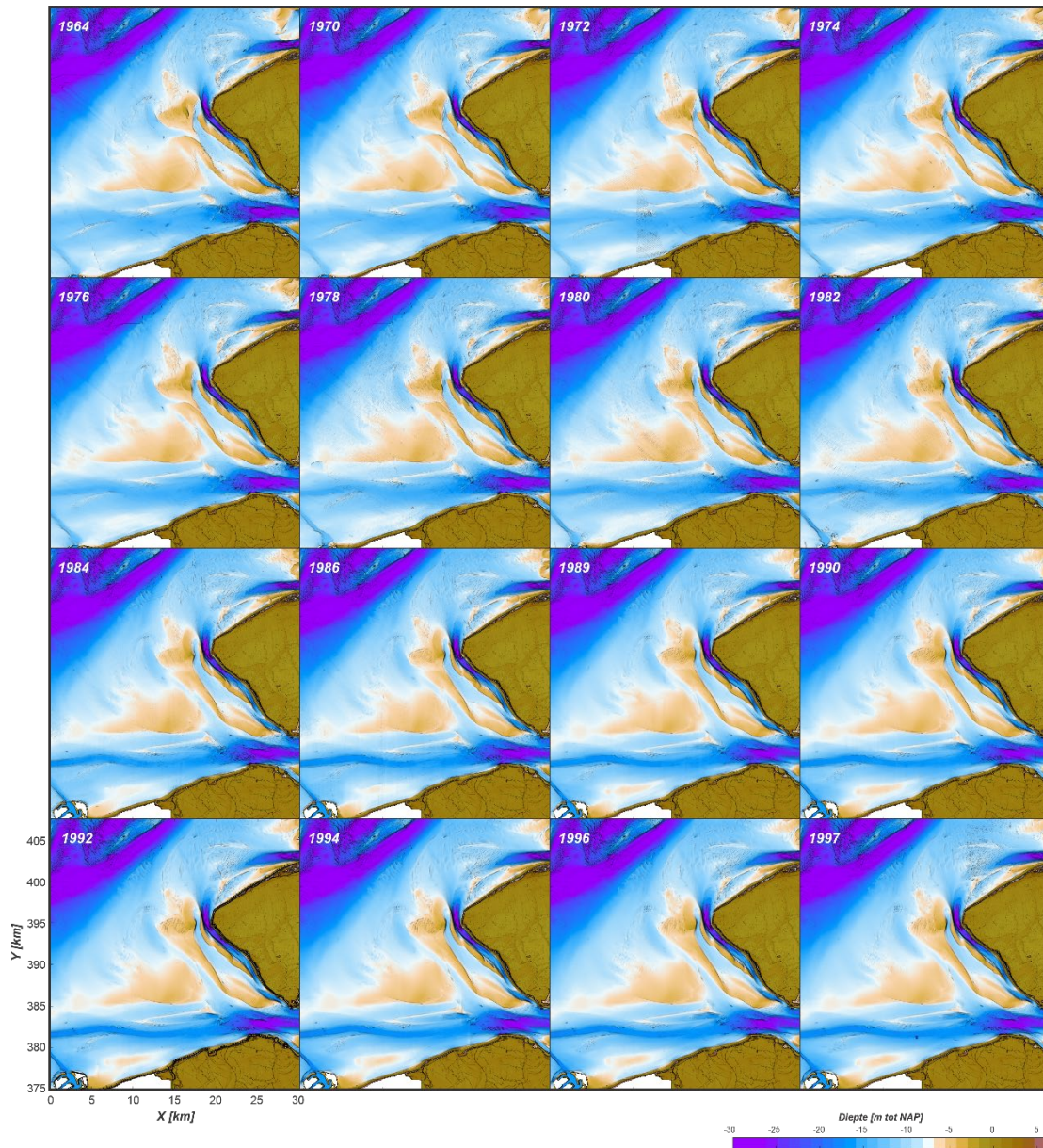
- (1) als basis wordt de bodem met grootste dekking gebruikt.
- (2) missende gebieden worden opgevuld met de dichtstbijzijnde meting (deze moet binnen een interval van 1 tot 2 jaar vallen. De gebruikte jaren per bodem zijn weergegeven in de tabellen behorende bij Figuur 2-2 en Figuur 2-3.

- (3) de kaarten worden geïnspecteerd op missende datapunten en onrealistische waarden en waar nodig gecorrigeerd.

In de periode 2014-2019 wordt een iets andere methode gehanteerd. In deze jaren is een groot deel van de Nederlandse kustzone ingemeten, maar niet de gehele monding. De missende gebieden (met name het zeewaartse deel van de Vlakte van de Raan) is hier door lineaire interpolatie ingevuld.

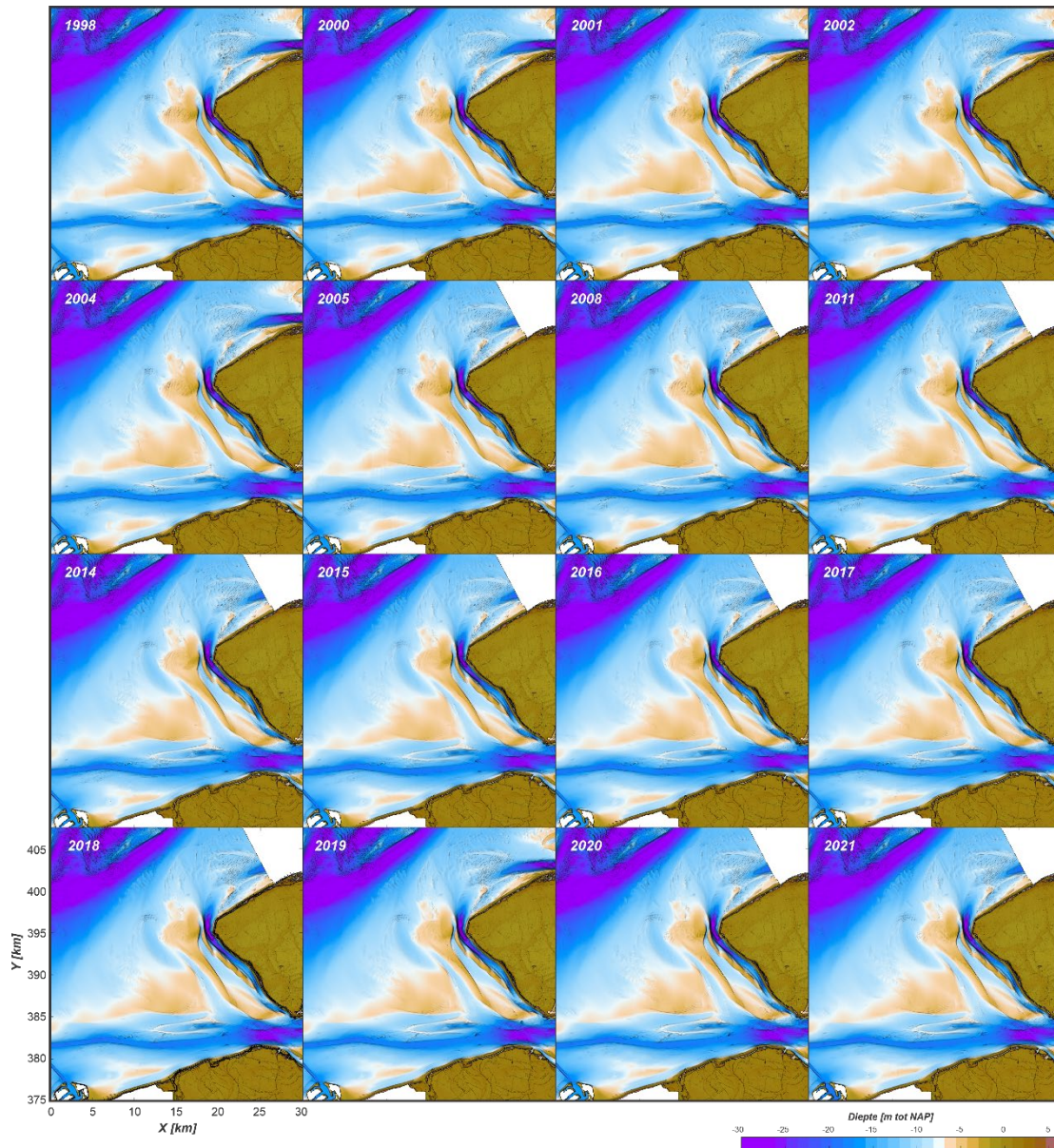
De verkregen bodems en de onderliggende data zijn samengevat in Figuur 2-2 en Figuur 2-3. In alle bodems is het AHN toegevoegd om de aanliggende kusten van Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen in te vullen. Toevoeging van het AHN is vooral uitgevoerd voor de visualisatie en wordt niet meegenomen in de volumebalans aangezien deze alleen de data tot NAP +3 m gebruikt.

Door het iets anders samenvoegen van de jaren en het toevoegen van het AHN kunnen de geconstrueerde bodemkaarten iets afwijken van eerdere studies. Het grootschalige volumeverloop zal hierdoor niet drastisch veranderen, maar in detail zal dit wel kleine verschillen opleveren.



Kaart	Gebruikte bodemdata		Gebruikte bodemdata
1964	1964 + 1969	1984	1984 + 1985 + 1986
1970	1969 + 1972	1986	1986 + 1987 + 1989
1972	1972 + 1970 + 1969	1989	1989 + 1990
1974	1974 + 1975 + 1976	1990	1990 + 1989
1976	1976 + 1975 + 1978	1992	1992 + 1993
1978	1978 + 1979 + 1980	1994	1994 + 1995 + 1993
1980	1980	1996	1996 + 1995 + 1997
1982	1982 + 1981 + 1980	1997	1997

Figuur 2-2: Overzicht van de samengestelde bodemkaarten voor de periode 1964-1997.



Kaart	Gebruikte bodemdata		Gebruikte bodemdata
1998	1998 + 1999 + 2000	2014	2014
2000	2000 + 1999 + 2001	2015	2015 + lineaire interpolatie 2014-2017
2001	2001 + 2000	2016	2016 + lineaire interpolatie 2014-2017
2002	2002 + 2001	2017	2017
2004	2004 + 2003 + 2005	2018	2018 + lineaire interpolatie 2017-2020
2005	2005	2019	2019 + lineaire interpolatie 2017-2020
2008	2008	2020	2020
2011	2011	2021	2021

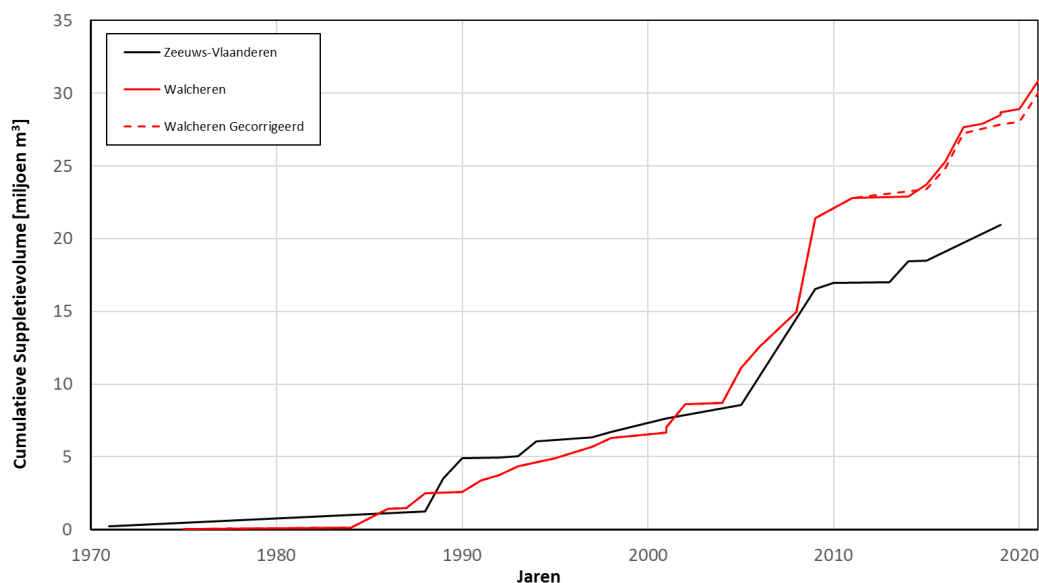
Figuur 2-3: Overzicht van de samengestelde bodemkaarten voor de periode 1998-2021.

## 2.3 Ingrepen (baggeren, storten en suppleties) in het Nederlandse deel van de monding.

### 2.3.1 Zandsuppleties

Langs de eilandkusten van het Nederlandse deel van de monding zijn in het verleden vele zandsuppleties uitgevoerd. Bij Walcheren zijn er vanaf de Westkappelse Zeewering tot Vlissingen in totaal 45 suppleties uitgevoerd met een totaal volume van 31,7 miljoen m<sup>3</sup>. Een klein deel van het suppletiezand (0,86 miljoen m<sup>3</sup>) is afkomstig uit de Sardijngeul en draagt dan ook niet bij aan een volumeverandering in het sedimentbudget (zie lijn Walcheren gecorrigeerd in Figuur 2-4). In totaal is er 30,8 miljoen m<sup>3</sup> aan zand toegevoegd door de suppleties. Het suppletievolume ligt in de periode tot 2001 relatief laag. Tussen 1975 en 1990 is er gemiddeld 0,17 miljoen m<sup>3</sup>/jaar gesuppleerd. Het suppletievolume neemt daarna toe. Tussen 1990 en 2001 ligt het gemiddeld op 0,41 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Vanaf 2001 neemt het volume dan nog verder toe tot 2,05 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in de periode 2002-2009. Vanaf 2011 ligt het gemiddeld dan met 0,94 miljoen m<sup>3</sup>/jaar weer lager.

Het suppletievolume in Zeeuws-Vlaanderen bedraagt 20,9 miljoen m<sup>3</sup>. Gemiddeld is dit 0,42 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Dit gemiddelde geeft een iets vertekend beeld, omdat met name in de periode 2005-2009 er grote suppleties zijn uitgevoerd (als onderdeel van de Zwakke Schakel versterkingen). In de periode 1970-1990 lag het gemiddelde suppletievolume op 0,23 miljoen m<sup>3</sup>/jaar en tussen 1992 en 2001 bedraagt dit 0,31 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Het volume neemt toe tot een maximum van 2,2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar tussen 2005 en 2009. In de periode 2010-2020 ligt het gemiddelde met 0,47 miljoen m<sup>3</sup>/jaar dan weer een stuk lager.



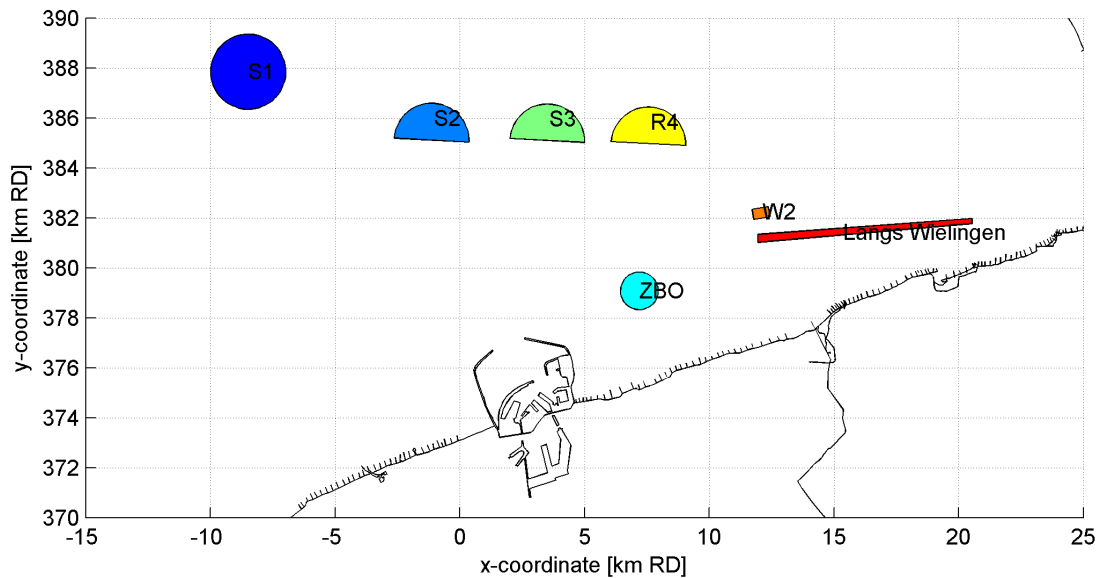
Figuur 2-4: Cumulatieve suppletievolumes langs de kust van Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen sinds 1970.

### 2.3.2 Baggerwerkzaamheden in de Wielingen

Er is slechts beperkte informatie beschikbaar over baggerwerkzaamheden in het Nederlandse deel van de Wielingen. Het is niet duidelijk of er voor 2000 en na 2003 onderhoudsbaggerwerkzaamheden of verdiepingen zijn uitgevoerd.

Uit de beschikbare literatuur kan wel worden geconcludeerd dat er in 2000-2001 in het kader van de verdieping 2,1 miljoen m<sup>3</sup> gebaggerd in de Wielingen en afgevoerd naar de stortzones in het Belgische deel van de monding. Aanvullend is er in 2001 nog 2,1 miljoen m<sup>3</sup> gebaggerd

en gestort langs de geulrand (in locaties SV02 – SV26 – zie locatie “Langs Wielingen” in Figuur 2-5). Aangezien deze stortlocatie naast de Wielingen ligt geeft dit geen verandering in de volumebalans. In 2003 is er in het kader van het onderhoud 1,0 miljoen m<sup>3</sup> gebaggerd en naar locatie W2 afgevoerd. Ook dit vak ligt nog binnen het balansgebied waardoor dit voor de volumebalans geen rol speelt. In 2013 zijn nog beperkte baggerwerken uitgevoerd (0,15 miljoen m<sup>3</sup>) dit materiaal is ook naar W2 afgevoerd.



Figuur 2-5: Locaties van de verschillende stortzones in de monding.

### 2.3.3 Baggerwerkzaamheden in de Sardijngeul.

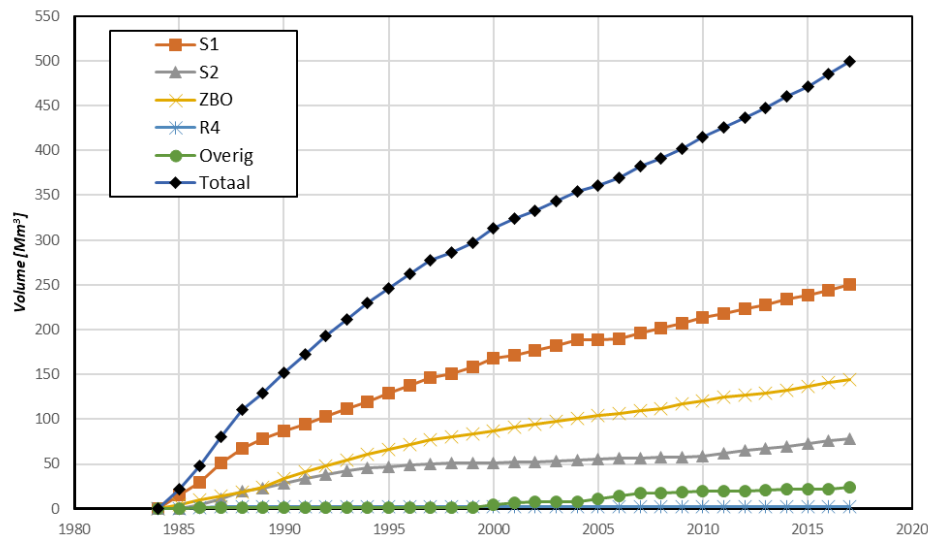
In de Sardijngeul vinden met regelmaat onderhoudsbaggerwerkzaamheden plaats (Van der Werf et al. 2011). Het gebaggerde sediment wordt lokaal teruggeplaatst. Hierdoor heeft dit geen significant effect op de sedimentbalans. De suppletievolumes zijn gecorrigeerd om dubbeltelling te voorkomen.

Zandwinning in het Nederlandse deel van de monding heeft niet plaatsgevonden.

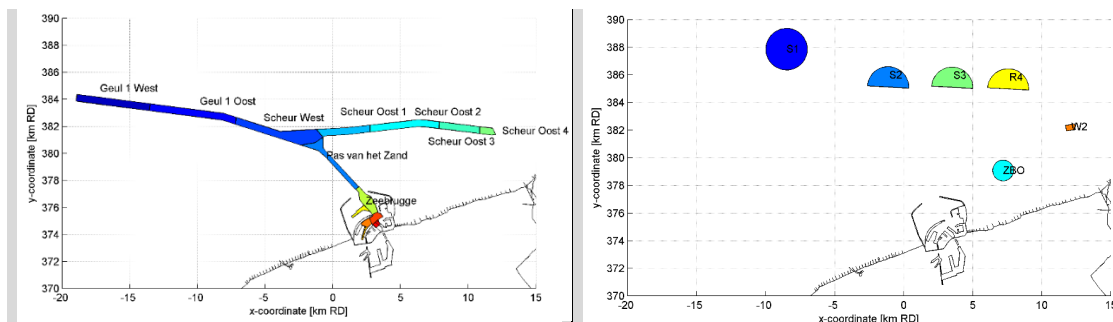
## 2.4 Ingrepen in het Belgische deel van de monding (een eerste inventarisatie)

Een schatting van de bagger- en stortvolumes in het Belgische deel van de monding is gebaseerd op Vroom (2015) voor de periode 1984-2007 en op Lauwaert et al. (2019) voor de periode 2007-2018. De tijdseries van de jaarlijkse volumes vertonen een groot stortvolume tot 1995 (gemiddeld 22 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) en een kleiner volume sindsdien (gemiddeld 12 miljoen m<sup>3</sup>/jaar). Over de gehele periode ligt het gemiddelde bagger- en stortvolume op 15 miljoen m<sup>3</sup>.

Het merendeel van de baggeractiviteiten vindt plaats in de haven van Zeebrugge, de toegangsheul (Pas van het Zand) en in de Scheur. Storten vindt plaats in een vijftal stortgebieden. Het merendeel van het materiaal wordt gestort in gebied S1 (50%), kleinere storthoeveelheden zijn geplaatst in ZBO (29%), S2 (16%) en alle overige gebieden (5%).



Figuur 2-6: Overzicht van de stortvolumes in de Westerscheldemonding onderverdeeld in de belangrijkste stortvlakken.



Figuur 2-7: Locaties van baggerzones (links) en stortzones (rechts) Vroom (2015).

Santermans (2013) laat zien dat er een grote variatie in sedimentsamenstelling in de Wielingen kan optreden. Het percentage slib varieert over het algemeen tussen de 10 en 50% in het meest zeewaarts gelegen meetpunt (zo ter hoogte van het Zwin). Bij de rede van Vlissingen liggen de slibpercentages veel lager (1-5%). De slibpercentages in de haven van Zeebrugge en in de toegangsgedul liggen echter veel hoger. In Tabel 2-1 worden deze waarden samengevat.

Tabel 2-1: Slibpercentage voor de verschillende baggerlocaties (Vroom & Schrijvershof, 2015).

Slibpercentage (% < 63 $\mu\text{m}$ )	%
Zeebrugge	
CDNB	66 (1990) / 94 (2000)
Voorhaven	60
Pas van het Zand	66
Scheur West	49
Scheur Oost	18
Wielingen	5



## 3 Actualisatie sedimentbalans Westerschelde estuarium en monding

### 3.1 Inleiding

In het verleden zijn er verschillende studies uitgevoerd, waarin de sedimentbalans van de monding is opgelost. Hoofdstuk 3.2 geeft een overzicht van de studies van Elias et al. (2016) en Elias en Van der Spek (2015) en de studie uitgevoerd door Nederbragt en Liek (2004). Het estuarium is recentelijk uitvoerig geanalyseerd en gerapporteerd in Elias et al. (2023). De belangrijkste inzichten uit deze studie zijn samengevat in H.3.2.3. In Hoofdstuk 3.3, 3.4 en 3.5 worden resultaten van een nieuwe volumeberekening en sedimentbalansmodel van het Nederlandse deel van de monding gepresenteerd.

### 3.2 Bestaande studies

#### 3.2.1 Elias et al. (2016) en Elias en van der Spek (2015).

De meest recente schatting van de sedimentbalans van de monding is gemaakt door Elias et al. (2016). In deze studie is het sedimentverlies van het Nederlandse deel van de monding geschat op 0,8 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (1965-2010). In deze studie werd verder geconcludeerd dat structurele erosie aanwezig is op de Vlakte van de Raan (0,7 miljoen m<sup>3</sup>/jaar sinds 1984). Het verlies over een langere periode is lager dan de meer recente verliezen. Dit komt doordat er een duidelijk piek in de volumeontwikkeling te onderscheiden is (zie als voorbeeld Figuur 3-1). Kijken we naar de periode 1980-2010 dan ligt het verlies in het Nederlandse deel van de monding op 1,2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar en over de periode 1990-2010 ligt dit verlies zelfs op 1,6 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (Elias et al. 2016, pag. 20, Tabel 2).

Een schatting van het verlies van de totale monding is gegeven in Elias & Van der Spek (2015). In totaal vindt er 211 miljoen m<sup>3</sup> verlies plaats tussen 1970 en 2011. Deze verliezen worden gedomineerd door het gebied rond Zeebrugge (bijna -50 miljoen m<sup>3</sup>). De verlenging van de havendammen tot 4-km lengte (1972-1986) heeft geresulteerd in ontgroning en verdieping rond de havendammen en ook de toegangsheuvel is gebaggerd. Baggeren heeft ook plaatsgevonden in de Wielingen, waarna dit sediment werd neergelegd in stortzones langs de heuvel. De grootste verandering trad op tussen 1979 en 2000 (meer dan 3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar erosie), maar sindsdien zijn de erosiesnelheden afgenomen tot (< 1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar).

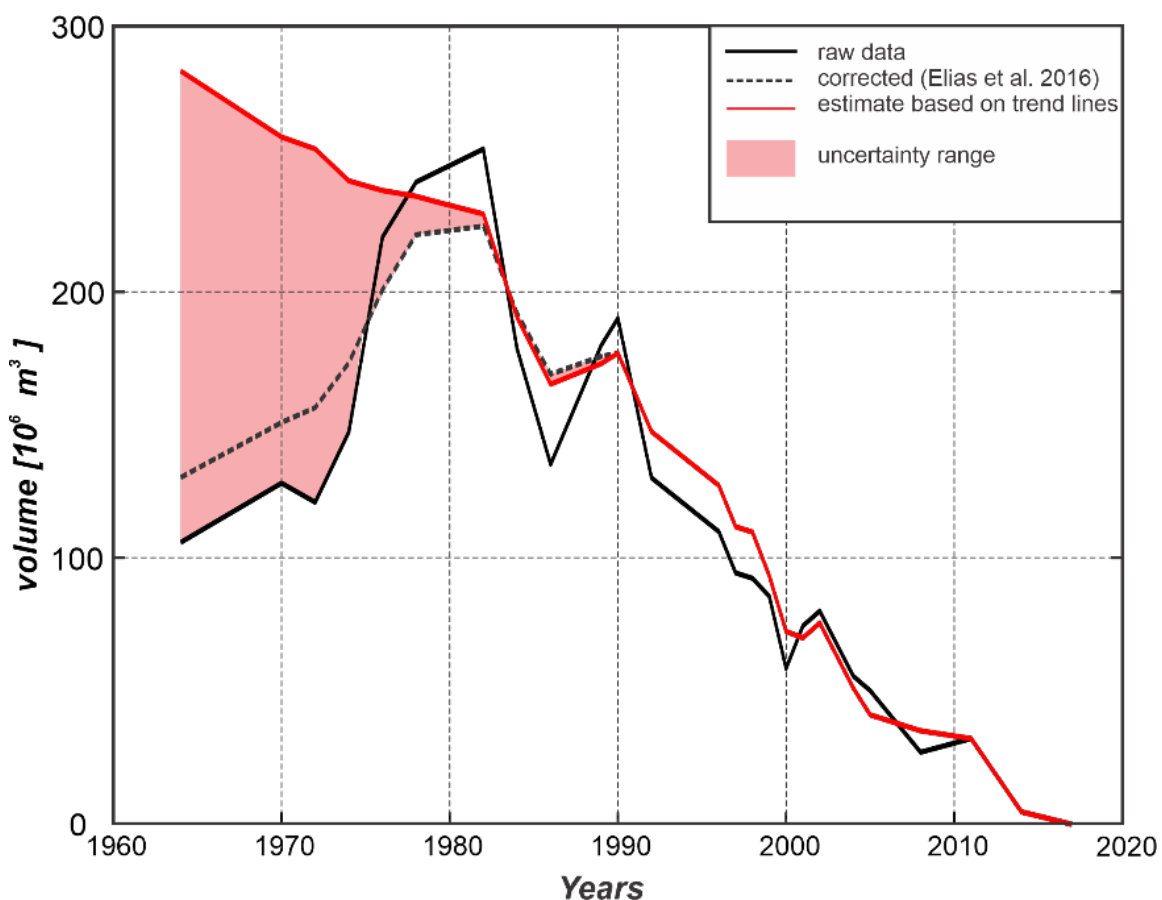
De grootste morfologische veranderingen doen zich voor langs de zuidwestkust van Walcheren waar geulen en banken verplaatsen. Bankverplaatsing geeft wel grote bruto verandering in morfologie, maar weinig netto verandering in sedimentvolume. Een relatief kleine structurele erosie is wel aanwezig in het Oostgat doordat deze heuvel dieper wordt en erosie van de kustlijn veroorzaakt. Deze erosie wordt tegengegaan door (grootschalige) suppleties. Alleen al in de periode 2009-2010 werd 7,1 miljoen m<sup>3</sup> gesuppleerd door het aanbrengen van o.a. een grote heuvelsuppletie. Het totale suppletievolume tussen 1967 en 2011 bedraagt 17 miljoen m<sup>3</sup>. Grote zandverliezen treden ook op langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen. Hier is in totaal 15,3 miljoen m<sup>3</sup> aan zand gesuppleerd sinds 1971.

De tijdseries van volumeontwikkeling van de gehele monding (zwarte lijn in Figuur 3-1) worden gekenmerkt door een initieel sterke toename van de volumes, bijna 150 miljoen m<sup>3</sup>, tussen 1964 en 1984 en een afname vanaf 1984 tot heden. Zoals eerder al geconcludeerd geeft dit gemiddeld over de gehele periode een veel lagere erosiesnelheid dan een gemiddelde over een recente periode. Het is echter de vraag of deze piek wel echt opgetreden is of dat dit een resultaat is van meetonnauwkeurigheden. Elias et al. (2016)

concluderen op basis van de sedimentatie-erosie patronen dat er duidelijk onrealistische bodemveranderingen optreden. Het corrigeren van deze onnauwkeurigheden is echter geen makkelijke taak. De grootste onnauwkeurigheden zijn echter zichtbaar in de oude kaarten (voor 1980). Nemen we deze oude kaarten niet mee in de analyse, maar gebruiken we een voortzetting van de trendlijnen dan wordt een schatting van de bandbreedte van de volumeveranderingen verkregen (zie rode gebied in Figuur 3-1). Op basis van deze aanpak zouden veel hogere volumeverliezen over de gehele periode worden verkregen.

Als belangrijkste boodschap kan worden meegegeven:

- (1) Er is onzekerheid in de lange-termijn trends, en
- (2) De huidige trend (sinds 1980) vertoont een duidelijk erosief verloop met een jaargemiddelde waarde van  $\sim 6$  miljoen  $m^3$ /jaar.



Figuur 3-1: Overzicht van de berekende volumeverandering in de monding van de Westerschelde tussen 1964 en 2017. De zwarte lijn geeft hierbij de ongecorrigeerde resultaten en de rode lijn die van de gecorrigeerde ontwikkeling. Het rode gebied geeft dan de onzekerheid in de volumebalans weer (uit Elias et al. 2023).

### 3.2.2 Nederbragt en Liek (2004)

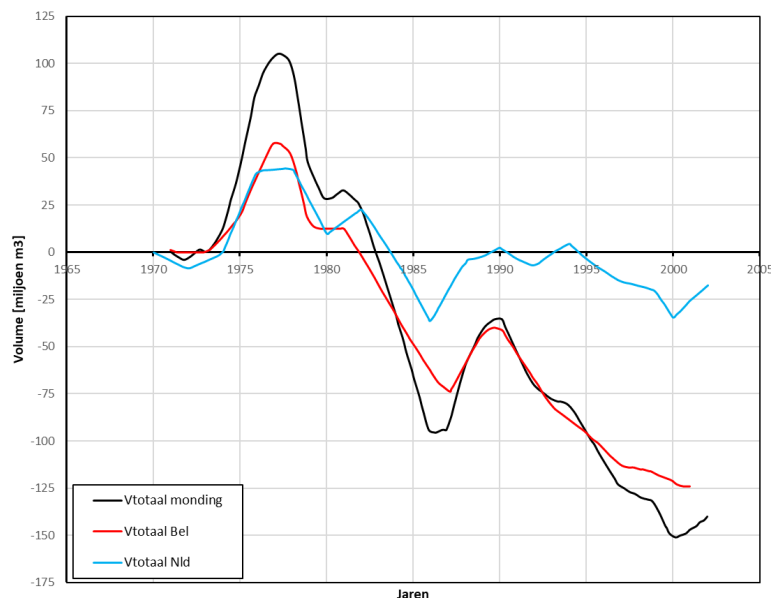
Een complete balans van de Westerschelde en het Nederlandse deel van de monding wordt gepresenteerd in Nederbragt en Liek (2004). Deze studie laat zien dat in de periode 1971 tot en met 2001 ruwweg 100 miljoen  $m^3$  sediment is verloren uit het Nederlandse deel (Figuur 3-2). Het merendeel van het verlies treedt op in de Westerschelde (75 miljoen  $m^3$ ) en een kleiner deel (25 miljoen  $m^3$ ) in de monding. Het zandverlies is vrijwel gelijk aan de zandwinning.

Invulling van een sedimentbudget (Figuur 3-3) geeft een gemiddelde import in de monding van 2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in de periode 1971 tot en met 1989. Na 1990 slaat het systeem om van importerend naar exporterend. De export varieert tussen de 1,9 en 5,7 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. De uitwisseling tussen Monding en Westerschelde laat een soortgelijke omslag zien. Tussen 1971 en 1989 treedt er gemiddeld 1,8 miljoen m<sup>3</sup> import op, terwijl er in de periode 1990-2001 er een export van 1,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar optreedt. Let op dat in deze balans de uitwisseling met de Schelde en Saeftinghe 0 bedraagt. Voor de vergelijking met Hoofdstuk 3.2.3 zou hier ongeveer 1 miljoen m<sup>3</sup> bij opgeteld moeten worden, omdat....

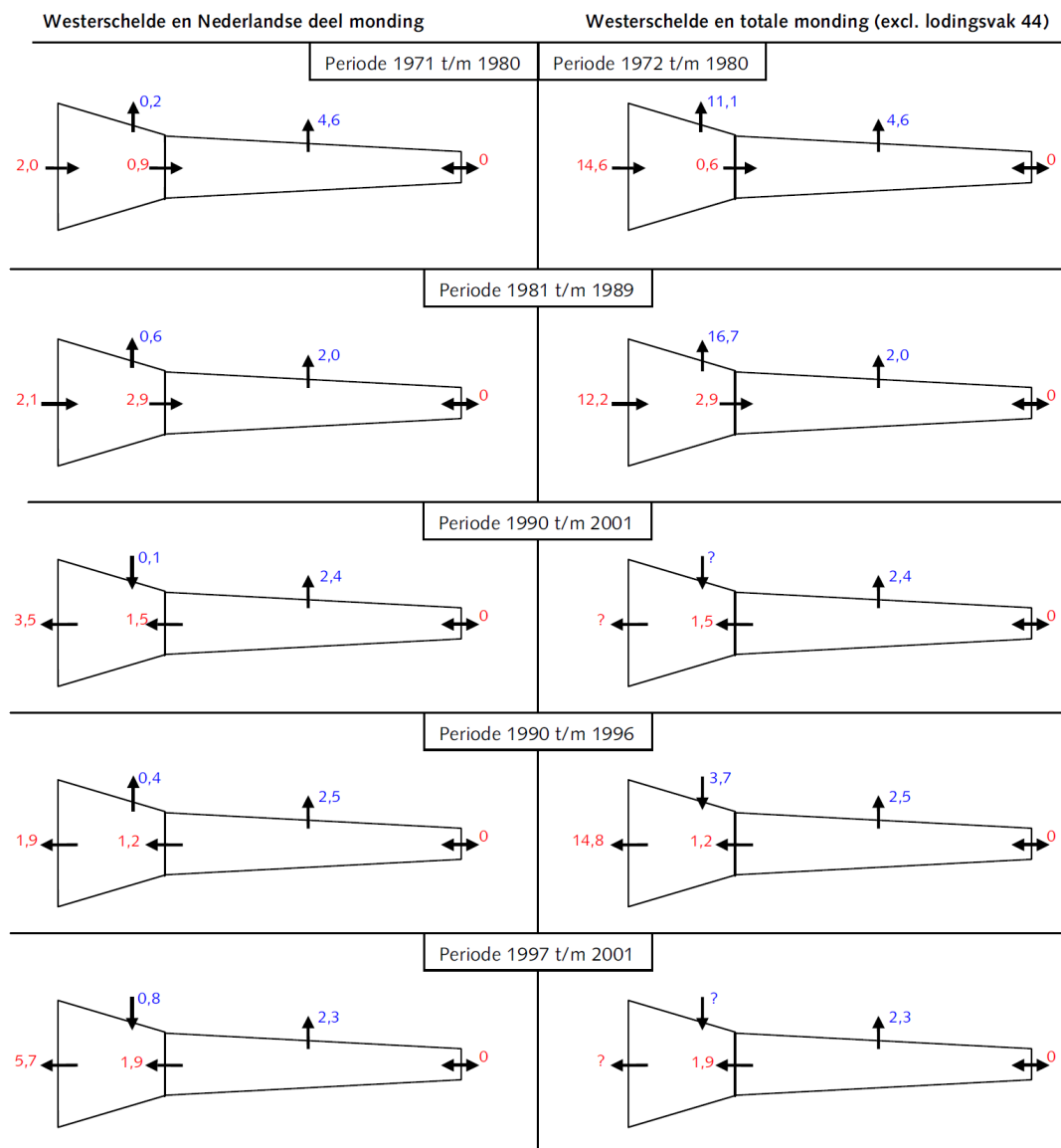
Het meenemen van het Belgische deel van de monding resulteert in een grote verandering van de berekende transporten in de monding. Tussen 1971 en 2001 vindt er 145 miljoen m<sup>3</sup> erosie plaats in de monding, waarvan het merendeel (120 miljoen m<sup>3</sup>) in het Belgische deel. Nederbragt en Liek merken op dat:

- de netto onttrekking in de monding het gevolg is van het ontbreken van stortvak S1 in de volumebalans.
- Kwantitatief hangen de uitspraken over import of export de monding dan ook sterk af van het wel of niet meenemen van lodingsvak 44. Indien stortvak S1 geheel of gedeeltelijk wordt toebedeeld aan het lodingsvak, laat de volumeontwikkeling in het Belgische deel van de monding een dalende lijn zien en wordt dus erosie geconstateerd. Deze erosie is wel van een andere orde dan die van het Nederlandse deel van de monding. Voor het Belgische deel van de monding zonder lodingsvak 44 is namelijk pas vanaf 1990 structurele erosie te zien, daarvoor vindt sedimentatie plaats.

De gemiddelde import tussen 1972 en 1989 wordt berekend op 13,4 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. In de periode 1990-1996 treedt ook hier een omslag op met een verlies van 14,8 miljoen m<sup>3</sup>. De periode na 1997 kan niet worden berekend door missende bagger- en stortgegevens.



Figuur 3-2: Volumeontwikkeling van de monding (zwarte lijn) onderverdeeld in Nederlandse deel (blauw) en Belgische deel (rood) gebaseerd op Nederbragt en Liek (pagina 4 – figuur 4.5).



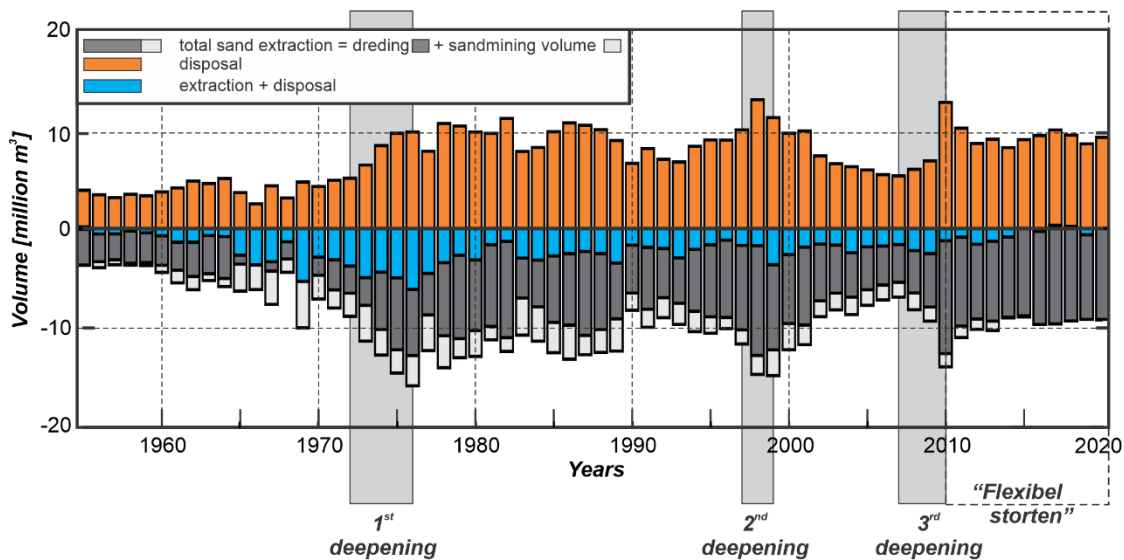
Figuur 3-3: Zandbalans (in miljoen m<sup>3</sup>/jaar) voor de Westerschelde en het Nederlandse deel van de monding (links) en de Westerschelde en totale monding (rechts) met een interval van ongeveer 10 jaar. Getallen die niet ingevuld konden worden door het ontbreken van de gegevens zijn weergegeven met een ?.

### 3.2.3 Een samenvatting van inzichten m.b.t het estuarium (Elias et al., 2023)

Een schatting van de uitwisseling tussen de monding en het estuarium kan worden verkregen door een sedimentboxmodel van de Westerschelde op te stellen (zie Elias et al. 2023 voor details). Dit sedimentboxmodel is in principe een opsomming van alle winst- en verliesposten, (baggeren, storten, zandwinning), de gemeten bodemhoogteverandering en de uitwisseling naar andere gebieden (Saefthinge en Schelde).

Gedetailleerde bodemmetingen ter bepaling van de verandering in sedimentvolume zijn beschikbaar sinds 1955. Tot 1996 zijn de metingen over het algemeen 2-jaarlijks opgenomen en vanaf 1996 wordt het estuarium jaarlijks opgenomen. Op basis van deze bodemkaarten kan een gedetailleerd beeld van de sedimentvolumeverandering worden verkregen (zwarte lijn in Figuur 3-5, bovenste deelfiguur). Naast de bodemhoogteverandering spelen ook menselijke ingrepen een belangrijke rol. In de Westerschelde zijn 3 grote verdiepingen uitgevoerd: tussen 1973-1976 (ongeveer 57,5 miljoen m<sup>3</sup> baggerwerk), 1997-1998 (17 miljoen

m<sup>3</sup>) en in 2010 (7,7 miljoen m<sup>3</sup>). De hoofdgeul is hierbij in diepte toegenomen tot NAP -17,2 m. Als gevolg van deze verdiepingen is het onderhoudsbaggerwerk sterk toegenomen van zo'n 0,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in 1950 tot 7-10 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in de huidige situatie. Het gebaggerde sediment wordt terug in de Westerschelde verspreid. Naast baggeren en storten heeft ook zandwinning een rol gespeeld. Tussen 1956 en 2014 is er 119 miljoen m<sup>3</sup> aan zand onttrokken (Figuur 3-4).



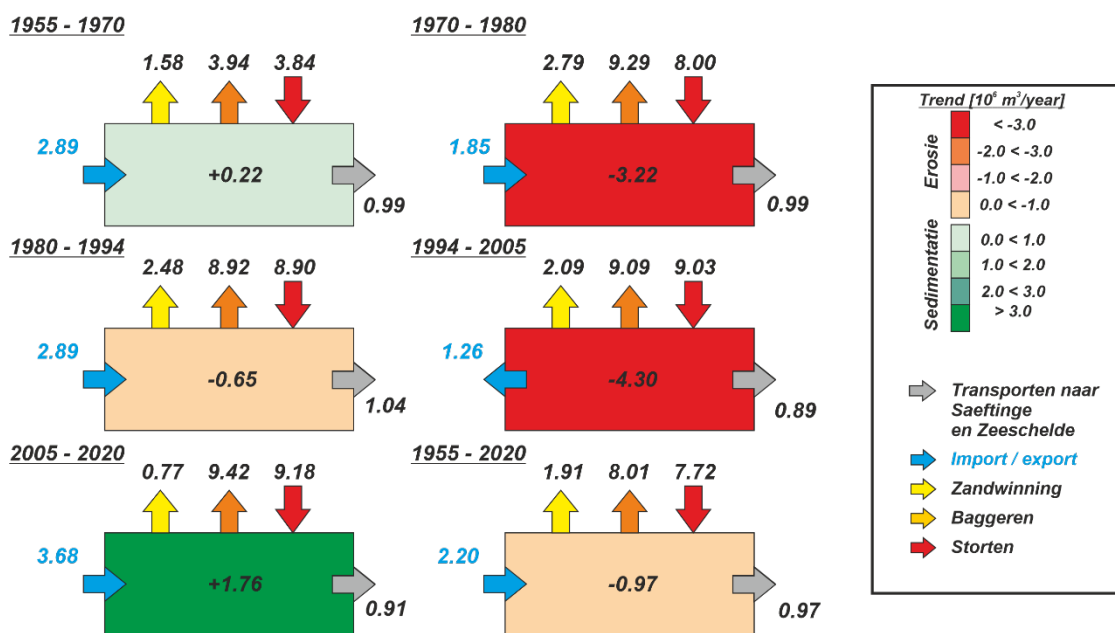
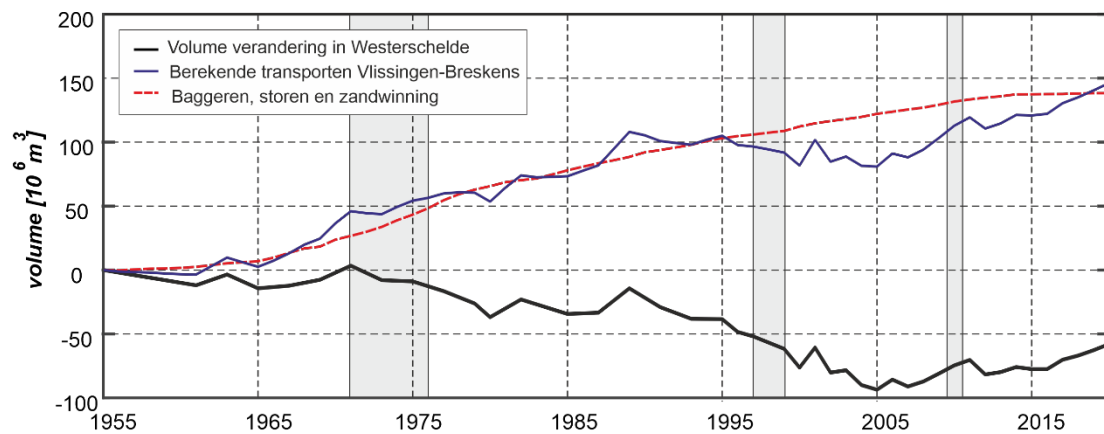
Figuur 3-4: Overzicht van de bagger en stortvolumes en zandwinning uitgevoerd in de Westerschelde over de periode 1955 - 2020. Gedurende deze periode zijn ook 3 verdiepingen uitgevoerd.

Voor het invullen van het simpele box model (zie onderste deelfiguren in Figuur 3-5) zijn naast deze winst- en verliesposten ook de uitwisselingen met de Schelde en het Verdrongen land van Saefthinge belangrijk. In eerdere studies, zoals Haecon (2006), wordt een sediment transport van 0,30 miljoen m<sup>3</sup> richting het Land van Saefthinge gehanteerd. De schattingen voor de uitwisseling met de Zeeschelde vertonen een wat grotere spreiding. De meest recente studies van Vandenbruwaene et al. (2017), Planke et al. (2021) en Vos et al. (2021) geven schattingen van de zand-slib uitwisseling over de periode 2016-2021.

Vandenbruwaene et al. (2017) concludeert op basis van een uitgebreide sedimentbalansstudie van de Schelde dat er over de periode 2001-2011 een gemiddeld westelijk transport van slib optreedt met een waarde van 0,25 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Zand transport is oostelijk gericht met een waarde van 0.61 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Planke et al. (2021) en Vos et al. (2021) geven een oostelijk zandtransport van 1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in de periode 2011-2016, dit reduceert tot ongeveer de helft (0,48 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) tussen 2016 en 2019. De slibtransporten (0.16 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) zijn westelijk gericht tussen 2011 en 2016 en oostelijk gericht (0.16 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) in de periode 2016-2019.

Deze waarden worden gebruikt voor invulling van het box model en de berekening van sedimenttransporten over de lijn Vlissingen-Breskens (Figuur 3-5, onderste deelfiguren).

Over de gehele periode (1955-2020) resulteert invulling van alle waarden in een netto sediment import van 2,2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Op basis van de sedimentvolume verandering van het bekken zijn er verschillende perioden met meer en minder sedimentimport en zelfs een periode met sedimentexport te onderscheiden. In de periode vóór de eerste verdieping, tussen 1955 en 1970, wordt een import van 2,9 miljoen m<sup>3</sup>/jaar berekend. Een klein deel van deze import resulteert in een toename van de bodemhoogte (10%). Ruwweg 1/3 van deze import is gerelateerd aan de verliezen naar Schelde en Saefthinge. Het grootste deel (1,6 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) is echter gerelateerd aan de zandwinning.



Figuur 3-5: Overzicht van de sedimentbalans van het Westerschelde estuarium. Boven: Tijdseries van sedimentvolumeontwikkeling in het estuarium (zwarte lijn) en de transporten het estuarium in over de lijn Vlissingen-Breskens (blauwe lijn) en de transporten het estuarium uit (rode lijn). Onder: overzicht van het 1-box sedimentmodel over geselecteerde perioden (1955-1970, 1970-1980., 1980-1994, 1994-2005, 2005-2020 en 1955-2020). Blauwe pijlen zijn de berekende sedimenttransporten over de lijn Vlissingen-Breskens.

Tussen 1970 en 1980 neemt de diepte van het estuarium sterk toe (1<sup>e</sup> verdieping). Gemiddeld neemt het estuarium met 3,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in sedimentvolume af in deze periode. Dit verlies wordt veroorzaakt door de sterk toegenomen zandwinningsvolumes (2,79 miljoen m<sup>3</sup>/jaar). Daarnaast wordt er in deze periode 9,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar gebaggerd en 8,0 miljoen m<sup>3</sup>/jaar teruggestort. Dit geeft ook een verlies van meer dan 1,0 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. De grote herverdeling van sediment leidt ook tot een tijdelijke afname van de sediment import tot 1,9 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Na deze verdieping nemen de sedimentimporten in de periode 1980-1994 weer toe tot 2,9 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Dit is vrijwel gelijk aan de transporten voor de verdieping. Doordat de zandwinning in deze periode veel hoger is (2,48 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) neemt de diepte van het estuarium toe. Naast zandwinning vindt er door baggeren en storten een herverdeling van sediment plaats (8,9 miljoen m<sup>3</sup>/jaar).

De periode 1994-2005 vertoont afwijkend gedrag. In deze periode treedt er juist een netto export op van 1,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Op basis van een gedetailleerde zandbalans op macrocel-

niveau (Elias et al. 2023) kan worden geconcludeerd dat deze export is gerelateerd aan de sterke verdieping van de hoofdgeul, waardoor er veel zand vrijkomt. Doordat een groot deel van het gebaggerde sediment in het westelijk deel van het estuarium gestort wordt, ontstaat er een surplus aan sediment dat eigenlijk alleen zeewaarts kan worden afgevoerd. In de periode 2005-2020 ontstaat juist het tegenovergestelde beeld. Het bekken vertoont een grote aanzanding (+1,8 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) en daardoor ook een grote netto import. In deze periode verandert de stortstrategie. Er wordt nu meer op de platen in het oostelijk deel van de Westerschelde verspreid. Dit sediment draagt hierbij aan bankvorming en een verhoging van de bodemhoogte. Hierdoor is dit sediment verder niet beschikbaar voor herverdeling in het systeem. Er moet nu een grote sediment import in het westelijk deel plaatsvinden om de balans sluitend te krijgen.

### 3.2.4 Een vergelijking tussen de verschillende studies

#### *Import en export van het estuarium*

Uit beide studies blijkt dat het Westerschelde estuarium over de lange termijn importerend is. Wel wisselen perioden met import en export elkaar af. Tot ongeveer 1990 is er een duidelijke import te onderscheiden. Zonder de verliezen naar de Schelde en Land van Saefthinge geven beide studies een vergelijkbare schatting van deze importen: 1,74 miljoen m<sup>3</sup>/jaar door Nederbragt en Liek en 1,9 miljoen m<sup>3</sup>/jaar door Elias et al. (2023).

Vanaf 1990 vindt een periode van export plaats. Nederbragt en Liek schatten deze export op gemiddeld 1,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar over de periode 1990-2001. De langere tijdseries in de studie van Elias geven weer dat er een tijdelijke periode van export optreedt tot 2005, daarna is er weer een sterk importerend systeem zichtbaar. Elias berekent een export in de monding over de periode 1994-2005 van 1,2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar en een verlies naar de Schelde van 0,9 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Het totale verlies ligt daarmee iets hoger dan berekend door Nederbragt en Liek. De conclusies van beide rapporten zijn wat betreft het estuarium en de richtingen van het transport wel vergelijkbaar.

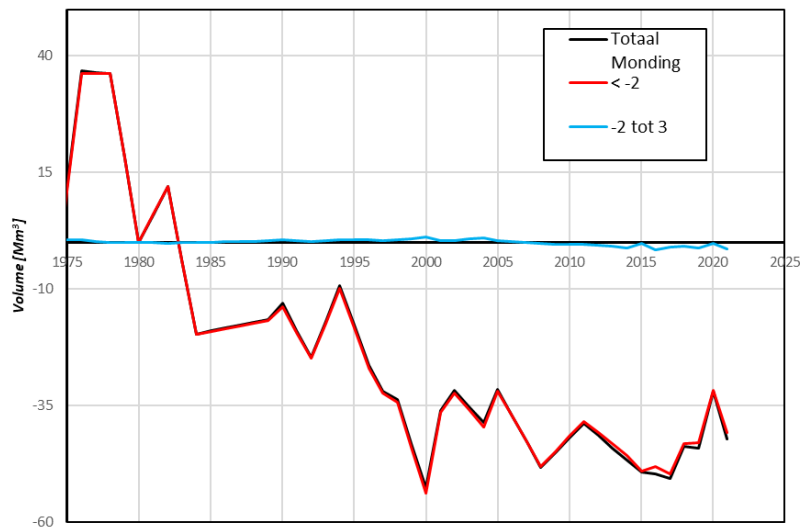
#### *Transporten in de monding*

Elias en Van der Spek (2016) geven als schatting van de verliezen in het Nederlandse deel van de monding een verlies van 0,8 miljoen m<sup>3</sup>/jaar tussen 1965-2010. Dit verlies is groter over de recente periode, namelijk 1,2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (1980-2020) en 1,6 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (1990-2010). Deze verliezen zijn in lijn met Nederbragt en Liek. Zij geven als schatting voor de periode 1970-2001 een verlies van 1,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (op basis van de trendlijn).

## 3.3 Een her-analyse van de sedimentvolumeverandering van het Nederlandse deel van de monding

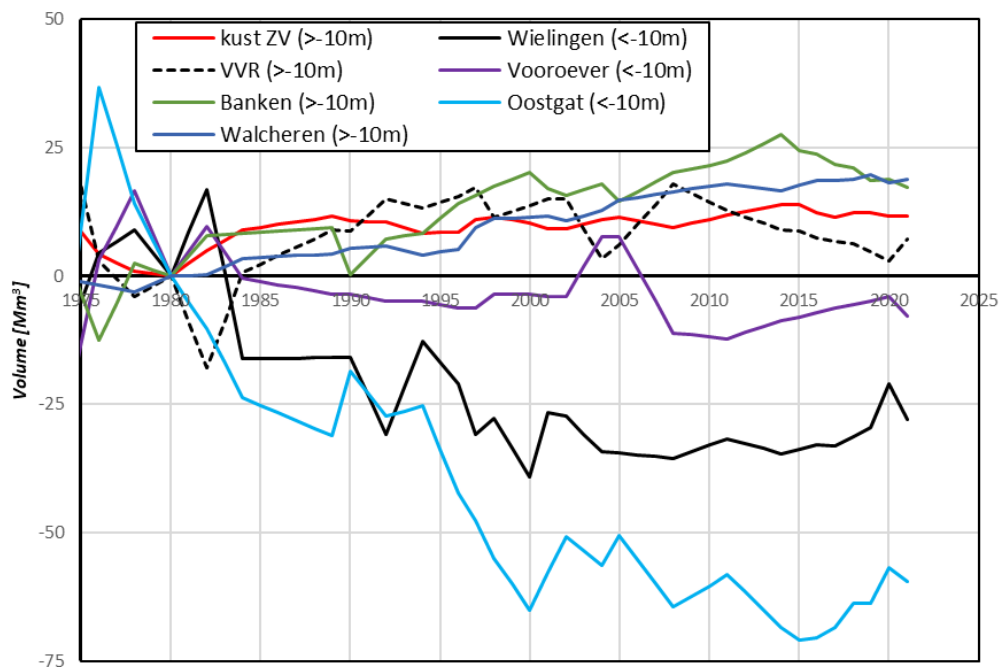
De bodemkaarten zoals getoond in Hoofdstuk 2.2 zijn gebruikt om de volumeveranderingen in het Nederlandse deel van de monding opnieuw te berekenen. Deze berekening gebruikt de data voor Zeeuwse Kaartbladen 11, 12, 17, 18 en 19 (Figuur 2-1).

De volumes zijn berekend voor de totale Nederlandse monding en er is onderscheid gemaakt in het natte deel (dieper dan NAP -2 m) en het intergetijde deel (NAP -2 tot +3m). Zo'n onderscheid is logisch in het estuarium, maar in de monding is dit eigenlijk niet nodig, omdat daar nauwelijks intergetijdengebieden zijn. Het totale volumeverlies tussen 1980 en 2021 bedraagt 42 miljoen m<sup>3</sup>. Het maximale verlies van 50 miljoen m<sup>3</sup> trad op in 2017. Sindsdien lijken de volumes iets toe te nemen. Op basis van de trendline over de periode 1980-2021 bedraagt het verlies -1,1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Dit verlies is groter tussen 1980 en 1997 (-1,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) en kleiner sindsdien (-0,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar).



Figuur 3-6: Sedimentvolume in het Nederlandse deel van de monding relatief t.o.v. het 1980 volume.

De volumeverliezen kunnen ook per morfologische eenheid worden weergegeven. Deze morfologische eenheden zijn gedefinieerd in Figuur 3-9. De tijdseries geven weer dat de grootste netto verliezen optreden in de geulen Oostgat en Wielingen. De kustzones (Zeeuws-Vlaanderen en Walcheren) nemen in volume toe. Ook het bankengebied (Elleboog, Bankje van Zoutelande) neemt in volume toe.

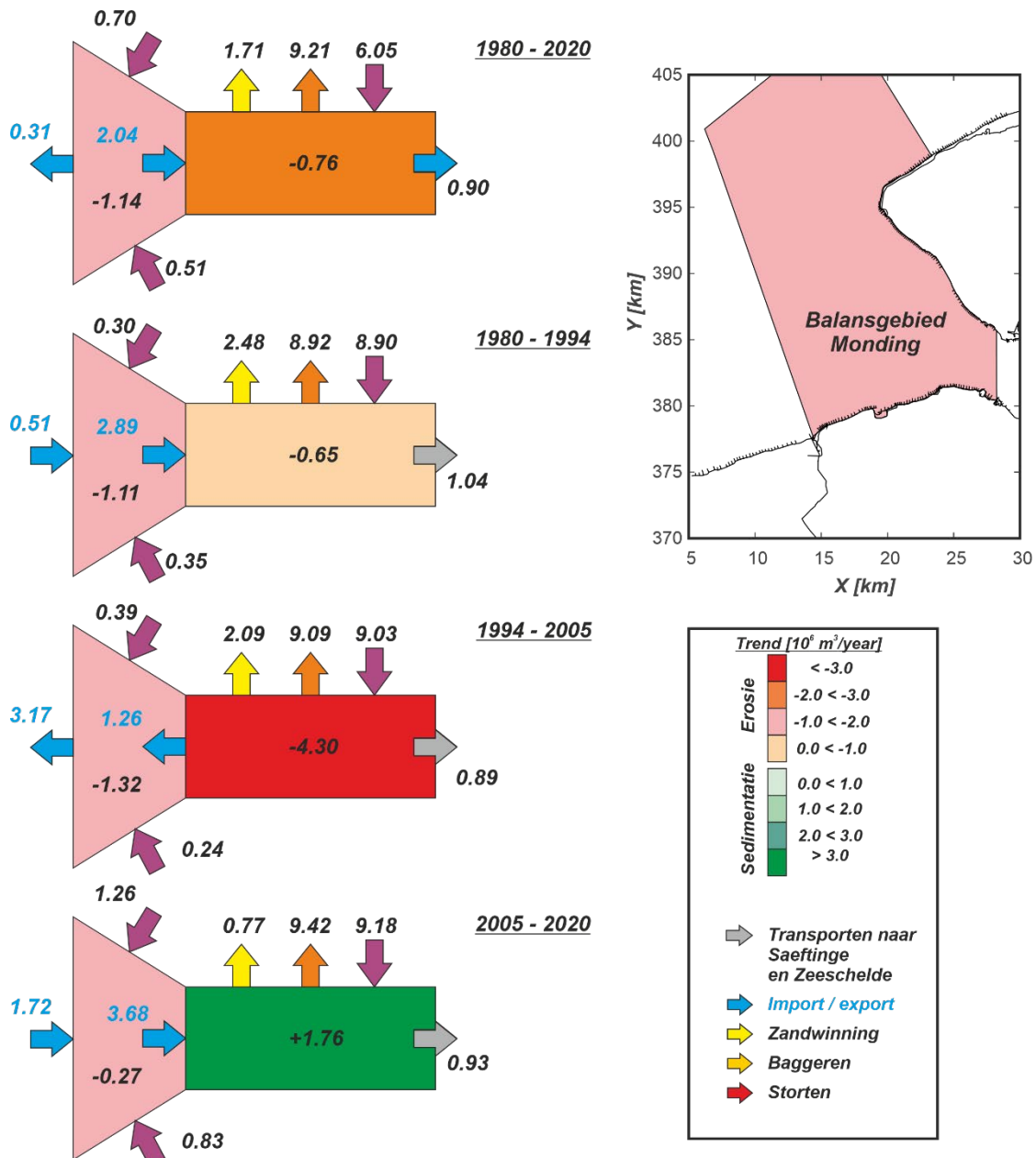


Figuur 3-7: Sedimentvolumes van de verschillende morfologische eenheden in het Nederlandse deel van de monding relatief t.o.v. het 1980 volume.



### 3.4 Een 2-box model van monding en estuarium (2-box model)

De volumetijdseries vormen de basis voor de invulling van een 2-box sedimentmodel van de monding en het estuarium. Dit 2-boxmodel beschouwt het Nederlandse deel van de monding (zeewaarts van de lijn Vlissingen-Breskens) als 1 element en het estuarium (landwaarts van de lijn Vlissingen-Breskens) als 2<sup>de</sup> element (Figuur 3-8).



Figuur 3-8: Overzicht van het 2-boxen model van het Nederlandse deel van de monding en het estuarium over de periode 1980-2020 en de perioden 1980-1994, 1994-2005, 2005-2020.

Het boxmodel kan vervolgens worden opgelost over de totale periode 1980-2020. Daarnaast worden de voor het estuarium gedefinieerde perioden 1980-1994, 1994-2005 en 2005-2020 beschouwd. De uitgevoerde suppleties worden hierbij volledig toegekend aan de monding. Verliezen van suppletiezand naar de duinen worden hierbij niet meegenomen.

Over de gehele periode (1980-2020) vindt er een import van 2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar sediment plaats het estuarium in. Erosie van het Nederlandse deel van de monding bedraagt 1,1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Daarnaast wordt er voor 1,2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar gestort langs de aangrenzende kusten. Het totale sediment aanbod (erosievolume + de zandsuppleties) is dus 2,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar, wat betekent dat er nog aanvullend een klein transport van 0,3 m<sup>3</sup>/jaar uit de monding heeft plaatsgevonden. Dit netto zeewaarts transport geeft geen goede afspiegeling van het gedrag van de monding en is vooral het resultaat van de periode 1994-2005. In deze periode vindt er zowel een export van het estuarium plaats, maar ook een groot volumeverlies in het Nederlandse deel van de monding. Dit betekent dat er veel sediment zeewaarts (richting het Belgische deel van de monding) moet zijn verplaatst.

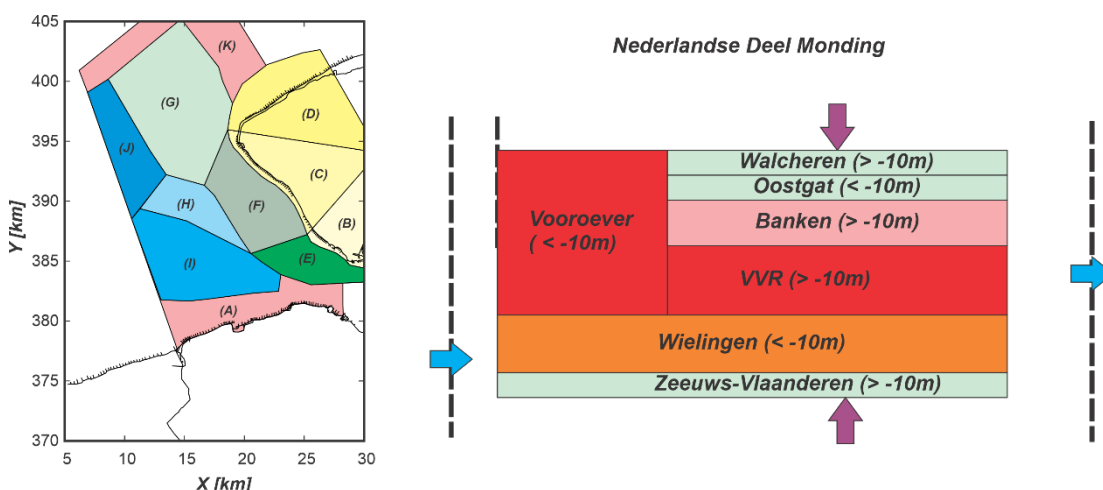
De meest recente periode (2005-2020) vertoont een tegengestelde trend. Het estuarium heeft nu een grote sedimentvraag. Deze sedimentvraag kan gedeeltelijk worden voldaan door de erosie van de Vlake van de Raan en de uitgevoerde suppleties. Daarnaast moet er 1,7 miljoen m<sup>3</sup> aan sedimenttransport (import) van België naar Nederland zijn opgetreden.

### 3.5 Een schatting van de sedimentuitwisseling binnen het Nederlandse deel van de monding

Dit hoofdstuk is toegevoegd ter discussie. De doelstelling van deze analyse is meer begrip van de sedimenthuishouding te verkrijgen door een gedetailleerde volumebalans en het hieruit afleiden van de meest waarschijnlijke sedimentstromen. In deze analyse zijn het toekennen van de juiste morfologische eenheden en de het doen van aannamen over uitwisseling van cruciaal belang.

#### 3.5.1 Definities

Een gedetailleerd boxmodel is gebaseerd op een indeling van de monding in 7 morfologische zones: (1) Zeeuws-Vlaanderen, (2) Wielingen, (3) Vlake van de Raan – VVR, (4) Banken, (5) Oostgat, (6) Walcheren en (7) Diepe vooroever.



Figuur 3-9: Principeschets van de gebruikte onderverdeling in deelpolygonen (links) en het detail sedimentboxmodel van de monding (rechts). De paarse pijlen geven de suppleties weer, de blauwe lijnen de sedimenttransporten.

Deze indeling wordt verkregen door het uitvoeren van twee stappen:

Stap 1: De onderverdeling van de monding in 11 deelpolygonen met vaste geografische afbakening zoals weergegeven in (Figuur 3-9, linkerzijde):

- A. Kust Zeeuws-Vlaanderen (begrenzing door de Wielingen).
- (B-D) Kust Walcheren (begrenzing door diepe deel van het Oostgat).
- (E-G) Banken gebied (actieve zone), begrenzing door de Walvisstaart.
- (H-J) Vlakte van de Raan
- (K) Omliggende vooroever.

Daarnaast wordt een vaste diepte contour (de -10m NAP) gebruikt om de verschillende elementen van elkaar te scheiden. Deze contour is vast in diepte maar de ligging kan per bodemopname dan wel anders zijn.

- 1) Kust van Zeeuws-Vlaanderen: deelpolygoon (A) alle waarden boven -10m en kleiner dan +3 m NAP.
- 2) Wielingen: deelpolygoon (A) < -10m + (I) < -10m.
- 3) Vlakte van de Raan: H > -10m + (I) > -10m + J > -10m.
- 4) Banken: (F) > -10m, E > -10m, G > -10m,
- 5) Oostgat: (B) < -10m, (C) < -10m, (D) < -10m, (E) < -10m, (F) < -10m.
- 6) Walcheren: (B) -10m tot +3m, (C) > -10m tot + 3m, (D) > -10m tot + 3m.
- 7) Vooroever: (J) < -10m, (G) < -10m, (K).

Let op dat bij het gebruik van meebewegende contouren de transporten eigenlijk niet direct uit de volumes kunnen worden bepaald. Dit zou vooral bij hoge dynamiek een probleem opleveren. Voor de hier gepresenteerde resultaten is dit probleem minder belangrijk omdat er alleen met grote gebieden gewerkt wordt. De veranderingen in oppervlakte van deze gebieden is relatief beperkt. Deze transporten zijn gebaseerd op expert-judgement en aannamen benodigd voor het afleiden van de richting en onderlinge uitwisseling. Deze aannamen worden beschreven in de resultaten.

### 3.5.2 Resultaten

#### 1980-2020

De sedimentbalans over de gehele periode laat een import zien van 2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar het estuarium in en een uitstroom uit de monding van 0,31 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. De monding zelf vertoont een verdieping van de diepere delen (vooroever en geulen, < -10 m) en sedimentatie in de ondiepere (> -10m) gebieden.

Voor het oplossen van het detail-boxmodel zijn aanvullende aannamen benodigd. Deze aannamen zijn als volgt.

- (1) De uitwisseling langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen is gelijk aan de aanzanding van Mesocell (Mc) 2 en kan worden afgeleid uit de volumebalans van het estuarium (0,78 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in Figuur 3-10) .
- (2) De brandingstransporten langs de kust van België richting Zeeuws-Vlaanderen zijn gelijk aan de brandingstransporten langs Walcheren. Deze transporten worden niet meegenomen in de balans.
- (3) De volumeverandering van de morfologische eenheid Diepe vooroever (0,31 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in Figuur 3-10) geeft een schatting van de transporten richting de buitendelta van de Oosterschelde.

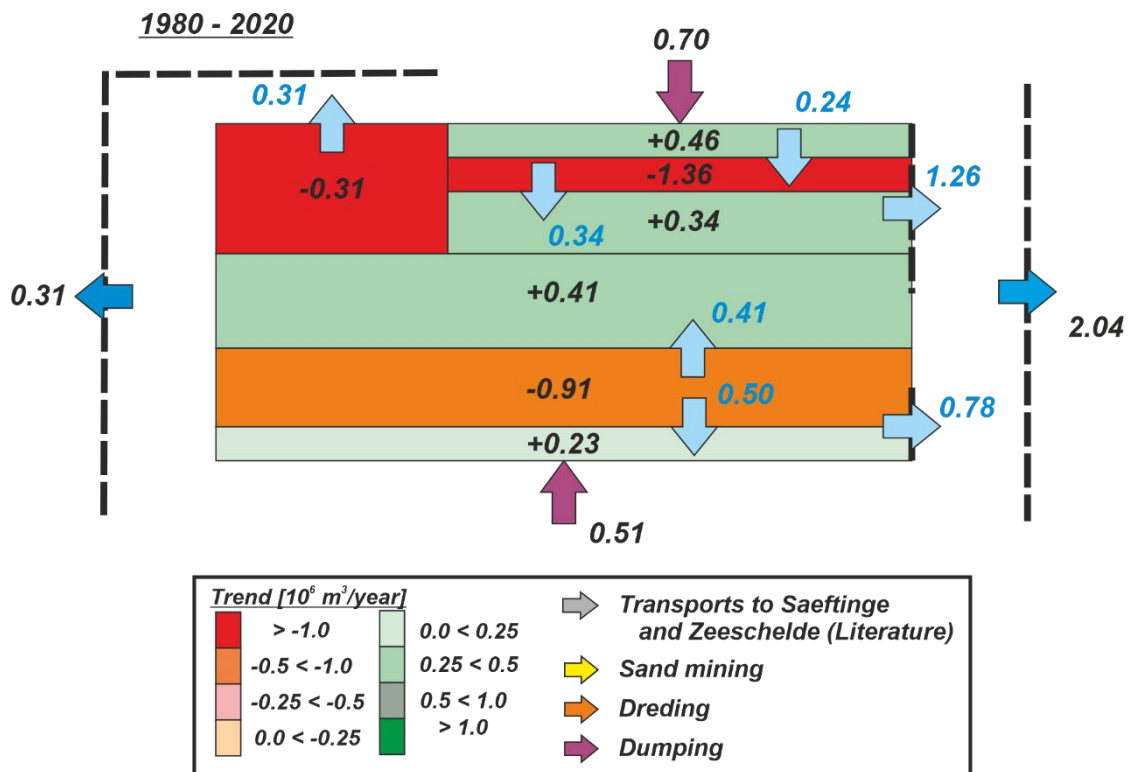
Door gebruik te maken van aannamen 1 tot 3 is het mogelijk de transporten tussen de verschillende morfologische eenheden te beredeneren.

Over de periode 1980-2020, geeft deze laatste aanname een netto uitstroom richting de buitendelta van de Oosterschelde van 0,31 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Deze uitstroom is gelijk aan de totale uitwisseling over de westelijke rand van de buitendelta. Dit betekent dan eigenlijk dat er

netto over deze periode geen verlies richting het Belgische deel van de monding is opgetreden.

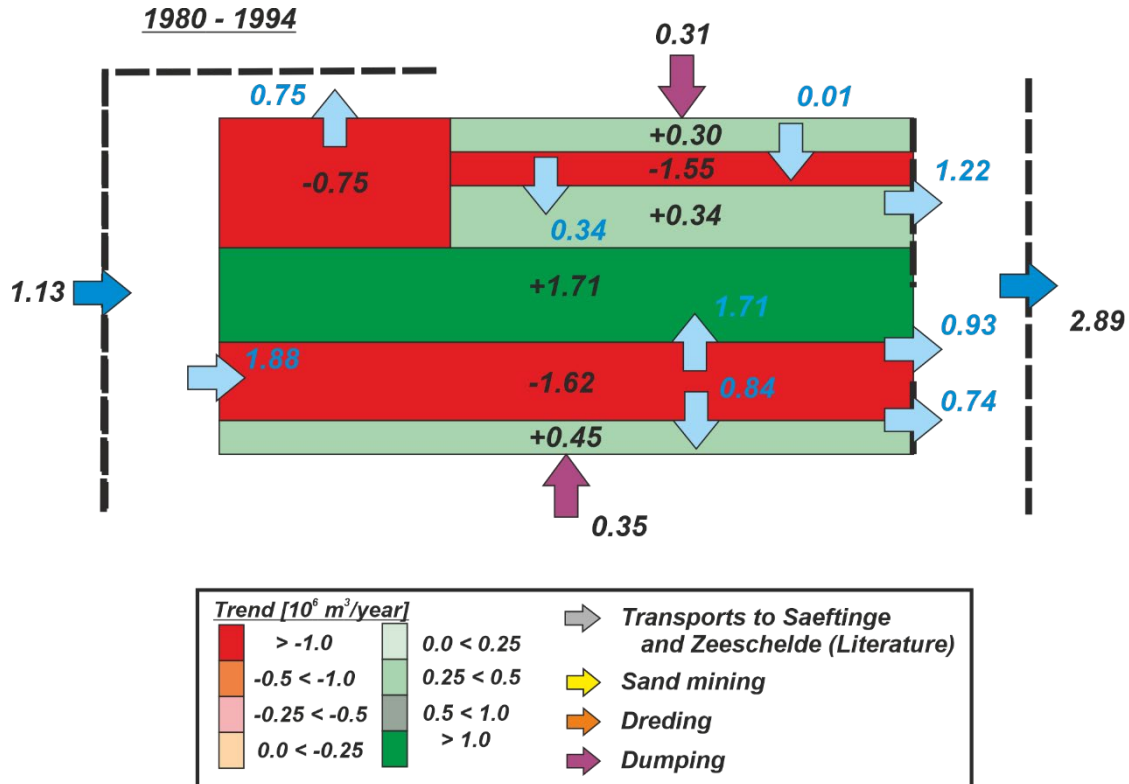
De actieve kustzone van Zeeuws-Vlaanderen, hier gedefinieerd als het gebied tussen -10 en +3m NAP, neemt met gemiddeld 0,23 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in volume toe. Deze toename is kleiner dan de 0,51 miljoen m<sup>3</sup>/jaar die er hier ingestopt wordt door suppleties. Dit surplus aan zand is waarschijnlijk oostwaarts verplaatst en heeft dan bijgedragen aan de sedimentatie in Mc2. Gebruiken we de opgetreden sedimentatie in Mc2 van 0,78 miljoen m<sup>3</sup>/jaar als indicatie voor de sedimentinvoer, dan zal de Wielingen nog 0,50 m<sup>3</sup>/jaar bijgedragen moeten hebben.

De volumetoename van Mc2 verklaart slechts een deel van de 2,04 miljoen m<sup>3</sup>/jaar aan sediment import door de monding. Er moet nog 1,26 m<sup>3</sup>/jaar aanvullend zijn geïmporteerd. Een bron voor deze transporten zijn de zandsuppleties langs de kust van Walcheren (0,70 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) en de verdieping van het Oostgat (-1,36 miljoen m<sup>3</sup>/jaar). Ongeveer 2/3 van het suppletiemateriaal (0,46 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) heeft bijgedragen aan de volumetoename van de kustzone van Walcheren. Een kleiner deel (0,24 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) is richting het Oostgat verplaatst of rechtstreeks vanaf de kustzone afgevoerd richting het estuarium. Het merendeel van de erosie van het Oostgat lijkt oostwaarts te zijn afgevoerd. Een klein deel (0,34 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) heeft waarschijnlijk bijgedragen aan de volumetoename van het voorliggende banken gebied.



Figuur 3-10: Detailmodel monding van de monding over de periode 1980-2020.

1980-1994

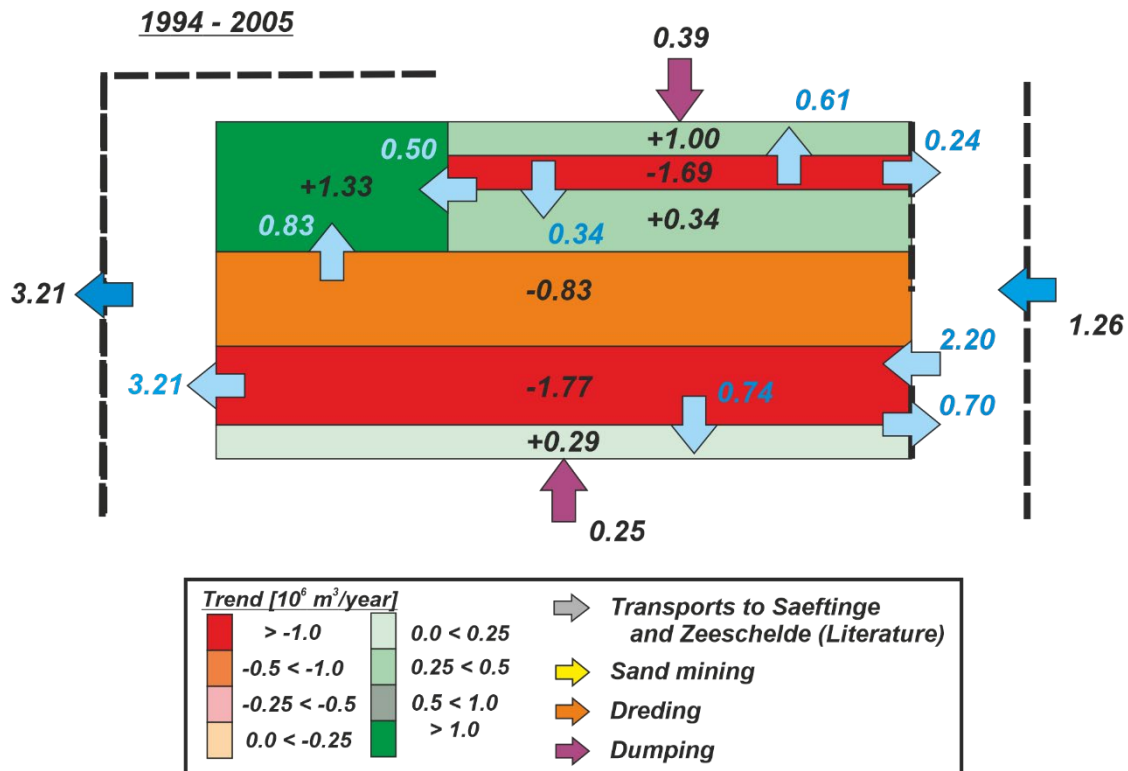


Figuur 3-11: Detailmodel van de monding over de periode 1980-1994.

De netto import van het estuarium bedraagt in deze periode 2,89 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$ . Met een gemiddelde daling van de monding van -1,11 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$  en relatief beperkt suppletievolumen van 0,75 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$  is er nog een netto sedimentbehoefte van 1,13 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$ . Gaan we uit van een verlies van de vooroever van 0,75 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$  dan bedraagt de uitwisseling tussen het Belgische en Nederlandse deel 1,88 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$ .

De kustzone van Zeeuws-Vlaanderen vertoont een toename van 0,45 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$ , wat iets hoger is dan de uitgevoerde suppleties (0,35 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$ ). Het kustlangse verlies naar Mc2 is in deze periode 0,74 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$ . Dit betekent dat de Wielingen voor deze sedimentbehoefte 0,84 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$  moet leveren. Het totale aanbod van de Wielingen (inclusief de aanvoer vanuit België) bedraagt 3,5 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$  en bestaat uit een lokale verdieping (1,62 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$ ) en de aanvoer van 1,88 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$ . Dit aanbod is ruim voldoende om de sedimentvraag van Mc2 te voldoen. Het is ook waarschijnlijk dat er sediment richting de Vlakte van de Raan is geleverd. In totaal blijft er dan 0,93 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$  over voor transport richting het estuarium. De totale bijdrage van het zuidelijke deel van de monding in de uitwisseling met het estuarium bedraagt: 0,93 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$  + 0,74 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$  = 1,67 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$ . Het noordelijke deel moet dan nog 1,22 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$  leveren. Dit zand komt voornamelijk uit de verdieping van het Oostgat. De suppleties op de kust van Walcheren zijn vrijwel gelijk aan toename in sedimentvolume van de kust. De toename in sedimentvolume van de Banken (0,34 miljoen  $\text{m}^3/\text{jaar}$ ) wordt geleverd door het Oostgat.

1994-2005



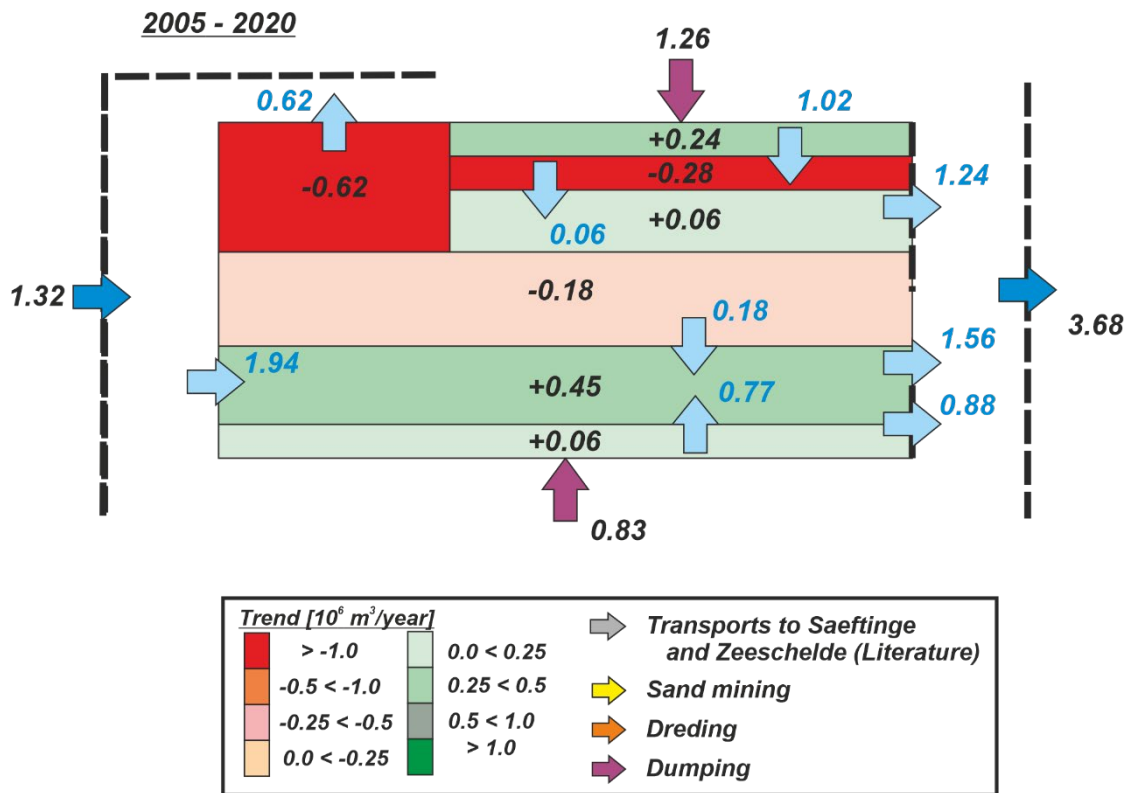
Figuur 3-12: Detailmodel van de monding over de periode 1994-2005.

De periode 1994-2005 wijkt sterk af van de andere perioden doordat er een sedimentexport (1,26 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) uit het estuarium optreedt. Ook de monding vertoont een grote verdieping (-1,23 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) en er is 0,64 miljoen m<sup>3</sup>/jaar gesuppleerd. Er moet in deze periode een groot zeewaarts transport zijn opgetreden. Dit is zichtbaar in de diepe vooroever polygoon. Hier treedt een aanzanding op van +1,33 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Er moet ook een groot sedimenttransport naar het Belgische deel van de monding of noordelijk richting de Oosterschelde zijn opgetreden van in totaal 3,21 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. De erosie van de vlakke van de Raan (-0,83 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) en van het Oostgat zijn voldoende om in de sediment toename van de diepe vooroever te voldoen.

De kustzone van Walcheren vertoont een grote volumetoename van 1,0 miljoen m<sup>3</sup>/jaar welke groter is dan de uitgevoerde suppleties (0,39 miljoen m<sup>3</sup>/jaar). Erosie van het Oostgat (-1,69 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) is ruimschoots voldoende om dit en de volumetoename van de Banken te compenseren (0,34 miljoen m<sup>3</sup>/jaar). Er zou vanuit deze redenering nog een transport van 0,24 miljoen m<sup>3</sup>/jaar moeten optreden richting het estuarium.

Ook in deze periode vertoont Mc2 een consistente invulling van 0,70 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. De erosie van de Wielingen is voldoende om aan deze vraag te voldoen. De toename in kustvolume van Zeeuws-Vlaanderen (0,29 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) is vrijwel gelijk aan de uitgevoerde suppleties (0,25 miljoen m<sup>3</sup>/jaar).

2005-2020



Figuur 3-13: Detail sedimentboxmodel monding voor de periode 2005-2020

In de meest recente periode heeft het estuarium een veel grotere sedimentbehoefte (3,68 miljoen m<sup>3</sup>/jaar). Met een gelijke aanname dat het verlies van de vooroever richting de Oosterschelde monding representeert (0,62 miljoen m<sup>3</sup>/jaar), resulteert de grote sedimentbehoefte van het estuarium in een netto sediment import vanuit het Belgische deel van 1,32 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.

Een (groot) deel van de sedimentbehoefte wordt opgevangen door de hogere suppletievolumes over de recente periode. Langs de kusten van Zeeuws-Vlaanderen en Walcheren is 2,09 miljoen m<sup>3</sup>/jaar gesuppleerd, waarvan 0,83 miljoen m<sup>3</sup>/jaar langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen. De kustzone is slechts met 0,06 miljoen m<sup>3</sup>/jaar toegenomen.

Langs de kust van Walcheren is er 1,26 miljoen m<sup>3</sup>/jaar gesuppleerd waarvan er 0,24 miljoen m<sup>3</sup>/jaar achterblijft in de kustzone. Het Oostgat is met -0,28 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in volume afgenomen en de naastliggende Banken met 0,06 miljoen m<sup>3</sup>/jaar toegenomen. In totaal blijft er dan 1,24 miljoen m<sup>3</sup>/jaar over voor import naar het estuarium. Op basis van de invulling van Mc2 wordt geschat dat de landwaartse transporten langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen 0,88 miljoen m<sup>3</sup>/jaar bedragen. Dit betekent dat de Wielingen nog 1,56 miljoen m<sup>3</sup>/jaar moet bijdragen om een totale import van 3,68 miljoen m<sup>3</sup>/jaar te verkrijgen. Deze 1,56 miljoen m<sup>3</sup>/jaar wordt gedeeltelijk geleverd door erosie van de Vlakte van de Raan (-0,18 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) maar hoofdzakelijk door een instroom vanuit België. Deze instroom moet 1,94 miljoen m<sup>3</sup>/jaar bedragen om een sluitende balans te verkrijgen.

## 4 Een “actieve” volumebalans van de totale monding

### 4.1 Methode

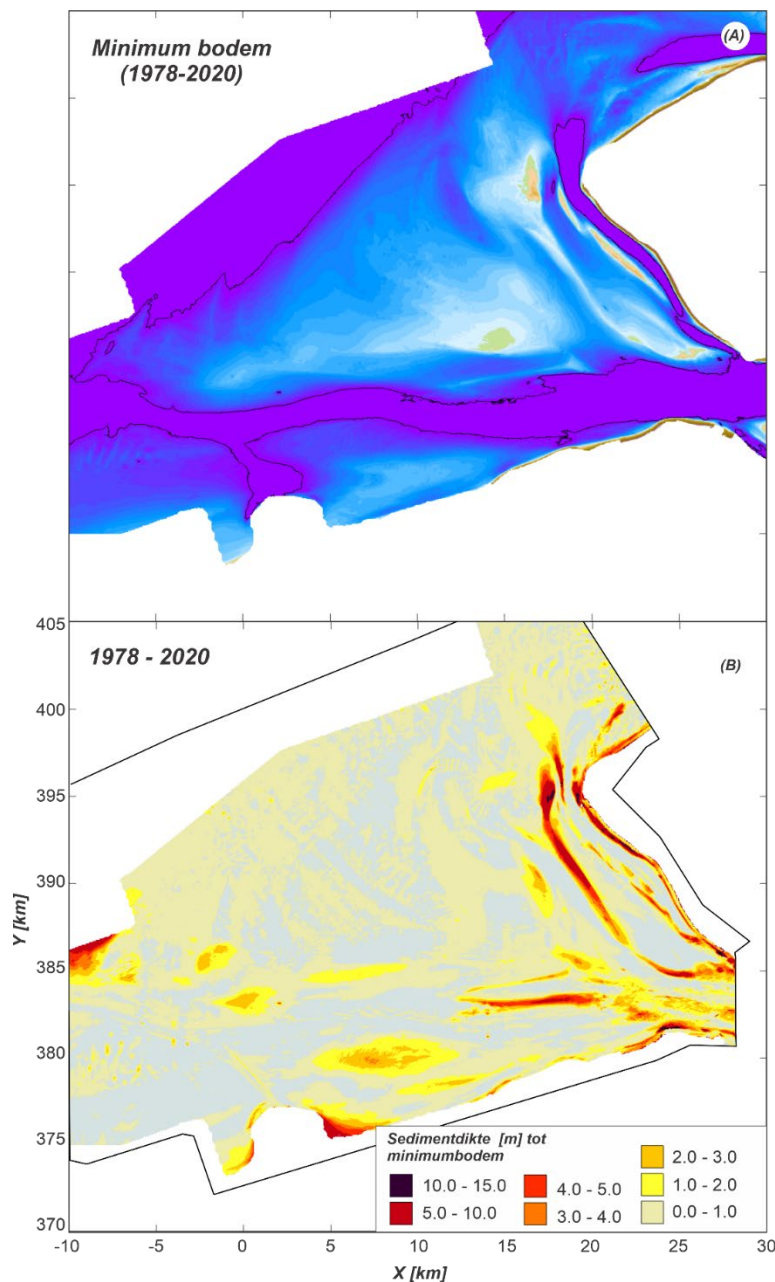
Het kwantificeren van sedimentvolumes van het gehele mondingsgebied is gebaseerd op de actieve bodemlaag zoals toegepast in de studies naar de aanlandingsbanken van Schiermonnikoog (Elias, 2022) en Ameland (Elias et al. 2022) en het Eierlandse Gat (Elias et al. 2022). Deze actieve bodemlaag wordt bepaald aan de hand van de minimum bodemligging (Figuur 4-1A), die daarbij gedefinieerd wordt als de onderkant van de morfologische enveloppe voor een bepaalde tijdperiode (Pearson et al., 2022). Het sediment dat zich onder deze minimum bodem bevindt is over de beschouwde periode niet veranderd en heeft dus niet deelgenomen aan de morfologische veranderingen (de passieve bodemlaag). Alleen het deel van de bodem dat zich boven de minimum bodemligging bevindt neemt deel aan de morfologische verandering (de actieve bodemlaag).

Het verschil tussen de gemeten bodemligging en de minimum bodemligging geeft dan een schatting van de hoeveelheid sediment, de dikte van het sedimentpakket, die zich in de morfologisch actieve laag bevindt (Figuur 4-1B). Let hierbij op dat de sedimenthoeveelheid in de actieve zone dus niet de toekomstige sedimentvoorraad weergeeft. Bij een structureel eroderend gebied (bijvoorbeeld een terugtrekkende eilandkop) is de minimumbodem vrijwel gelijk aan de huidige bodem. Dit betekent dat het sedimentvolume van de huidige bodem dan nihil is.

Bij de bepaling van de minimum bodem wordt per rasterpunt van het bodembestand gekeken of er in alle jaren een bodemwaarde aanwezig is. Als een waarde ontbreekt in één van de jaren wordt het punt niet meegenomen in de analyse. Om een zo goed mogelijk dekking te verkrijgen in de monding zijn daarom alleen de jaren 1978 – 2020 gebruikt in de analyse, waarbij de bodemkaarten zo goed mogelijk gevuld zijn. Ten zuiden van Zeebrugge mist echter data in de kustzone, waardoor dit gebied niet meedoet in de analyse. Richting de Westerschelde is de afbakening van het balansgebied zodanig gekozen dat deze aansluit op de westelijke grens van Macrocel 1. Aan de noordzijde, langs de kust van Walcheren, is de afbakening net ten zuiden van Domburg gelegd en loodrecht op de kust. De overige grenzen zijn bepaald door de beschikbaarheid van de meetdata.

Let op dat deze analyse eerder is uitgevoerd met de originele bodemkaarten als basis en nog niet de bodemkaarten zoals weergegeven in Hoofdstuk 2. De reconstructie van nieuwe bodemkaarten over de periode 1983-1988 geeft hier een groter verschil in volumeverandering.

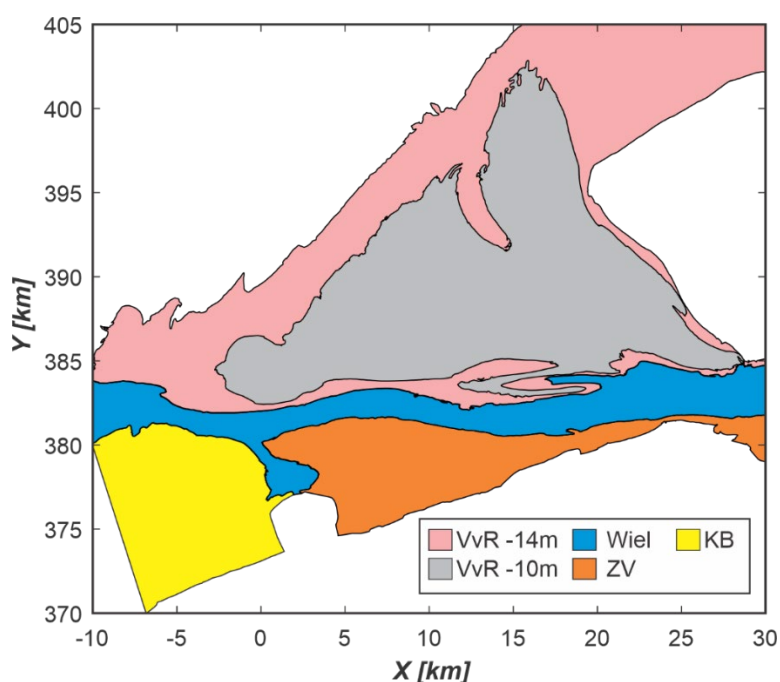




Figuur 4-1: Een overzicht van de methode ter berekening van de sedimentvolumes van het gehele zeegat. (A) de minimum bodemligging tussen 1978 en 2020, (B) voorbeeld van de van de sedimentlaag in 2020.

## 4.2 Indeling in balansgebieden

Kwantificering van de sedimentvolumes is gebaseerd op een indeling in een vijftal balansgebieden (Figuur 4-2). Als eerste stap zijn hierbij representatieve contouren bepaald. De -10m contour is de diepste contour waarbij de Vlakte van de Raan altijd een gesloten contour heeft (Figuur 4-2, grijze vlak). De NAP -14m contourlijn geeft een goede afbakening van de Wielingen en de zeezijde van de Vlakte van de Raan (Figuur 4-2, blauwe en rode vlakken). Het gebied ten zuiden van de Wielingen (de ondiepe kustzone) is onderverdeeld in 2 delen met de haven van Zeebrugge als scheiding.



Figuur 4-2: Overzicht van de verschillende gebieden waarover de volumes zijn bepaald. (1) Vlakte van de Raan (VvR) op basis van de NAP -14m contour (rood). (2) VvR op basis van de NAP -10m contour (grijs), (3) Wielingen (NAP -14m contourlijn - blauw), en de kustzone landwaarts van de -14m contour onderverdeeld in de delen ten zuiden (geel) en ten noorden van Zeebrugge (oranje).

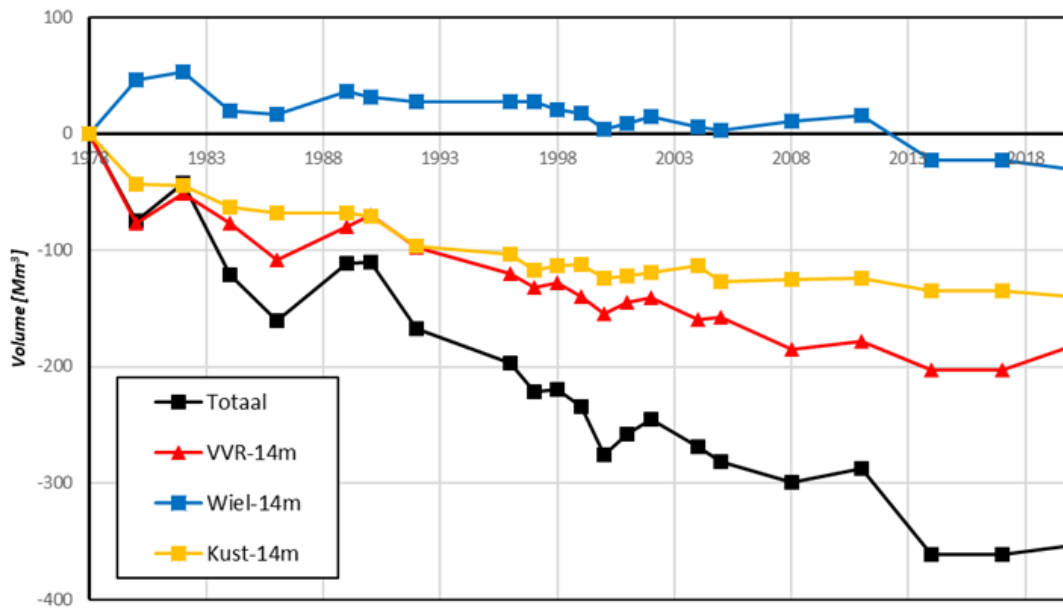
### 4.3 Resultaten volumebalans

De ontwikkeling van het totale balansgebied en de afzonderlijke deelgebieden zijn samengevat in Figuur 4-3 en Tabel 4-1. In totaal is het gehele mondingsgebied met 353 miljoen m<sup>3</sup> in sediment afgenomen. Deze afname verloopt vrijwel lineair tot 2014. In de jaren 2014-2020 vindt er juist een stabilisatie (kleine toename) plaats. De totale erosiesnelheid bedraagt 8,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.

Een analyse van de deelgebieden laat zien dat het merendeel van de erosie optreedt op de Vlakte van de Raan (-182 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) en in de kustzone (-140 miljoen m<sup>3</sup>/jaar). De volumeverandering van de Wielingen is beperkt (-31 miljoen m<sup>3</sup>/jaar). De beperkte afname in volume van de Wielingen is mede een gevolg van de gehanteerde begrenzing. Deze begrenzing verandert jaarlijks op basis van de -14 m contourlijnen. Voor de Wielingen geeft dit een grote toename in oppervlakte van 47 miljoen m<sup>2</sup>. Doordat het oppervlakte toeneemt wordt ook een groter aandeel van het sedimentvolume aan de Wielingen toegekend.

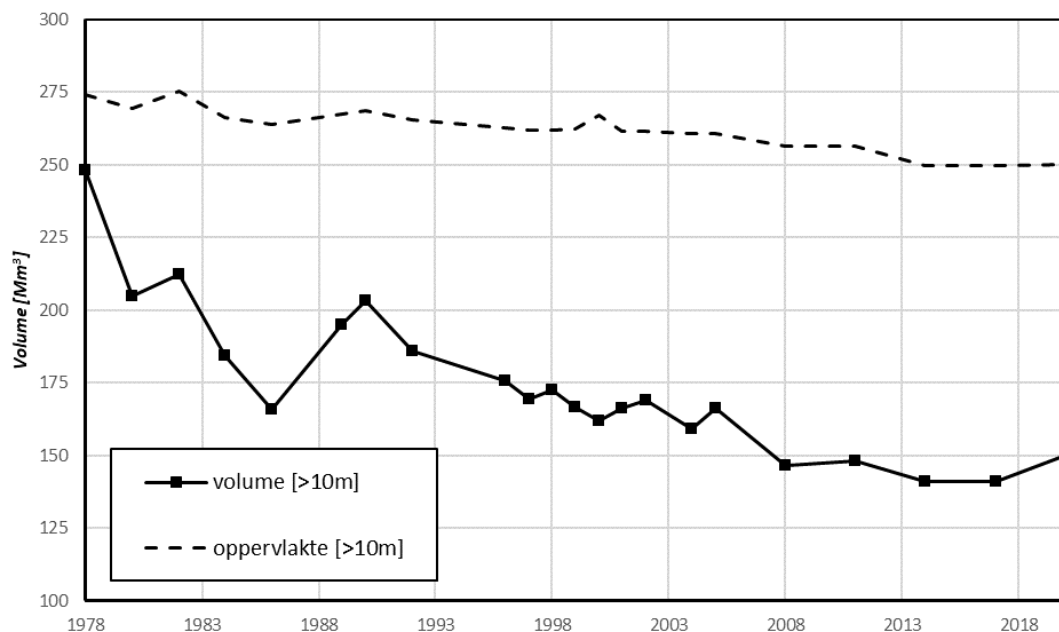
Tabel 4-1: Overzicht van de volumeontwikkeling van de buitendelta. Volumes bepaald t.o.v. de minimumbodem over de periode 1987-2020. De ontwikkeling van de volumes t.o.v. de 1978 bodem wordt weergegeven in Figuur 4-3.

Gebied	Volume [miljoen m <sup>3</sup> ]		Oppervlakte [km <sup>2</sup> ]		Gemiddelde sediment dikte [m]	Hoogte Verandering [m]
	Gemiddeld	Verandering	Gemiddeld	Verandering		
Vlakte vd Raan	360	-182	500	-16	0.72	-0.37
Wielingen	116	-31	93	+47	1.29	-1.09
Kust	122	-140	135	-21	0.90	-0.85
<b>Totaal</b>	<b>599</b>	<b>-353</b>	<b>728</b>	<b>+11</b>	<b>0.82</b>	<b>-0.50</b>



Figuur 4-3: Ontwikkeling van volumes t.o.v. het 1978 volume voor de totale monding en de verschillende deelgebieden.

Een schatting van de volumes van het centrale deel van de Vlakte van de Raan is gebaseerd op de omhullende van de -10m contour. Deze contour laat zien dat het centrale deel relatief veel in oppervlakte is afgenomen, van 275 km<sup>2</sup> naar 250 km<sup>2</sup>, een afname van een kleine 10%. Het actieve volume is afgenomen met 98 miljoen m<sup>3</sup>, wat procentueel gezien neerkomt op een verlies van 40%. Ook voor dit deel is een stabilisatie van de afname te onderscheiden in de meest recente bodems. Tussen 2017 en 2020 nemen de volumes zelfs iets toe. Over de gehele periode is dit deel van de Vlakte van de Raan in hoogte afgenomen met 0,39 m tussen 1978 en 2020, ofwel -0,01 m/jaar.



Figuur 4-4: Ontwikkeling van volume, oppervlakte en hoogte van de Vlakte van de Raan op basis van de omhullende van de NAP -10m contour.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

- De sedimentimport van de Westerschelde over de periode 1980-2020 wordt geschat op 2,0 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. De uitwisseling met het Belgische deel van de monding lijkt gemiddeld over de gehele periode beperkt.
- Grote fluctuaties in uitwisseling tussen het Belgische en Nederlandse deel lijken op te treden. Het zeewaartse verlies uit de monding richting België en de Oosterschelde is het grootst tussen 1994 en 2005 (3,2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar).
- Vanaf 2005 bedraagt de netto sedimenttoevoer vanaf het Belgische deel bijna 2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.
- De Vlakte van de Raan, gedefinieerd door de omhullende van de -10m contour, is in de periode 1984-2017 in volume en oppervlakte afgenomen. Het totale volumeverlies bedraagt 100 miljoen m<sup>3</sup> terwijl het oppervlakte met 25 km<sup>2</sup> is afgenomen. Dit geeft een gemiddelde hoogteafname van 1 cm per jaar. Sinds 2008 lijken de volumeverliezen af te nemen.
- Een sluitende sedimentbalans van de gehele Westerscheldemonding kan nog niet worden opgesteld, maar veel aanvullend inzicht in het Nederlandse deel van de monding is verkregen.

### 5.2 Aanbevelingen

De detailbalansen bevatten aannamen over de onderlinge uitwisselingen tussen de verschillende morfologische eenheden. Deze aannamen kunnen worden getoetst door op een kleiner schaalniveau de sedimentatie-erosie patronen te analyseren en verplaatsingen van de morfologische elementen te beschrijven. Daarnaast verdient het de aanbeveling om deze aannamen te toetsen bij de verschillende morfologische experts binnen dit gebied.

Een sluitende sedimentbalans van de gehele Westerscheldemonding (inclusief Belgische deel) opstellen was binnen deze studie nog een brug te ver. Essentieel voor zo'n balans zijn (1) het beter begrijpen van de onzekerheden in de Belgische bodemdata en (2) het correct interpreteren van de bagger- en stortvolumes nabij Zeebrugge. Deze volumes bevatten een significant aandeel slib, waardoor de gemeten bodemhoogteverandering en de gebaggerde en gestorte volumes waarschijnlijk niet direct 1 op 1 gekoppeld zijn. Hoe met deze onzekerheid om te gaan is nog niet direct duidelijk, maar moet wel worden opgepakt om een sluitende balans van de gehele monding te verkrijgen. Deze laatste twee punten zullen na de zomer van 2023 worden opgepakt in een workshop bij de VNSC, met zowel Vlaamse als Nederlandse experts.

## 6 Referenties

Elias, E.P.L., 2022. Aanlandingsbanken Schiermonnikoog. Rapport Deltares, Delft, 45 pp.

Elias, E.P.L., 2022. Morfologische ontwikkeling Eierlandse Gat. Rapport Deltares, Delft, 77 pp.

Elias, E. P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., Cleveringa, J., Jeuken, C., Taal, M., Van der Werf, J., (2023). Large-scale morphological changes and sediment budget of the Western Scheldt estuary 1955-2020 – The impact of large-scale sediment management. Submitted to the Netherlands Journal of Geosciences.

Elias, E.P.L., Vermeer, N., de Vegt, H. 2022. Morfologisch onderzoek Zeegat van Ameland. Een verdiepend onderzoek naar de uitwisseling tussen buitendelta, kust en bekken.aanlandingsbanken Schiermonnikoog. Rapport Deltares, Delft, 59 pp.

Haecon, (2006). Actualisatie van de zandbalans van de Zee- en Western Scheldt. Report 1249760008/lvp. (in Dutch)

Lauwaert, B, Fettweis, M, de Witte, B, Van Hoey, G, Timmermans, S., Hermans, L, (2019). Vooruitgangsrapport juni 2019 over de effecten op het mariene milieu van bagger-speciestorings. Rapport BL/2019/01, KBIN, OD Natuur-BMM – Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, 32p.

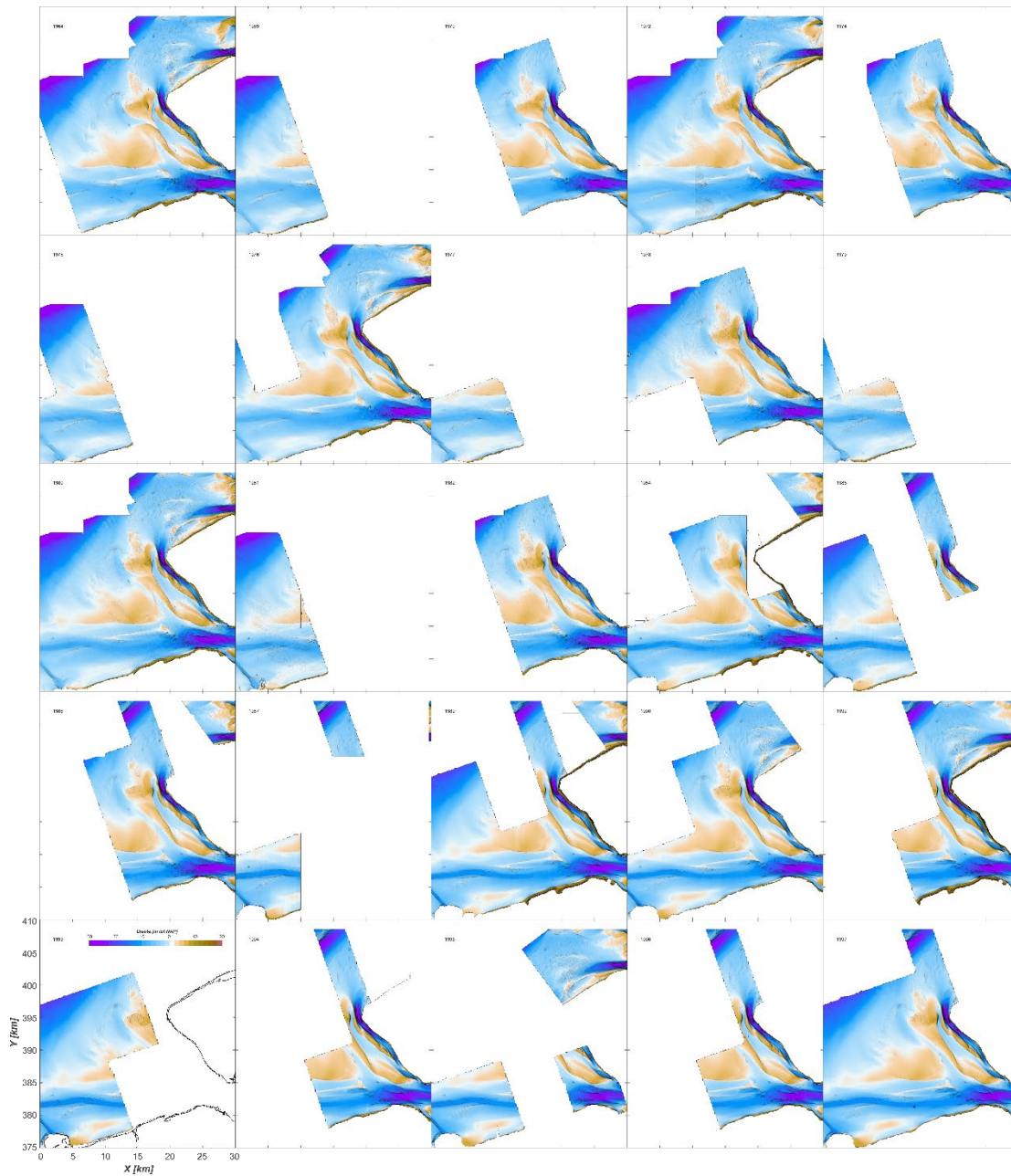
Nederbragt, G., Liek, G (2004). Beschrijving zandbalans Westerschelde en monding. Rapport RIKZ/2004.020. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ., 70 p.

Van der Werf, J.J., Giardino, A., Santinelli, G., (2011). Aanzanding en onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Sardijngeul Rapport 1204421-004, Deltares, Delft, 44 p.

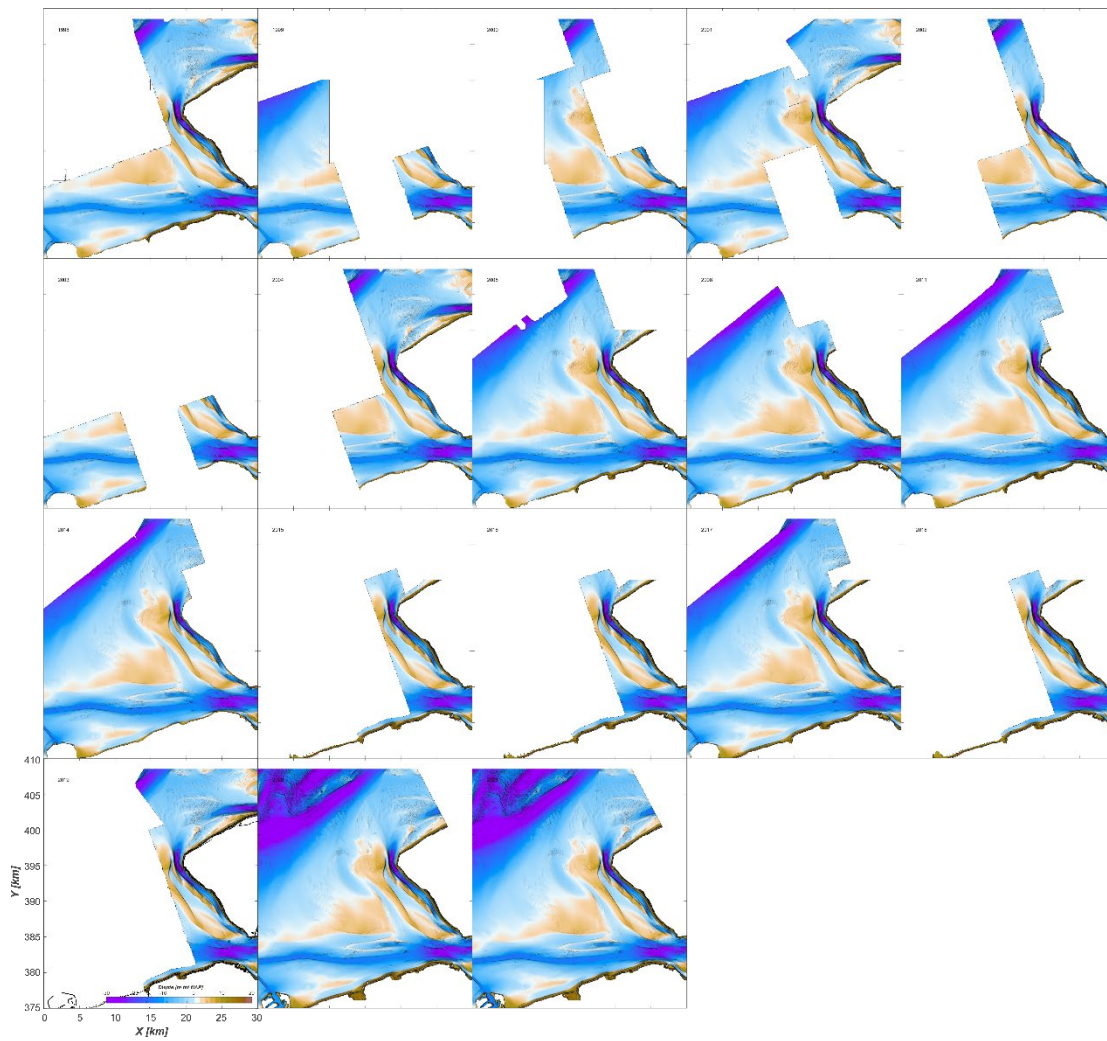
Vandenbruwaene, W.; Levy, Y.; Plancke, Y.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Integraal plan Boven-Zeeschelde: Deelrapport 3 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme. Versie 5.0. WL Rapporten, 13\_131. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Vroom, J. & Schrijvershof, R., (2015). Overzicht ingrepen periode 1985-2014. Memo 1210301-001-ZKS-005, Deltares, Delft40p.

## A Meetdata



Figuur A- 1: Overzicht beschikbare meetdata 1964 - 1997



Figuur A- 2: Overzicht beschikbare meetdata 1998 - 2021