

Morfologie en ecologie van de Schelde- monding

Overzicht van bestaande kennis en data



Morfologie en ecologie van de Schelde-monding

Overzicht van bestaande kennis en data

Auteur(s)

Jebbe van der Werf

Harriëtte Meijer - Holzhauer

Ad van der Spek (A.J.F.)

Roy van Weerdenburg

Johan Craeymeersch

Ingrid Tulp

Tom Ysebaert

Morfologie en ecologie van de Schelde-monding

Overzicht van bestaande kennis en data

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Zee en Delta
Contactpersoon	Marco Schrijver
Referenties	Van der Werf, J. (2020). Plan van aanpak globaal ontwerp proefsuppletie Schelde-monding. Memo 11203725-000-ZKS-0014, Deltares.
Trefwoorden	Schelde-monding, morfologie, ecologie, pilotsuppletie, literatuurstudie

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	04-09-2020
Projectnummer	11203725-000
Document ID	11203725-000-ZKS-0018
Pagina's	92
Status	definitief

Auteur(s)

	Jebbe van der Werf	
	Harriette Meijer - Holzhauer	
	Ad van der Spek	
	Roy van Weerdenburg	
	Johan Craeymeersch	
	Ingrid Tulp	
	Tom Ysebaert	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1	Jebbe van der Werf et al.	Edwin Elias	Toon Segeren	
		Peter Herman		
2	Jebbe van der Werf et al.	Edwin Elias	Toon Segeren	
		Luca van Duren		

Samenvatting

Rijkswaterstaat is voornemens om een suppletie in de monding van het Schelde-estuarium aan te leggen, om te onderzoeken of suppleties in dit gebied bijdragen aan de instandhouding van het kustfundament en de veiligheid van de kust en het achterland. De data die worden verkregen middels de monitoring van deze suppletie zullen ook worden ingezet om de morfologische en ecologische kennis van het gebied te vergroten.

Dit rapport beschrijft de bestaande kennis en data van de morfologie en ecologie van de Schelde-monding. Het heeft mede tot doel hiaten in de morfologisch en ecologische kennis en monitoringsdata te definiëren.

Op basis van de lange termijn ontwikkelingen van de Westerschelde en zijn monding kunnen we als hypothese stellen dat door de verlanding en bedijking van de zijtakken de ebstroming in het westelijk deel van het estuarium dominantier werd waardoor het patroon van geulen en banken in de monding veranderde. Een dergelijke samenhang tussen de ontwikkelingen in Westerschelde en monding is eerder gesuggereerd, maar niet in detail onderbouwd.

Op basis van de morfologie en dominante morfodynamische processen is de Schelde-monding opgedeeld in vier deelsystemen:

1. Noord: plaat-geul systeem rondom Oostgat/Sardijngeul.
2. Centraal: Vlakte van de Raan.
3. Zuid: (Zeeuws-)Vlaamse kust en Appelzak.
4. Oost: instroming Westerschelde.

Elke deelsysteem heeft zijn eigen kennisvragen. Rondom het Oostgat (deelsysteem 1) hebben deze met name betrekking op de stabiliteit van de uitgevoerde geulwandsuppleties en plaat-geul interactie. Er blijkt relatief weinig studie te zijn gedaan naar de waterbeweging en sedimenttransportprocessen op de Vlakte van de Raan (deelsysteem 2). Het is de vraag waarom de Vlakte van de Raan zo'n morfologisch stabiel gebied is, terwijl de optredende snelheden en golven groot genoeg zijn om het sediment te mobiliseren. Er is geen eenduidig conceptueel model van de sedimentuitwisseling tussen de Westerschelde en het mondingsgebied, en hoe deze beïnvloed wordt door zeespiegelstijging en menselijke ingrepen (met name betrekking op deelsysteem 3 en 4).

Het belang van de geulen en platen in de monding van de Schelde voor de ecologie is niet in detail bekeken. Op basis van de huidige studies is het dan ook niet duidelijk te bepalen of het mogelijk is met behulp van een suppletie een verbetering van het ecosysteem te bewerkstelligen.

Voor het centrale en noordelijke deel van de Schelde-monding zijn relatief weinig hydrodynamische data beschikbaar, en sedimentconcentratie metingen zijn schaars. Daarnaast is het meetnet niet fijnmazig genoeg om de interactie tussen bodemligging en waterbeweging te ontrafelen. Verder ontbreken hoge-resolutie bodemopnames om beddingvormen en morfologische ontwikkeling in detail in kaart te brengen.

Ondanks de programma's waarin bodemdieren, vogels, vissen of zeezoogdieren worden gemonitord, zijn deze gegevens vaak slechts bedoeld voor het verkrijgen van een globaal beeld van de gehele kustzone en bevatten ze onvoldoende detail binnen de monding van de Schelde.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.1.1	Schelde-monding	7
1.1.2	Sedimentbeheer	7
1.1.3	Pilotsuppletie	8
1.2	Doelstelling	8
1.3	Leeswijzer	8
1.4	Verantwoording	8
2	De morfologische ontwikkeling van de Schelde-monding	9
2.1	Huidige ligging van platen en geulen	9
2.2	De lange termijn ontwikkeling van de Westerschelde en het mondingsgebied	11
2.2.1	Inleiding	11
2.2.2	Ontstaan van het estuarium en de monding in de Middeleeuwen	11
2.2.3	Het mondingsgebied op zeekaarten in de 17 ^e en 18 ^e eeuw	12
2.2.4	De ontwikkeling van de Westerscheldemonding sinds 1800	14
2.2.5	Samenhang tussen de ontwikkelingen in de Westerschelde en de monding	17
2.2.6	Conclusie en hypothese	18
2.3	Morfologische veranderingen 1964-2011	19
3	Morfologische processen Schelde-monding	23
3.1	Grootschalige waterbeweging	23
3.1.1	Getij	23
3.1.2	Golven en stormopzet	25
3.1.3	Residuele stroomsnelheden	25
3.1.4	Koppeling waterbeweging en sedimenttransport	27
3.2	Vier deelsystemen	27
3.3	Noord: plaat-geul systeem rondom Oostgat/Sardijngeul	29
3.4	Centraal: Vlake van de Raan	37
3.5	Zuid: (Zeeuws-)Vlaamse kust en Appenzak	38
3.5.1	Zeeuws-Vlaanderen	39
3.5.2	Het Zwin	40
3.5.3	Vlaanderen	41
3.5.4	Netto sedimenttransporten	43
3.6	Oost: Instroming Westerschelde	43
3.6.1	Sedimentuitwisseling monding - Westerschelde	44
3.6.2	Effecten van zeespiegelstijging (ZSS) en sedimentbeheer Westerschelde	45
4	Ecologie	49
4.1	Natuurbeleid en beheer voor de Schelde-monding	49
4.2	Bodemdieren	50
4.2.1	Verdeling van de bodemdiergemeenschappen over het mondingsgebied	50
4.2.2	Mosselbanken	53
4.2.3	Ruimtelijke verspreiding van bodemdieren	54
4.2.4	Kansenkaarten voor specifieke bodemdieren	55
4.2.5	Trends en jaar op jaar variatie	57
4.3	Vis	58

4.3.1	Trekvissen	58
4.3.2	Kinderkamersoorten	59
4.4	Vogels	64
4.4.1	Broedkolonies	65
4.5	Zeezoogdieren	67
4.5.1	Bruinvissen	67
4.5.2	Grijze zeehond en gewone zeehond	67
5	Monitoringsdata	70
5.1	Inleiding	70
5.2	Waterbeweging en sedimentconcentraties	70
5.3	Bodemligging en sedimentbalans	72
5.4	Ecologische monitoring	73
5.4.1	Bodemdieren	73
5.4.2	Vis	75
5.5	Zeevogels en zeezoogdieren	76
5.5.1	Vliegtuig-, boot- en landtellingen	76
5.5.2	Kolonietellingen	79
6	Discussie en conclusies: kennislacunes	80
6.1	Waterbeweging en morfodynamica	80
6.2	Ecologie	81
6.3	Monitoringsdata	82
7	Referenties	84
A	Effect van grootschalige ingrepen in de Schelde-monding	90
B	Effect van sedimentbeheer Westerschelde op de sedimentuitwisseling met de monding	91

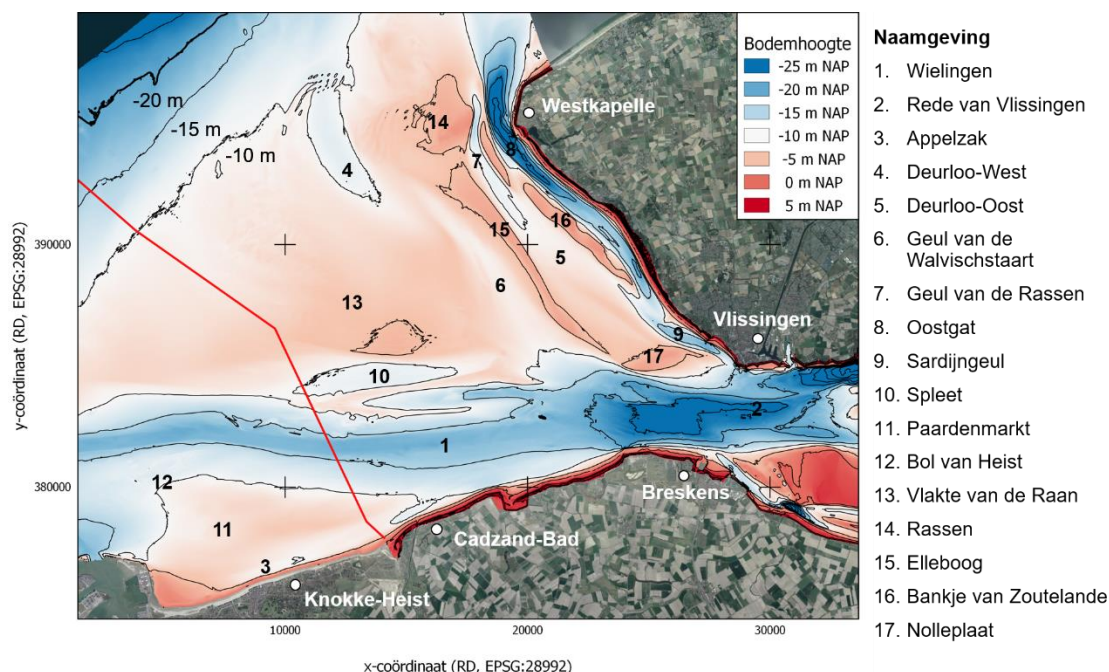
1 Inleiding

1.1 Achtergrond

1.1.1 Schelde-monding

De Schelde-monding vormt de natuurlijke en open overgang van open zee naar het achterliggende Schelde-estuarium. In de monding van de Schelde ligt het Natura 2000-gebied Vlake van de Raan, een zeegebied met een oppervlakte van 175 km².

De monding van het Schelde-estuarium ligt ten westen van de lijn Vlissingen - Breskens (Figuur 1.1). Het bestaat uit twee grote geulen, het Oostgat (8) langs de kust van Walcheren en de Wielingen (1) langs de kust van (Zeeuws-)Vlaanderen. Hiertussen ligt de ondiepte Vlake van de Raan (13). Walcheren vormt de noordoostelijke begrenzing. Het is niet eenduidig waar de zeewaartse en zuidelijke grens precies liggen. In zeewaartse richting loopt de monding over in de kust-parallelle Zeeuwse/Vlaamse banken. Ten zuiden van de Wielingen ligt de haven van Zeebrugge en de (Zeeuws-)Vlaamse kustzone met de kustnabije Appelzak geul (3).



Figuur 1.1 De bodemligging van de Schelde-monding op basis van Vaklodingen data uit 2011 en 2015 met hierop aangegeven de belangrijkste geulen en platen. De landsgrens is aangegeven met een rode lijn.

1.1.2 Sedimentbeheer

De monding draagt in belangrijke mate bij aan de hoofdfuncties van het estuarium: veiligheid (dijken, duinen en het voorland beschermen het achterland tegen overstroming), natuurlijkheid (o.a. leefgebied voor vissen, vogels en zoogdieren) en toegankelijkheid (met name middels de vaargeulen Scheur, Wielingen, Oostgat en Sardijngeul ten behoeve van de bereikbaarheid van de o.a. de havens van Zeebrugge, Vlissingen en Antwerpen). Voor al deze gebruiksfuncties is de bodemligging belangrijk. Sedimentbeheer beïnvloedt de bodemligging en is daarmee een belangrijk instrument om de doelstellingen voor de hoofdfuncties te behalen.

Om het sedimentbeheer in de monding van de Schelde efficiënt in te zetten is er behoefte aan meer kennis, toegespitst op de vragen die vanuit beheer, beleid en omgeving worden gesteld. Zowel vanuit de VNSC (traject Agenda voor de Toekomst), de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW) en het programma Kustlijnzorg worden vragen gesteld over de werking van de monding en het gedrag van de Westerschelde op de lange termijn. De toegenomen getijslag in de (Wester)Schelde, de kans op versnelde zeespiegelstijging (ZSS) en de slechte staat van instandhouding van de Westerschelde zijn de belangrijkste aanleidingen. Deze beleids- en beheervragen zijn vastgelegd in Schrijver (2019).

1.1.3 Pilotsuppletie

Rijkswaterstaat stelt voor meer kennis te vergaren van de monding middels een programma tot 2026 waarin een pilotsuppletie met sediment in of nabij de monding een belangrijke rol speelt. Het gaat dan om maximaal 1,5 miljoen m³ sediment. Naast het toevoegen van zand aan het kustfundament¹ wordt er zo praktijkervaring opgedaan met het uitvoeren van een suppletie in de monding van een estuarium. De monitoringsresultaten beogen inzicht te geven in zowel het morfologisch functioneren als ecologisch functioneren van de Schelde-monding ten behoeve van de rekenmodellen en de algemene systeemkennis.

Voor het uitvoeren van de praktijkproef moet er een afgewogen keuze voor een geschikte suppletie locatie gemaakt worden. Naar verwachting zal deze keuze in 2020 worden gemaakt, waarna de pilotsuppletie in 2021 wordt voorbereid en in 2022 wordt uitgevoerd. In 2021 zal de T0 monitoring worden uitgevoerd. In de jaren 2022 t/m 2025 worden de morfologische en ecologische ontwikkelingen gemeten. De evaluatie van de suppletie zal in 2026 worden opgesteld.

1.2 Doelstelling

Dit rapport beschrijft de bestaande kennis en data van de waterbeweging, morfologie en ecologie van de Schelde-monding. Het heeft tot doel hiaten hierin te definiëren. Het is een aanvulling op de gebiedsbeschrijving en het data-overzicht door Van Weerdenburg & Holzhauer (2019).

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 behandelt de morfologie van de Schelde-monding. Hierbij wordt de lange-termijn morfologische ontwikkeling vanaf de Middeleeuwen besproken, omdat dat deze mede sturend is geweest voor de huidige morfologie van de Schelde-monding. Hoofdstuk 3 beschrijft de morfologische processen op basis waarvan de Schelde-monding wordt opgedeeld in vier deelsystemen die in meer detail worden behandeld. In Hoofdstuk 4 worden de ecologische aspecten van de Schelde-monding besproken. Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van beschikbare monitoringsdata. Hierna volgen de conclusies; een overzicht van de belangrijkste hiaten in de morfologisch en ecologische kennis en monitoringsdata.

1.4 Verantwoording

Dit rapport is tot stand gekomen door een samenwerking tussen Deltares en Wageningen Marine Research (WMR). Deltares heeft Hoofdstukken 1 t/m 3 en 6 voor zijn rekeningen genomen, en was verantwoordelijk voor de eindredactie. Hoofdstukken 4 en 5 zijn een Deltares – WMR coproductie.

¹ “Het kustfundament omvat het gehele zandgebied, nat én droog, dat als geheel van belang is als drager van functies in het kustgebied. Het Rijk waarborgt voor de realisatie van een duurzame veiligheid tegen overstromingen vanuit zee, dat in het kustfundament voldoende ruimte beschikbaar is en blijft voor de versterking van de zeewering.” (uit Nota Ruimte, VROM, 2004). De zeewaartse grens bestaat uit de doorgaande NAP-20 m lijn.

2 De morfologische ontwikkeling van de Schelde-monding

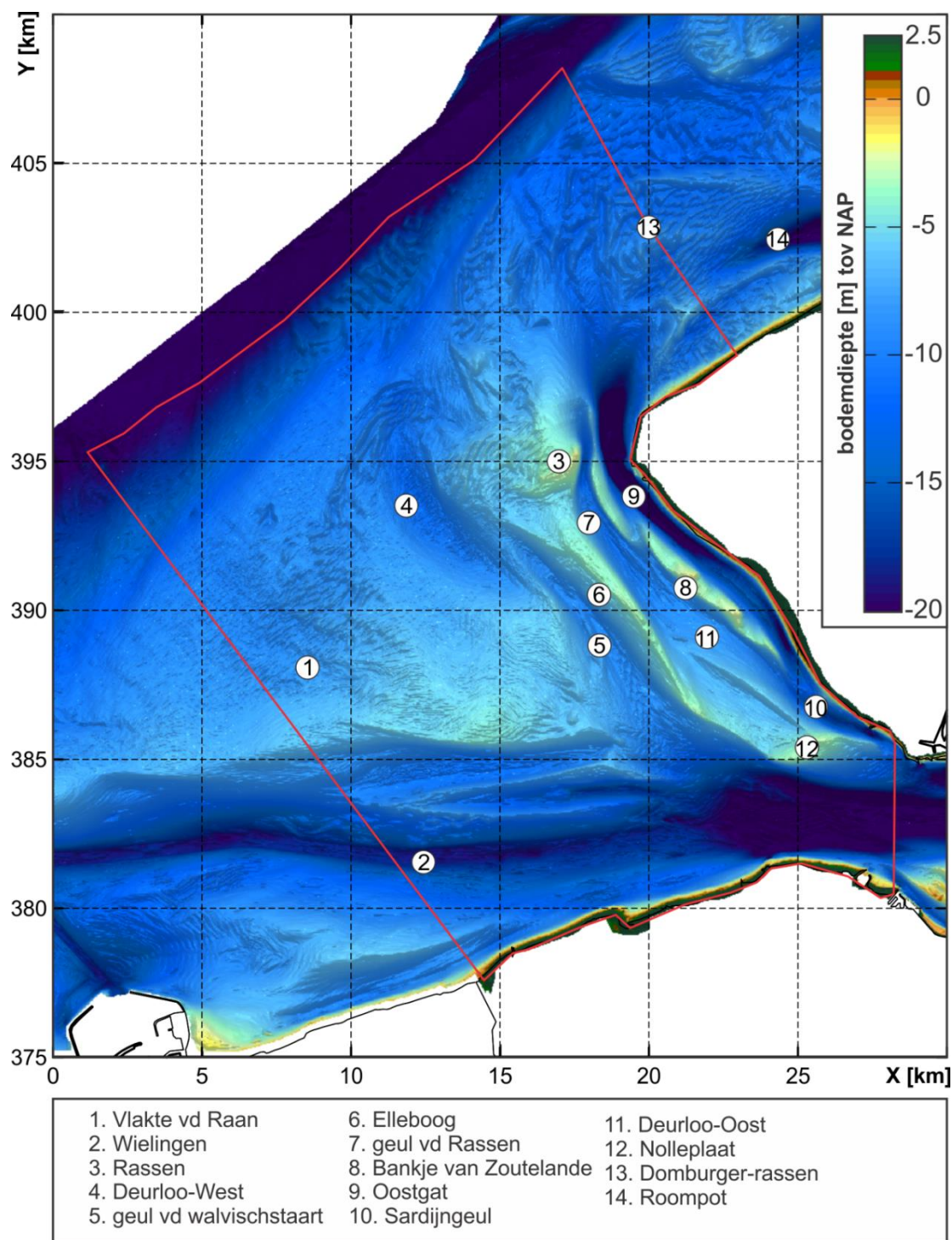
2.1 Huidige ligging van platen en geulen

Deze sectie is sterk gebaseerd op de studies van Elias & Van der Spek (2015) en Elias et al. (2016).

De huidige grootschalige morfologie van de Schelde-monding (Figuur 2.1), met de grootste getijgeul Wielingen in het zuiden en een stelsel van geulen en banken voor de zuidwestkust van Walcheren ontstond een eeuw geleden, toen de Deurloo, een geul die toen door het midden van de Vlake van de Raan liep, verzandde (Van der Spek, 1997; Van der Slikke, 1997). Dit proces was al eerder gestart en hing samen met veranderingen in het relatieve belang van de geulen, aangezien het getijprisma van de Westerschelde niet significant veranderd was (Van den Berg, 1987). Met de toename van het debiet nam de diepte van de Wielingen eveneens toe, wat bijdroeg aan de erosie van de kust van Zeeuws-Vlaanderen. De vorming van het tweegeulensysteem had grote gevolgen voor de morfologische processen in het noordelijk deel van het mondingsgebied, waar de platen en het Oostgat van vorm veranderden of zich landwaarts verplaatsten.

De Vlake van de Raan (#1 in Figuur 2.1), met een bodemligging tussen de NAP -2 en -10m, kan gezien worden als het dominante plaatgebied in de Schelde-monding. Aan de zuidzijde ligt de brede en diepe, oost-west lopende geul de Wielingen [#2]. Dit is de belangrijkste toegangsgeul voor de scheepvaart van en naar de Westerschelde en de hieraan gelegen havens. Sinds de jaren 1960 wordt de Wielingen door baggerwerkzaamheden op een diepte van circa NAP-18 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 de Deurlo-Oost [#11] en de Geul van de Rassen [#7]. In de 2010/2011 bodem ligt naast deze geulen een smal en langwerpige platencomplex Elleboog [#6] met een bodemligging tussen de NAP -2 en -3 m, die de Rassen [#3] en de Nolleplaat [#12] verbindt. Deze plaat splitst de geul Deurloo in een oostelijk [#11] en westelijk [#4] gedeelte. Het Oostgat heeft zich bij Westkapelle door contractie van de stroming rond de harde zeewering [#9] ingesneden tot een diepte van 35 m ten opzichte van NAP. Ten noorden van Westkapelle bevindt zich een ondiepe vlakte (de Domburger Rassen [#13]). Deze vlakte vormt de natuurlijke scheiding tussen de mondingsgebieden van de Oosterschelde en Westerschelde. De geul Roompot [#14] is een onderdeel van de Oosterschelde buitendelta.

Ten oosten van de lijn Vlissingen-Breskens is en wordt het morfologische gedrag sterk beïnvloed door menselijk ingrijpen, zoals het meermalen verdiepen en op diepte houden van de hoofdvaargeul in de Westerschelde ten behoeve van de scheepvaart met diverse stortstrategieën, zandwinning en inpolderingen. Een uitgebreide beschouwing van de morfologische veranderingen van de Westerschelde wordt gegeven in Cleveringa (2013) en Taal et al. (2013).



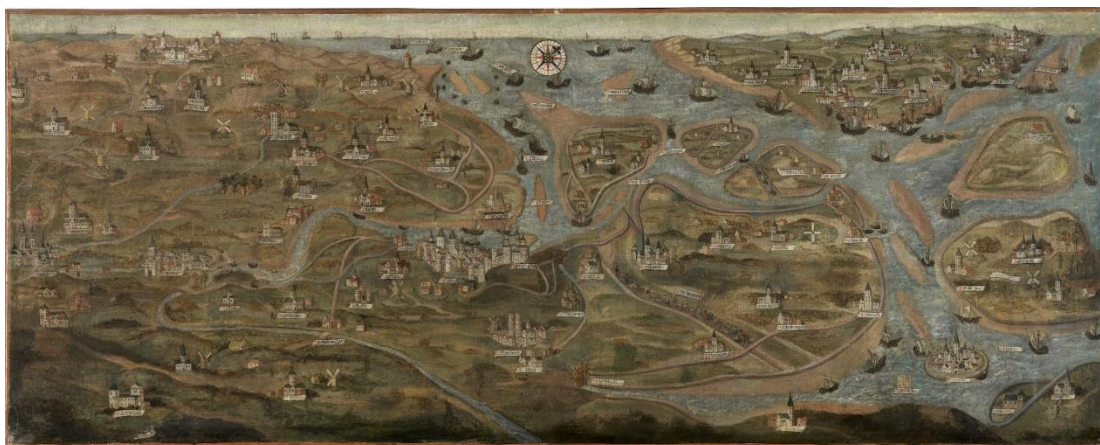
Figuur 2.1 Overzicht van geulen en platen in de Westerscheldemonding. De onderliggende bodem is gebaseerd op de 2010-2011 metingen. (figuur afkomstig uit Elias & Van der Spek, 2015)

2.2 De lange termijn ontwikkeling van de Westerschelde en het mondingsgebied

2.2.1 Inleiding

De configuratie en de dynamiek van de Westerscheldemonding wijken af van het beeld dat andere zeegaten kenmerkt. In de buitendelta's van de zeegaten in het Waddengebied, maar ook die van Oosterschelde, en Grevelingen en Haringvliet vóór de afdamming, verleggen geulen zich in een cyclisch of repeterend patroon dat samenhangt met het verplaatsen van zandbanken. Deze typische morfodynamiek herkennen we in de Westerscheldemonding alleen onder de kust van zuidwest Walcheren. In het zuidelijk deel van de monding en in het zeegat doen zich relatief langzame veranderingen voor, zonder een repeterend karakter. Wat is de oorzaak van dit verschil? Om meer inzicht te krijgen in de grootschalige dynamiek van de Westerscheldemonding over lange tijdschalen moeten we de ontwikkelingen in het historische verleden beschrijven en analyseren. Op basis hiervan kunnen we hypothesen over de sturende factoren achter de ontwikkelingen formuleren.

De Westerschelde en zijn monding zijn ontstaan in de vroege middeleeuwen. De ontwikkeling van het systeem hangt nauw samen met de ontwikkelingen in het Vlaamse kustgebied en is alleen bekend uit historische beschrijvingen. De eerste kaarten van het estuarium die een beeld schetsen van de topografie van het gebied, dateren van rond 1500. Deze kaarten laten een landschap zien dat bestaat uit bedijkte kernen omringt door op- en aanwassen² en dat is doorsneden door een netwerk van getijgeulen (Figuur 2.2).



Figuur 2.2 De Kaart van de Zwinstreek van Jan de Hervy uit 1501. Centraal in de kaart ligt de stad Brugge, die via het Zwin in verbinding staat met de zee. Rechtsboven ligt het eiland Walcheren. Het gebied tussen het Zwin en Walcheren bestaat uit een aantal eilanden, waaronder Cadzand.

De situatie in het mondingsgebied vanaf 1500 is bekend uit leeskaarten (beschrijvingen van vaarroutes en herkenningspunten langs de kust). De eerste getekende kaart die de ligging van geulen en banken laat zien is de kaart van Sgrooten die dateert van het laatste kwart van de 16^e eeuw (zie Vlam, 1940). Zeekaarten van de monding werden vanaf ca. 1600 gepubliceerd. De eerste kaart van de monding en de Westerschelde welke gebaseerd is op gedetailleerde opnamen van het gebied en betrouwbare plaatsbepaling is de kaart van de Franse hydrograaf Beautemps-Beaupré van kort na 1800.

2.2.2 Ontstaan van het estuarium en de monding in de Middeleeuwen

De Honte is van oorsprong een drainagegeul in het veengebied in het oostelijk deel van de huidige Westerschelde, die naar het noorden op de Oosterschelde afwaterde. Er was op dat moment geen verbinding met de zee, de kust was nog gesloten.

² Een opwas is een plaat die boven water uitgroeit, een aanwas is een aangroeiend deel van een bestaande kust of eiland.

De kustvlakte die de Honte van de Noordzee scheidde, overstroomde waarschijnlijk in de 4^e eeuw. In de 8^e eeuw wordt de Sinckfall (Zinkval), de voorloper van het Zwin en de Westerscheldemond, vermeld in historische bronnen. Het Zwin is aanvankelijk de belangrijkste zeearm in het gebied. De Honte breidde zich naar het westen uit en nam de rol van het Zwin geleidelijk over. Het mondingsgebied bestond uit eilanden met namen als Scorrevelde, Koesant, Wulpen en Scarphout, gescheiden door (kleine) getijgeulen. Het is niet duidelijk of het hier erosieresten van de oorspronkelijke kustvlakte of nieuwe opwassen betreft, waarschijnlijk een combinatie van beide. De eilanden verhinderen het doordringen van het getij in oostelijke richting, de erosie van de eilanden gaat gelijk op met het verder doordringen van het getij. Tussen 1000 en 1200 ontwikkelde de Honte zich over zijn gehele lengte, waarbij het zeegat verruimde.

De Honte vertoont dan inmiddels alle kenmerken van een echte zeearm, maar de getijvoortplanting wordt gehinderd door eilanden en ondiepten in monding, en drempels en platen in het estuarium. In de daarop volgende eeuwen schuren geulen verder uit, terwijl elders platen aangroeien waardoor het geulpatroon in het gebied veranderde. Tegelijkertijd breidde het bekken zich verder uit. Stormvloedden speelden hierbij een belangrijke rol. Zo ontstond en groeide de Braakman door overstromingen in 1375/1376 en de St. Elizabethsvloed van 1404³ (Gottschalk, 1955, in Van Acker, 1957).

De militaire inundaties tijdens de Tachtigjarige Oorlog bevorderden lokale erosie en vergrootten de getijdebieten vanaf het laatste kwart van de 16^e eeuw. Het mondingsgebied werd sinds de 16^e eeuw breder en dieper, waarbij eilandresten werden opgeruimd door de stroming en ondiepe zandbanken overbleven. De Westerschelde bereikte in de eerste helft van de 17^e eeuw (waarschijnlijk) zijn grootste omvang.

2.2.3 Het mondingsgebied op zeekaarten in de 17^e en 18^e eeuw

De grootschalige morfologie van de Westerscheldemonding is sinds de eerste kaarten uit het einde van de 16^e eeuw niet significant veranderd: de (hoofd)geulen en platen liggen nog steeds min of meer op dezelfde plaats. Wel zijn hun dimensies in de loop van de tijd veranderd.

De situatie in de 17^e eeuw wordt geïllustreerd door de kaart van Pieter Goos uit 1676 (*Pascaart van de Noord Zee, van Texel tot de Hoofden*), zie Figuur 2.3. Opvallend is het patroon van geulen en banken: voor de Vlaamse kust hebben geulen en banken een parallelle, zuidwest-noordoost strekking, onder de kust van Walcheren lopen de geulen (op deze kaart zonder naam) van noordwest naar zuidoost, vrijwel haaks op de andere geulen. Pal onder de kust van Vlaanderen loopt de geul Binnen Sande, de geul naar het Zwin, welke van de Wielingen gescheiden wordt door de bank 't Sand. De banken voor de monding van het Zwin zijn te beschouwen als een onderwaterdelta van deze zeearm.

³ Er was ook een tweede, in 1424; de naam Elizabethsvloed is ontleent aan de naamdag van St. Elizabeth, de dag waarop de stormvloed optrad.

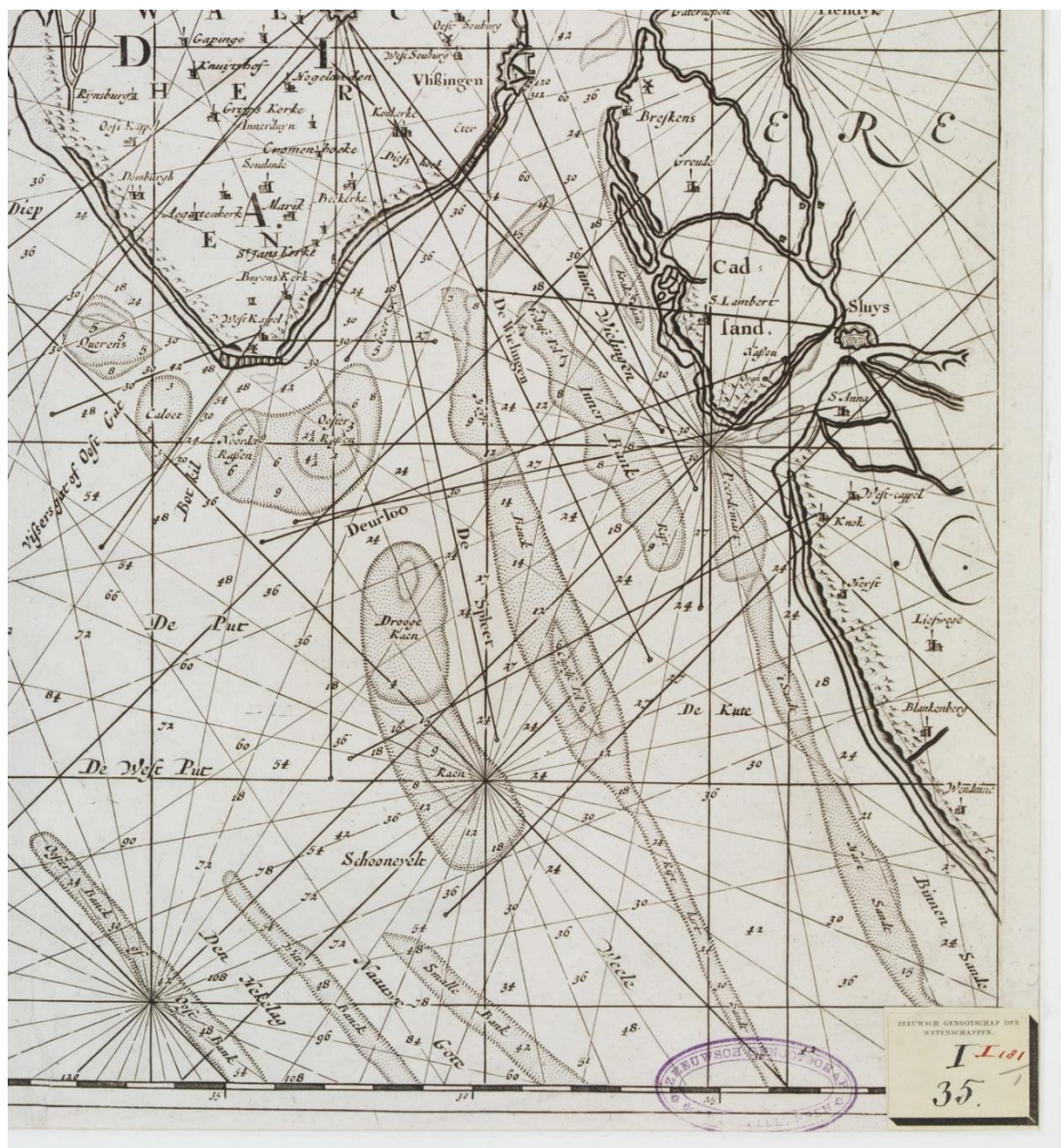


Figuur 2.3 Detail uit de Pascaart van de Noord Zee, van Texel tot de Hoofden door Pieter Goos uit 1676. Diepte aangegeven in vaders (1 Amsterdamse vadem is 6 voeten, ca. 1,7 m).

Een eeuw later, op de *Paskaart van de kusten van Zeeland* uit 1681 zien we nog steeds een vrijwel identiek patroon (Figuur 2.4). Voor de (Zeeuws-)Vlaamse kust ligt een serie evenwijdig lopende geulen en banken, van zuid naar noord de geul *Binnen Sande*, de toevoergeul naar het Zwin, de bank *Peerdemarkt*, voor de ingang van het Zwin, welke naar westen overgaat in de langgerekte bank *'t Sandt*. Naar het noorden komen achtereenvolgens voor: de geul *Inner Wielingen*, de *Inner Bank*, waarvan het oosteinde *Franse Pol* heet, en *De Wielingen* die naar het westen overgaat in *De Kute*. Noord van *De Wielingen* ligt de langgerekte *Heyst Banck* waarop in het westen de *Engelse Pol* voorkomt.

Ten noorden van de *Heyst Banck* ligt de geul *De Spleet* die naar het westen open ligt, en aldaar *Weele* heet. Ten noorden van *De Spleet* ligt het bankengebied van de *Raen* en de *Drooge Raen* ('droog' staat hier voor ondiep). De *Drooge Raen* wordt aan zijn noordoostzijde begrensd door de haaks hierop staande geul *Deurloo*. Zeewaarts van de *Raen* ligt het *Schoonevelt*, een veld 'schoon' van obstakels, dus met een vlakke zeebodem. Ten noorden van de *Deurloo* liggen de banken *Ooster Rassen*, *Noorder Rassen* en *Caloet*. De *Deurloo* wordt van het Oostgat (niet vermeld) gescheiden door het bankje *Geer*.

Deze serie van parallelle banken en geulen zien we meer dan een eeuw later terug in de opname door Beautemps-Beaupré uit 1804. Het zuidelijke deel van het mondingsgebied is relatief diep, alle grote en diepe geulen liggen hier. De strekking van de geulen en banken is WZW-ENE. Het noordelijke deel van de monding omvat grote ondieptes. De strekking van geulen en banken is hier WNW-EZE. Zie verder hieronder.

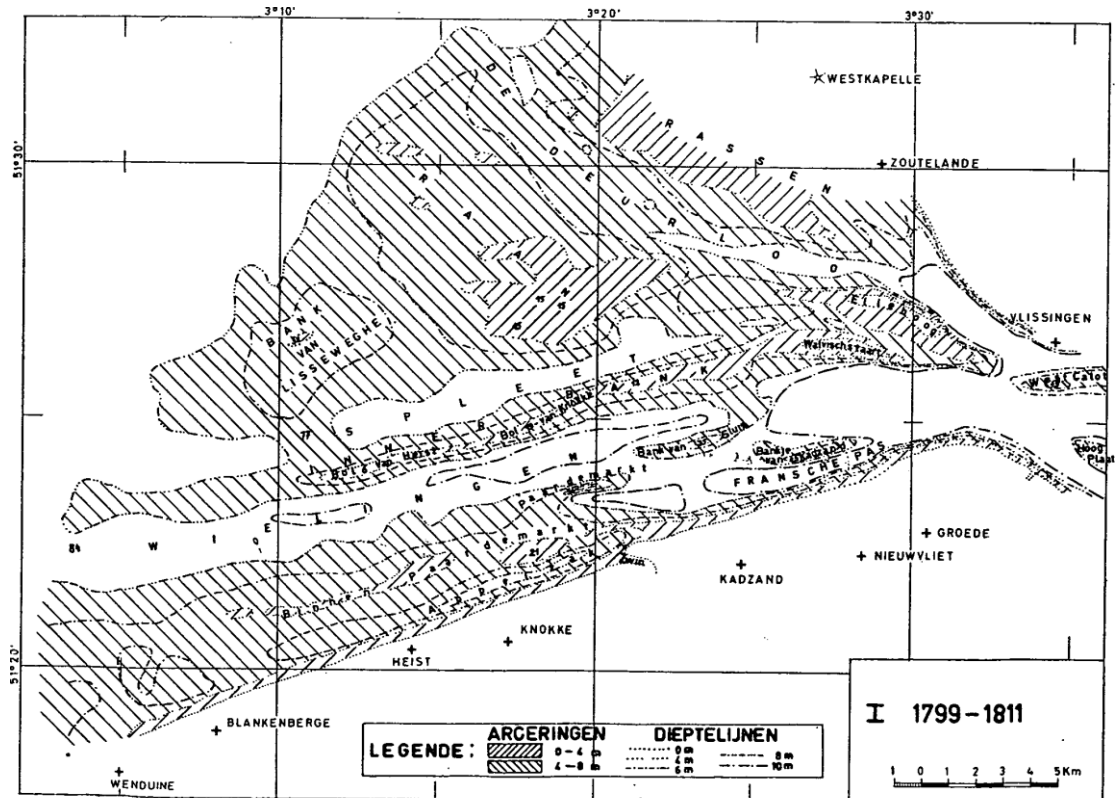


Figuur 2.4 Detail uit de Paskaart van de kusten van Zeeland, getekend door Jan Luyken en in 1681 uitgegeven door Johannes van Keulen te Amsterdam. Dieptes aangegeven in voeten (vermoedelijk Amsterdamse voeten van 0,2831 m). Noord is naar links.

2.2.4 De ontwikkeling van de Westerscheldemonding sinds 1800

De kaart van Beautemps-Beaupré is gebaseerd op een uitgebreide hydrografische opname en geeft een gedetailleerd beeld van de geulen en banken in de monding, en ook het diepteverloop. Het kaartbeeld is als volgt (zie Figuur 2.4 voor de locatie van genoemde banken en geulen): voor de kust van Vlaanderen ligt de ondiepte *Het Zand*, met daarop de banken *Binnen-Paardemarkt* en *Paardemarkt* en direct onder kust de vloedgeul *Appelzak* die naar de monding van Het Zwin loopt. Naast Het Zand ligt de vloedgeul *Wielingen* die naar het oosten verondiept en eindigt op een drempel bij de Bank van Sluis. Het Zand wordt aan de oostzijde afgesneden door de ebgeul *Fransche Pas* die ingeklemd ligt tussen de Zeeuws-Vlaamsche kust en het Bankje van Kadzand. De Inner Bank met daarop de Bol van Knokke en de Bol van Heijst en in oosten de droogvallende bank *Walvischstaart* begrenzen de *Wielingen* aan de noordzijde. Aan de andere zijde van de Inner Bank ligt de vloedgeul *Spleet* die eindigt op een ondiepe drempel tussen de droogvallende banken *Walvischstaart* en *Elleboog*. De *Elleboog* is de oostelijke punt van de ondiepte *Raen*. Ten noorden daarvan komen geulen en banken voor met een westnoordwest-oostzuidoost strekking. In

noordelijke richting achtereenvolgens de geul Deurloo, het bankengebied Rassen en de geul Oostgat (door Beutemps-Beaupré Passe de Zoutelande genoemd).



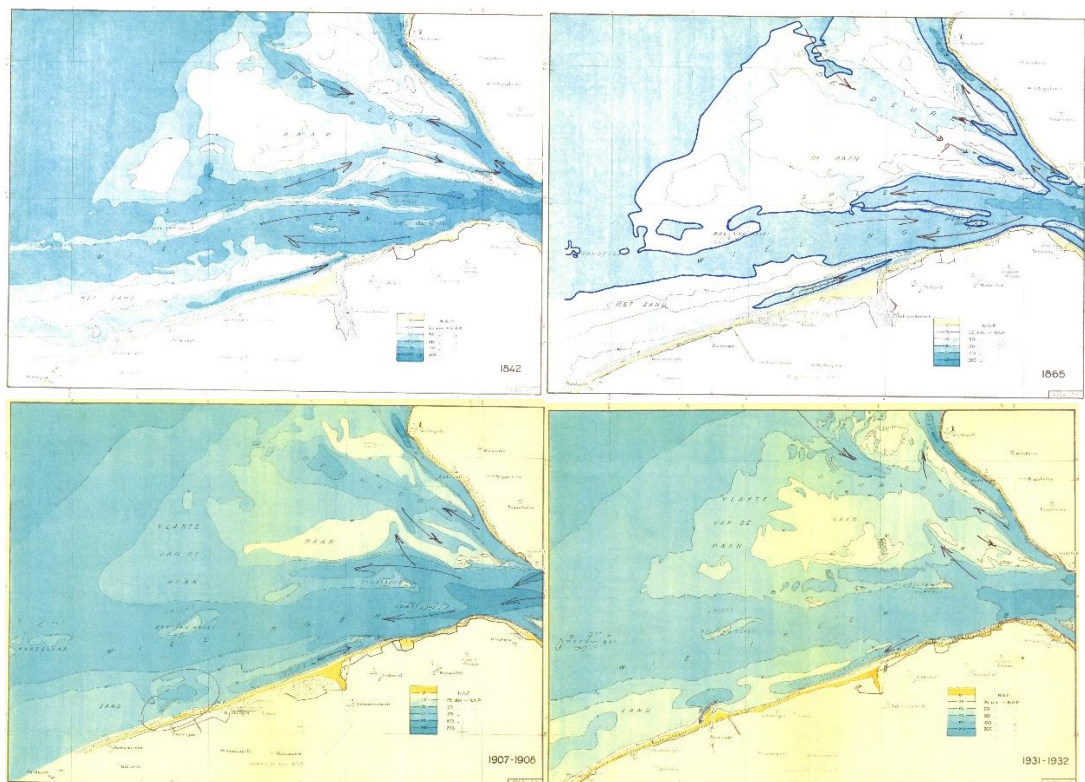
Figuur 2.4 De weergave van de kaart van Beutemps-Beaupré door Van Cauwenberghe (1966).

Van Cauwenberghe (1966) analyseerde de ontwikkeling van de monding over de periode 1800-1960 aan hand van een serie gecorrigeerde hydrografische kaarten. In de kaart op basis van de opname door Beutemps-Beaupré (1799-1801) zien we vanuit het zeegat drie ebgeulen komen, een grote centrale ebgeul, de geul Fransche Pas onder de kust van Zeeuws-Vlaanderen en een geul direct onder de kust van Walcheren bij Vlissingen (Figuur 2.4). De laatste geul komt uit Het Sloe en wordt door de plaat *West-Calot* vrijwel geheel gescheiden van de centrale ebgeul. Hij maakt connectie met de Deurloo en het Oostgat. Vanuit zee lopen er drie vloedgeulen richting het zeegat, de Wielingen, de Spleet ten noorden daarvan en de Appelzak langs de Vlaamse kust. Daar waar eb- en vloedgeulen elkaar ontmoeten ontstaat een typische interactie waarbij de geulen elkaar vermijden en drempels vormen (zie Van Veen, 1950, voor een verdere uitleg).

In de periode na 1800 (zie Figuur 4.5) breiden de geulen zich verder uit, de ebgeulen zeewaarts, de vloedgeulen landwaarts. De interactie van de eb- en vloedgeulen bepaalt in belangrijke mate de ontwikkeling van de monding. De centrale ebschaar breidt zich uit naar het westen, waarbij de geul zich tussen de banken Walvischstaart en Inner Bank, die later Het Ribzand heet, dringt. De Spleet en de banken Walvischstaart en Elleboog en de ten noorden daarvan gelegen geul Deurloo worden daarbij naar het noorden gedwongen. Het oostelijk einde van de Inner Bank verplaatst zich naar het zuiden en wordt door de naar het oosten opdringende Wielingen van vorm veranderd. De Bank van Sluis verdwijnt en verder oostelijk ontstaan de Hompels op de drempel aan het eind van de Wielingen. Deze drempel verbindt zich met het Bankje van Kadzand. Ten zuiden van het Bankje van Kadzand breidt de Fransche Pas zich in westelijke richting uit, waarbij deze geul de bank Paardemarkt van de ondiepte Het Zand afsnijdt. In het zeegat maakt de Elleboog contact met de voormalige West-Calot.

In de daaropvolgende decennia breidt de centrale ebschaar steeds verder naar het westen uit, waardoor de aangrenzende geulen en banken Spleet, Walvischstaart, Elleboog en Deurloo nog meer naar het noorden opschuiven. De Wielingen breidt verder naar het oosten, richting zeegat, uit waarbij de Hompels in een langgerekte bank veranderd worden en de connectie met het Bankje van Kadzand verloren gaat. De Fransche Pas verlengt zich naar het westen en snijdt daarbij verder in Het Zand en de bank Binnen-Paardemarkt in. De afgesnoerde bank Paardemarkt wordt langzaam aan steeds dieper.

Rond 1865 blijkt De Spleet flink ondieper en is de uitmonding tussen de banken Walvischstaart en Elleboog verloren gegaan (Figuur 2.5). Het voormalige Ribzand is dan in delen gesplitst door de uitbreidende centrale ebgeul en een nieuwe ebschaar tussen de Bollen van Heijst en Knokke in de richting van De Spleet. Deze ebschaar zal de drempel tussen de bollen steeds dieper uitschuren, de geul heeft rond 1900 een nieuwe naam: Scheur. De naam Spleet wordt dan alleen nog gebruikt voor het oostelijk deel dat verbonden is met de afgenomen centrale ebgeul. De Binnen-Paardemarkt en Het Zand worden verder aangetast door de zich verlengende ebgeul langs de (Zeeuws-)Vlaamse kust. Inmiddels is voor Vlissingen de Nolleplaat gevormd die de geul voor de kust van Walcheren vrijwel afsluit.



Figuur 2.5 De ontwikkeling van geulen en platen in de Westerscheldemonding tussen 1842 en 1931-1932. De afgebeelde kaarten zijn van 1842, 1865, 1907-1908 en 1931-1932. Zie tekst voor beschrijving van de veranderingen (bron: Rijkswaterstaat, zonder jaar).

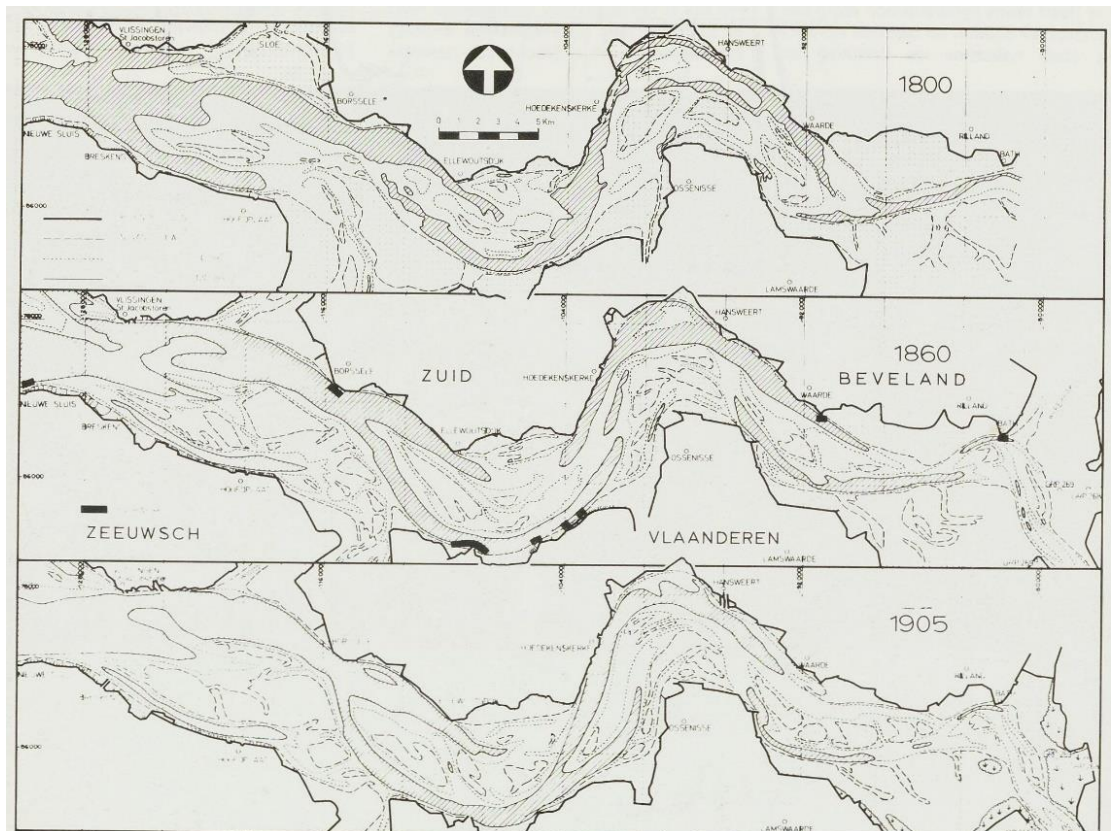
Rond 1900 lijkt de Wielingen een ebgedomineerde geul geworden te zijn die daarna alleen maar groter en dieper wordt (NB dit geldt vooral voor oostelijk deel, zie profiel in Zuurdeeg, 1974). Hetzelfde geldt voor Het Scheur. Het Bankje van Kadzand is dan los van de Sluissche Hompels en ook de Paardemarkt (voorheen Binnen-Paardemarkt) wordt steeds verder opgeruimd. Een nieuwe geul vormt zich vanuit de centrale ebgeul door de bank Walvischstaart naar het noorden. De aanleg van de havendam van Zeebrugge in het begin van de 20^e eeuw creëert luwte aan zijn oostzijde, wat leidt tot aanzanding in het westelijk deel van de Appelzak.

In de jaren '30 van de vorige eeuw is de Wielingen een grote, diepe geul waaruit de banken (Paardemarkt, Bankje van Kadzand) vrijwel verdwenen zijn. Het Scheur is eveneens een diepe geul zonder uitgesproken eb- of vloedschaarkarakter geworden. De Appelzak is aan zijn oostzijde doorgebroken naar de Wielingen en is daarmee een ebgeul geworden. In de daarop volgende decennia breidt de Geul van de Walvischstaart verder naar het noorden uit en maakt uiteindelijk contact met de Deurloo. In diezelfde periode verondiept de Spleet aanzienlijk en moet baggeren van de drempel tussen Wielingen en Scheur het belang van de laatste doen toenemen.

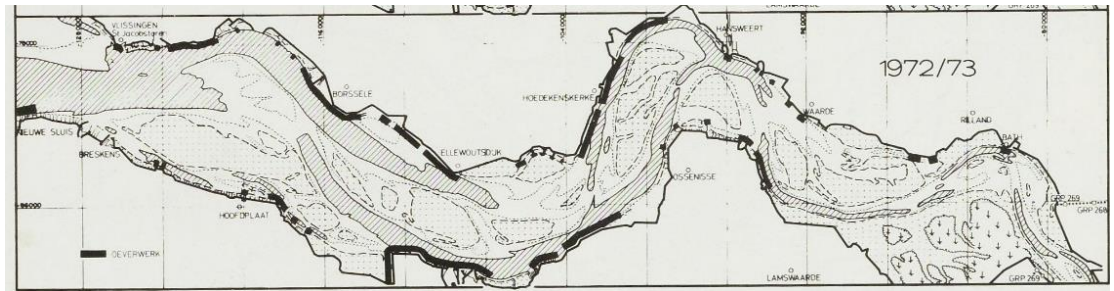
2.2.5 Samenhang tussen de ontwikkelingen in de Westerschelde en de monding

Tegelijk met de ontwikkeling in het geulpatroon in het westelijk deel van de Westerschelde zien we iets verder zeewaarts de eerder beschreven westwaartse uitbreiding van de centrale ebgeul, die de Spleet naar het noorden drukt en daarmee de reorganisatie ontwikkeling van het geul- en bankenpatroon in de monding initieert. De vraag is nu hoe deze ontwikkelingen samenhangen.

De belangrijkste lange termijn ontwikkeling in de Westerschelde vanaf de 17^e eeuw is de verlanding van de zijtakken Sloe, Braakman, Hellegat, Saeftinghe en Kreekrak. Opslibbing van schorren tot boven GHW maakt bedijking en daarmee terugwinning van het in eerdere eeuwen verloren land mogelijk.



Figuur 2.5 De morfologische ontwikkeling van de Westerschelde tussen 1800 en 1905. (bron: Zuurdeeg, 1974).



Figuur 2.6 De Westerschelde in 1972/1973. (Bron: Zuurdeeg, 1974).

Het is wederom de kaart van Beautemps-Beaupré uit begin 19^e eeuw die voor het eerst een duidelijk beeld schetst van de morfologie van het systeem. De geulen in het estuarium vormen nog niet de latere doorgaande ebgeul met de daar vanaf takkende vloedscharen, zie Figuur 2.5, situatie 1800. Ter hoogte van de Braakman bevindt zich een uitgestrekt bankengebied dat als onderwaterdelta van deze zijtak beschouwd kan worden (Rijkswaterstaat, 1944, p. 3). Ook elders komen uitgestrekte platen voor. Tussen Vlissingen en Breskens zien we een drietal vloedgeulen vanuit de monding komen, een schaar die voor Vlissingen rechtstreeks naar het Sloe loopt en door de West-Kaloot vrijwel geheel afgescheiden is van de rest van de monding, de schaar Vaarwater langs de Hoofdplaat onder de kust van Zeeuws-Vlaanderen, de hoofdgeul naar de Braakman, en een centrale vloedgeul die eindigt in de platen bij Ellewoutsdijk. De ebgeul Pas van Terneuzen komt hier zijdelings in uit.

In de daarop volgende decennia treden er aanzienlijke veranderingen op in deze situatie (zie Figuur 2.5, situatie 1860). Het Vaarwater langs de Hoofdplaat verondiept en de banken ter hoogte van de Braakman worden flink kleiner, door de verlanding en het inpolderen van de Braakman. Hierdoor kan de Pas van Terneuzen, die inmiddels verder is uitgebocht en tegen de oever bij Terneuzen ligt, stroomafwaarts migreren. Ook aan de noordzijde is de situatie aanzienlijk veranderd. De vloedgeul richting het Sloe is verdwenen, de West-Kaloot is weggeërodeerd door de naar het noorden uitbochtende Honte en ter hoogte van Vlissingen ontwikkelt zich een drempel, de Nolleplaat, die de uitloop van Deurloo en Oostgat vrijwel afsluit. Tussen Vlissingen en Breskens heeft zich een nieuwe vloedschaar ontwikkelt, de Schaar van Spijkerplaat. De ebgedomineerde Honte ontwikkelt zich tot de hoofdgeul in dit gebied, door de uitbochteling naar het noorden is de uitstroom meer naar het zuidwesten gericht. De belangrijkste ontwikkelingen na 1900 zijn de voortgaande uitbochteling van de Honte naar het noorden waardoor de Spijkerplaat kan vormen, verdere verlanding gevolgd door de afsluiting in 1950 van de Braakman en de inpoldering van het Sloe. Het geulpatroon tussen Vlissingen en Breskens is daarmee aanzienlijk vereenvoudigd.

2.2.6 Conclusie en hypothese

Het patroon van geulen en platen in de monding van de Westerschelde is eeuwenlang stabiel. Tegelijk met de opkomst van de Honte als belangrijkste ebgeul tussen Vlissingen en Breskens in de eerste helft van de 19^e eeuw, die bovendien naar het zuidwesten gericht is, zien we de ontwikkeling van de centrale ebschaar verder zeewaarts in de monding (zoals beschreven in paragraaf 4.4), die de herschikking van geulen en platen in de monding in gang zet. Het ligt voor de hand dat de ontwikkeling van deze ebschaar in gang gezet is door de opkomst van de Honte in het zeegat. Dit betekent dat ontwikkeling van het geulensysteem in het westelijk deel van Westerschelde als gevolg van de verlanding van met name de zijtakken Sloe en Braakman, de oorzaak is van de herschikking van het patroon van geulen en platen in het mondingsgebied. Een serie historische kaarten van de (westelijke) Westerschelde en de monding die de samenhang van de ontwikkelingen in beide gebieden laat zien, ontbreekt op dit moment.

Op basis van de lange termijn ontwikkelingen van de Westerschelde en zijn monding kunnen we als hypothese stellen dat door de verlandings- en bedijking van de zijtakken de ebstroming dominant werd waardoor het patroon van geulen en banken in de monding veranderde. Simulatie met een numeriek model (Van der Spek, 1993; 1997a) liet zien dat door het afnemen van het bergend oppervlak van de zijtakken vanaf 1650 de getijstroming en waterstanden op de lijn Vlissingen-Breskens meer in fase komen; de stroomkenteringen vallen korter na hoog- en laagwater, de ebperiode wordt korter en de maximale ebdebieten treden eerder op, bij hogere waterstanden. Het verschil tussen de maximale vloed- en ebsnelheden wordt kleiner. Dit betekent dus dat de ebstroming in het westelijk deel van de Westerschelde belangrijker wordt. Dat ondersteunt bovenstaande hypothese.

Een hierboven geschetste samenhang tussen de ontwikkelingen in Westerschelde en monding is eerder gesuggereerd (o.a. door Van der Spek, 1997b; Brand, 2016) maar niet in detail onderbouwd. De hypothese kan getoetst worden door simulatie van het effect van de morfologische ontwikkelingen in het estuarium op de waterbeweging en morfodynamiek in de monding. De aanpassing van met name het geulpatroon in het proximale deel⁴ van de monding zal vertraagd zijn door het voorkomen van erosieresistente lagen in geringe diepte in de ondergrond.

2.3 Morfologische veranderingen 1964-2011

Deze sectie is sterk gebaseerd op de studies van Elias & Van der Spek (2015) en Elias et al. (2016).

Menselijk ingrijpen heeft 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 diepte van de geulen beïnvloedt ook de grootschalige voortplanting van het getij en de door getijasymmetrie bepaalde residuele sedimentimport of -export.

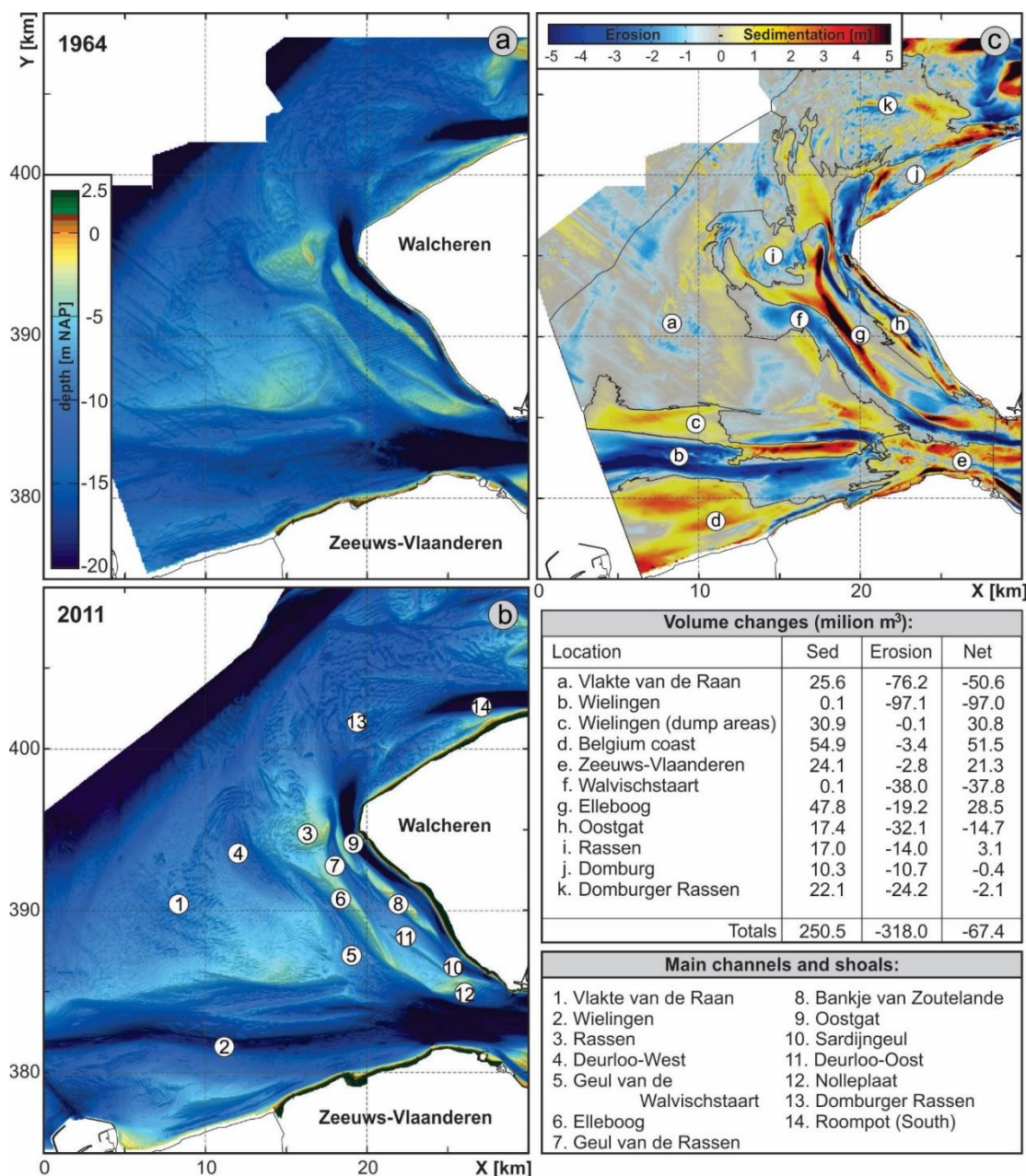
In Figuur 2.7c is duidelijk te zien dat de Wielingen sterk verdiept is. De oorzaak hiervan is baggeren. Aan weerszijden van de geul is lokaal de hoogte toegenomen op de stortlocaties. Voor de kust van zuidwest Walcheren is vooral de interactie van de geulen Oostgat en Sardijngeul met de kustbeschermingsconstructies van belang. Harde verdedigingswerken beschermen zowel de noord- als zuidzijde bij Westkapelle en Vlissingen. Deze harde constructies vormen 'ophangpunten' waaromheen contractie van stroming de geulen lokaal zeer diep heeft uitgeschuurd. In de periode 1964-2011 bedroeg de verdieping enkele meters per jaar (zie Figuur 2.7c). 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 Westkapelse 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 noordwestkust van Walcheren beschermd door harde constructies. Ten noorden 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.

Het tweegeulenstelsel is stabiel gebleken gedurende de afgelopen 50 jaar (Figuur 2.7), ondanks de afsluiting van de Oosterschelde met een stormvloedkering en grootschalige ingrepen in de Westerschelde, waar meer dan 400 miljoen m³ sediment is verplaatst middels baggeren en storten en waar 114 miljoen m³ zand is gewonnen in de periode 1955-2004⁵ (Haecon, 2006). De

⁴ Het deel van de monding het dichtst bij de lijn Vlissingen-Breskens gelegen.

⁵ Vanaf 2010 is de zandwinning afgebouwd en in 2014 is er voor het laatst zand gewonnen in de Westerschelde (Van Leeuwen, 2013).

belangrijkste veranderingen in de monding tussen 1964 en 2011 voltrokken zich in en langs de geulen. De diepte van de Wielingen nam toe, met name door baggeren in zowel de geul zelf als in de Westerschelde. Het verdiepen van de drempels in de Westerschelde heeft de hydraulische efficiëntie en het getijprisma vergoot. Zo nam als gevolg van de 1^e verruiming in de jaren 1970 het getijprisma toe met 5 tot 7% (Gerritsen & De Jong, 1983). Zie Van der Slikke (1997), Van Enckevoort (1996), Cleveringa (2006) en Cleveringa (2008) voor uitgebreide beschrijvingen van de veranderingen.



Figuur 2.7 Details van de bodem van de Westerscheldemonding in 1964 (a) en 2011 (b) en overzicht van de totale volumeverandering in geselecteerde polygonen over de periode 1964- 2011 (c). (figuur afkomstig uit Elias et al., 2016)

De toegenomen diepte in de Wielingen zal bijgedragen hebben aan de bovengenoemde veranderingen voor de kust van zuidwest Walcheren (Van den Berg, 1987). Daar liggen drie evenwijdige geulen, Oostgat, Geul van de Rassen-Deurloo Oost en Deurloo West-Geul van de Walvischstaart, gescheiden door twee bankengebieden. De zandbanken Bankje van Zoutelande,

Rassen-Elleboog en Nolleplaat, in 1964 nog aparte banken, zijn aan elkaar gegroeid en vormen één langgerekt geheel (Figuur 2.1). Ten zuidwesten van deze banken ligt de Geul van de Walvischstaart (#5 in Figuur 2.1), welke in diepte en lengte is toegenomen. Tussen de banken en kust van Walcheren ligt het Oostgat min of meer stabiel in positie, (deels) door het voorkomen van Tertiaire en Pleistocene erosiebestendige lagen in de oever van Walcheren (Van der Spek, 1997). Het Oostgat is over zijn gehele lengte iets verdiept, zijn uitstroom voor de kop van Walcheren verplaatste zich verder noordwaarts. De positie van het Oostgat direct voor de zuidwestkust van Walcheren leidde tot erosie van de stranden en vooroever van het eiland, wat regelmatige zandsuppleties nodig maakte. Voortgaande erosie van de geulwand zal op termijn leiden tot instabiliteit van vooroever en het lage strand en uiteindelijk tot verdwijnen van het strand. Een grote geulwandsuppletie (2,8 miljoen m³ in 2005, uitgebreid met 6,3 miljoen m³ in 2009) stabiliseert de vooroever en heeft de geulas zeewaarts verplaatst (Nederbragt & Koomans, 2006; Dekker, 2012).

De Vlake van de Raan, centraal gelegen tussen de Wielingen en het geul-plaat systeem voor de kust van Walcheren, erodeert, waarbij de zeewaartse rand langzaam landwaarts opschuift.

De sedimentatie-erosiepatronen in Figuur 2.7c geven de morfologische veranderingen over de periode 1964-2011. In totaal verliest de Schelde-monding over deze periode zand. De 'ruwe' bodemverandering (ongecorrigeerd voor baggeren, storten en suppleties) vertoont een verlies van 67 miljoen m³ binnen het getoonde balansgebied. Het bepalen van de sedimentbalans van de Schelde-monding 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.

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 voornamelijk door baggeren (polygoon B, 97 miljoen m³). Een gedeelte van dit gebaggerde sediment wordt ten noorden van de Wielingen gestort (31 miljoen m³; polygoon C in Figuur 2.7c). Richting de Westerschelde (ten oosten van de Wielingen) vindt er vooral aanzanding plaats. In totaal vindt hier in de polygoon van de Westerschedemonding (polygoon E, Zeeuws-Vlaanderen) 21 miljoen m³ aan netto sedimentatie plaats. Netto sedimentatie in de Westerschedemonding 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 is het Oostgat over vrijwel de gehele lengte dieper geworden (polygoon H, 15 miljoen m³ erosie). Sterke sedimentatie vindt plaats langs de Geul van de Walvischstaart waardoor de langwerpige bank Elleboog met 28,5 miljoen m³ in volume toeneemt en nu bijna een verbinding tussen de Rassen en Nolleplaat vormt (polygoon G in Figuur 2.7c). De Geul van de Walvisstaart is hierbij sterk verdiept (38 miljoen m³ erosie) en noordwestelijk uitgebreid (polygoon F in Figuur 2.7c). De Vlake van de Raan vertoont netto een volume afname van 51 miljoen m³ (polygoon A). Deze afname vindt met name plaats aan het front van de buitendelta dat langzaam landwaarts opschuift, maar ook het centrale gedeelte lijkt overwegend iets dieper te worden.

Er bestaan verschillende hypothesen met betrekking tot de sedimenttransportpatronen die deze sedimentatie-erosie patronen 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 circulatiecel, wat mogelijk een verklaring geeft voor de aanwezigheid en stabiele positie van het Bankje". Dit concept sluit op hoofdlijnen aan bij de geschatte transportrichtingen gebaseerd op de dominante bodemvormen. 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. Van der Slikke (1999) heeft laten zien dat de morfologische veranderingen op de Walcherse kust zelfs tijdens stormen relatief klein zijn. Dit duidt erop dat de kustachteruitgang samenhangt met continue processen (zoals getij) en niet met incidentele stormcondities. Croqué (1998) concludeert juist dat er duidelijke veranderingen in het Oostgat optreden tijdens stormen.

3 Morfologische processen Schelde-monding

3.1 Grootschalige waterbeweging

Golven en getij zijn de belangrijkste aandrijvende krachten van sedimenttransport en morfologische verandering in de Schelde-monding. De belangrijkste kenmerken van beide worden hieronder kort beschreven, met verwijzingen voor meer achtergrondinformatie.

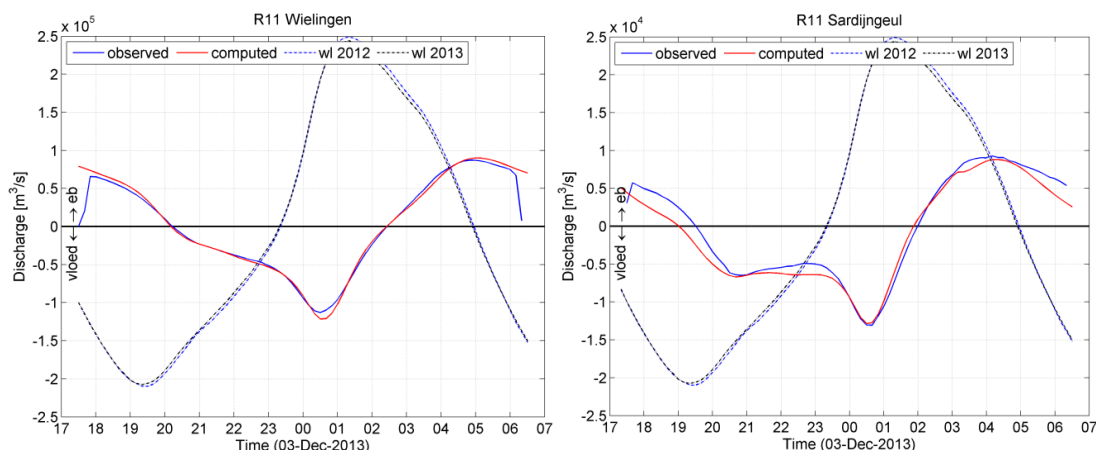
3.1.1 Getij

Het getij plant zich in de Noordzee vanuit het zuiden voort in noordelijke richting langs de Zeeuwse en Hollandse kust, waarbij de amplitude geleidelijk afneemt. Naast dit kustlangse getij plant het kustdwarse getij zich voornamelijk via de Wielingen voort richting de Westerschelde. Door de trechtersvorm van het mondingsgebied slingert het getij op. Zo bedraagt de gemiddelde getijslag bij Westkapelle ca. 3.2 m en bij Vlissingen ca. 3.7 m (Nolte, 2011).

Door de interactie van het kustlangse (noord-zuid) en het kustdwarse (west-oost) getij ontstaan er twee hoofdstroomrichtingen in de monding: in west-oost-richting (Scheur-Wielingen) en in noordwest-zuidoost-richting langs de Walcherse kust (Oostgat en Sardijngeul). De stroming in de Wielingen wordt voornamelijk aangedreven door waterstandsverschillen als gevolg van het faseverschil tussen het getij op zee en in de keel van het estuarium. De stroming in het Oostgat wordt niet alleen aangedreven door het faseverschil, maar ook beïnvloed door de gradiënt in getijslag. Hierdoor is de waterstand tijdens hoogwater groter in Vlissingen dan in Westkapelle en zorgt het verhang voor een stroming in noordwestelijke richting, terwijl het omgekeerde plaatsvindt tijdens laagwater.

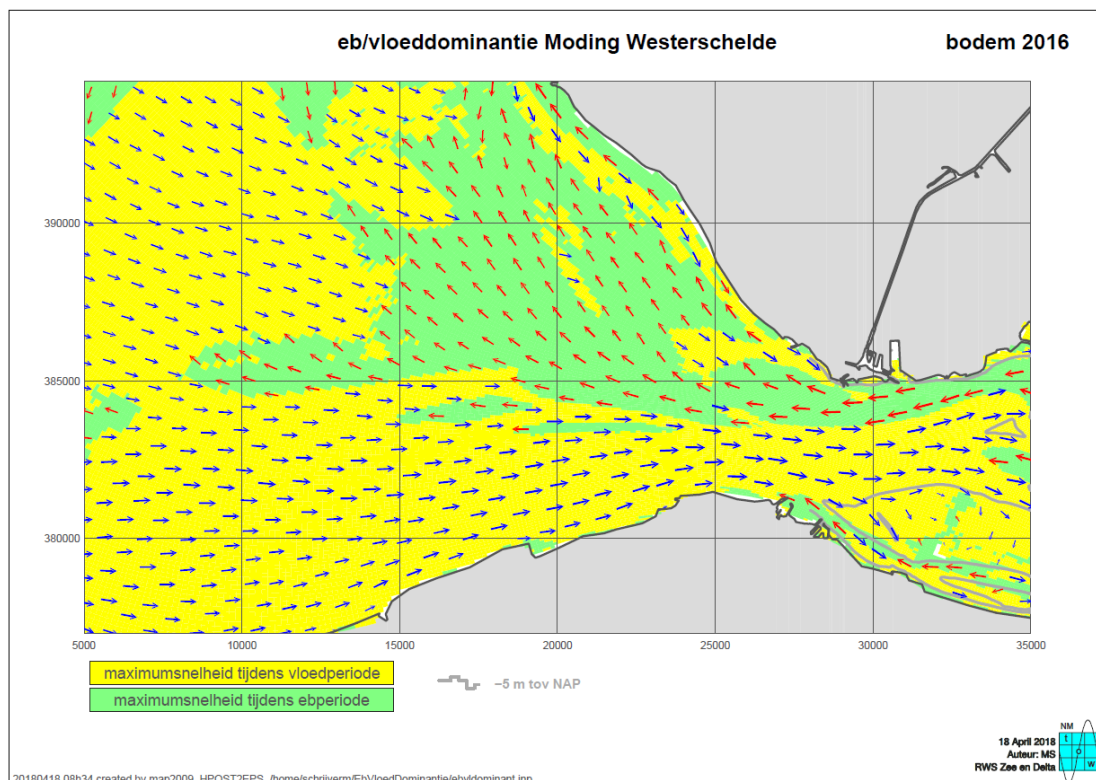
De Wielingen is vooral belangrijk voor de instroom van de Westerschelde, terwijl de uitstroming vooral bepaald wordt door de Vlakte van de Raan en het Oostgat (Poortman, 2013); zie verder Bijlage A.

De waterstanden in de Schelde-monding zijn over het algemeen vloeddominant, i.e. de vloedperiode korter is dan de ebperiode. Aangezien tijdens eb en vloed dezelfde hoeveelheid water de Westerschelde in- en uitstroomt (de kleine rivierafvoeren negerend), betekent dit over het algemeen relatief grotere piek vloeddebieten (zie Figuur 3.1).



Figuur 3.1 Gemeten (in 2012, blauw) en berekend (in 2013, rood) debiet op Raai 11. Raai 11 bestaat uit de Wielingen (links) en de Sardijngeul (rechts), zie voor de ligging Figuur 5.1. Met gestippelde lijnen is de gemeten waterstand bij Vlissingen aangegeven tijdens de meetperiode (14 Nov 2012, blauw) en tijdens de modelperiode (3 Dec 2013, zwart). (figuur afkomstig uit Vroom et al., 2015)

Afhankelijk van de waterstand en de bodemligging, kan dit ook grotere piek vloodsnelheden betekenen. Figuur 3.2 toont de eb- en vloeddominantie in de Schelde-monding op basis van berekende maximale diepte-gemiddelde stroomsnelheden. Een schalingspijl ontbreekt, maar de snelheidsvectoren zijn wel op schaal. Deze figuur laat zien dat in de Wielingen en in het westelijk deel van de Vlake van de Raan de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheden optreden tijdens de vloedfase van het getij (vloeddominant), terwijl in het oostelijk deel van de Vlake van de Raan en het Oostgat de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheden optreden tijdens de eb fase van het getij (ebdominant).

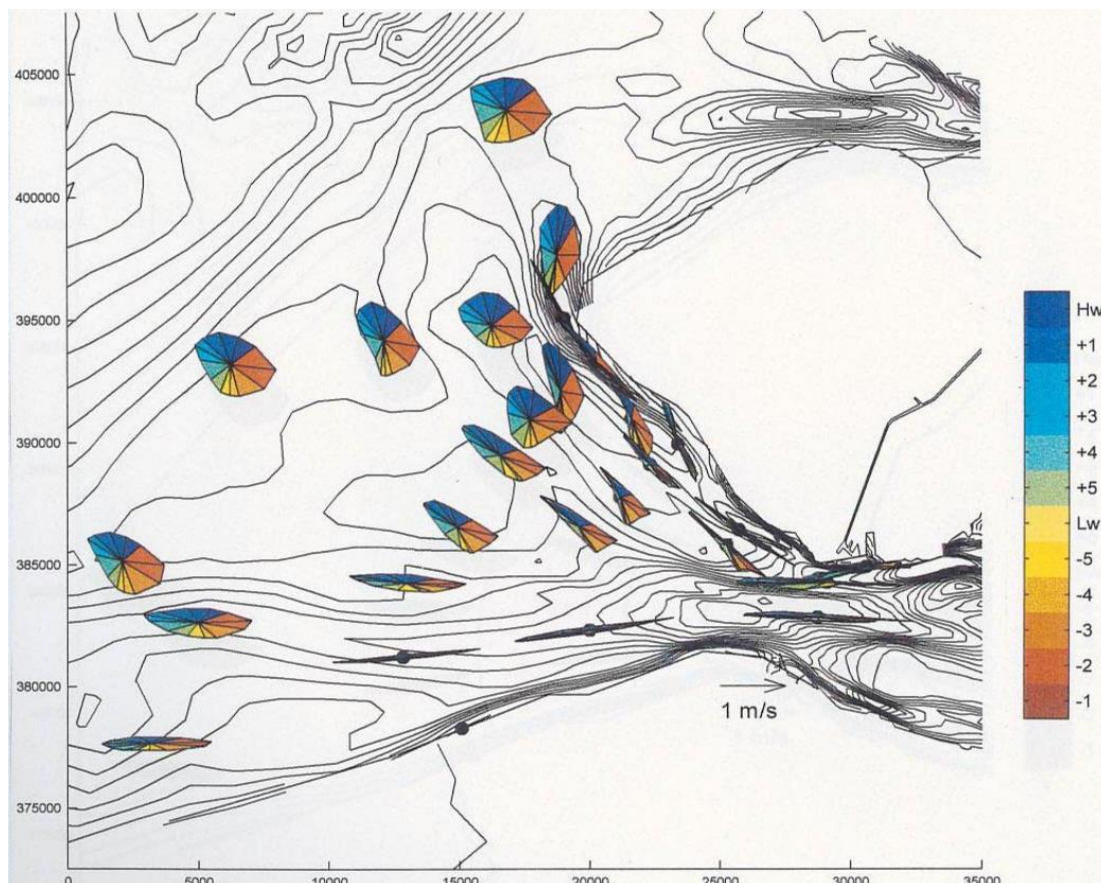


Figuur 3.2 Eb- en vloeddominantie in termen van pieksnelheden op basis van Scalwest-2000 modelberekeningen voor het “standaardgetij” van 4 juli 2000. Modelbodem is gebaseerd op bodemdata uit 2016. (figuur afkomstig van Marco Schrijver, Rijkswaterstaat)

In de monding bedragen de piek stroomsnelheden 1-1,5 m/s (Figuur 3.3). In de geulen zoals de Wielingen en het Oostgat heeft de stroming een dominante, geulparalelle stroomrichting, wat zich uit in platte stroomrozen⁶. Op andere plekken, zoals de Vlake van de Raan, zijn de stroomrozen nagenoeg rondvormig; er is geen dominante stroomrichting. De stroomsnelheden zijn met pieken van ~1 m/s lager dan in de geulen, maar opvallend hoog gezien de geringe waterdiepte. Deze figuur laat ook zien dat de stroomsnelheid ca. 1 uur voor loopt in fase vergeleken met de waterstand. Dit betekent dat de maximale vloodsnelheid ongeveer 1 uur voor het hoogwater (HW) optreedt.

Uit metingen van Plancke et al. (2014) op de Vlake van de Raan en de overgang naar de Geul van de Walvischstaart (locaties VvdR, GvW1 en GvW2 in Figuur 5.1) blijkt dat hier geen sprake was van een echte kentering. De minimale stroomsnelheden bedroegen nog steeds 30-40 cm/s (zie ook Figuur 3.17). Tijdens de kentering was er eerder sprake van het geleidelijk draaien van de stroming, zonder dat de stroming echt terugviel.

⁶ In een stroomroos wordt de richting en de grootte van de stroomsnelheid voor elk uur worden uitgezet met vectoren.



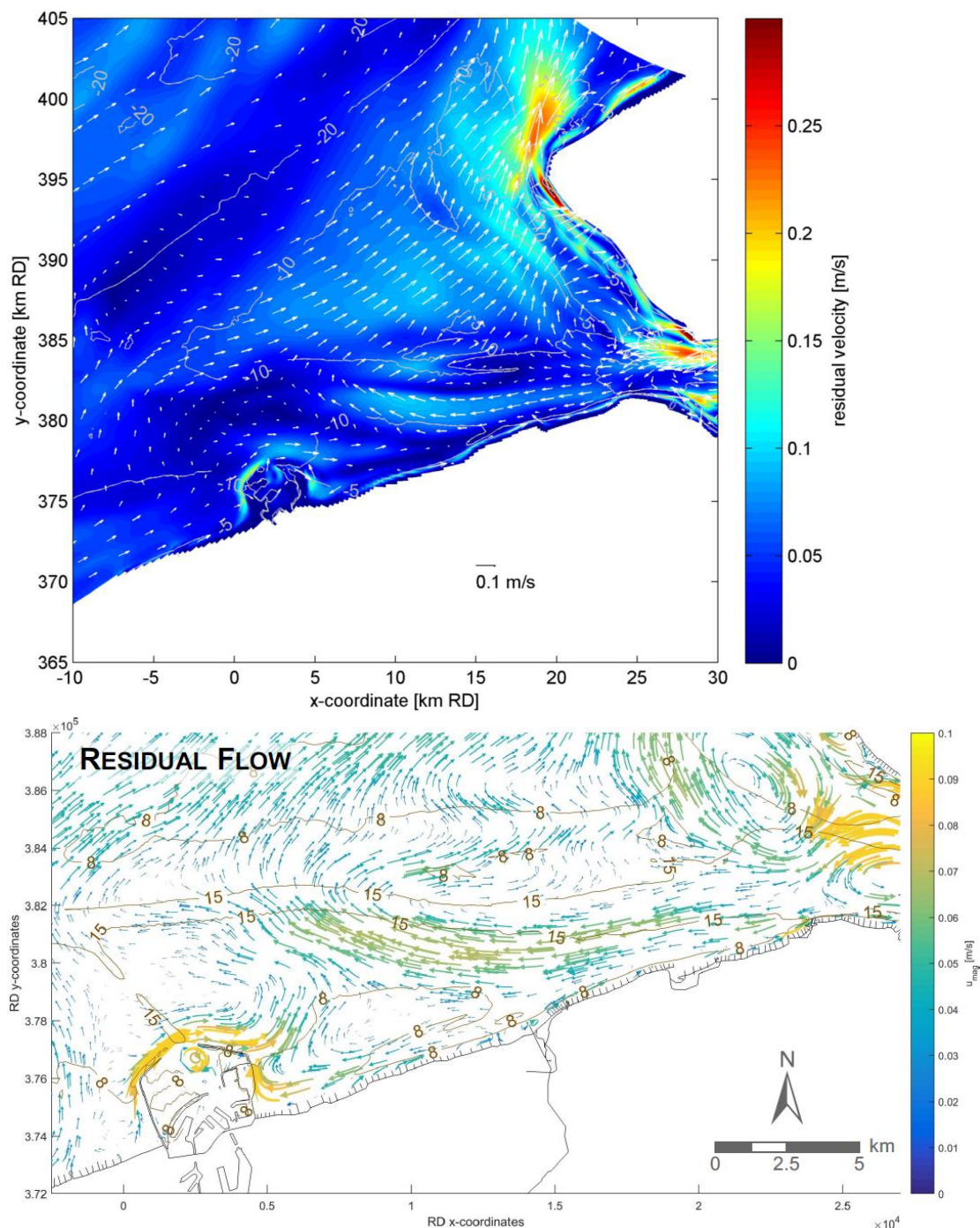
Figuur 3.3 Stroomrozen berekend met het Kuststrookmodel van Rijkswaterstaat door Svasek. De kleur geeft de tijd in uren aan ten opzichte van hoogwater (HW). Dit is waarschijnlijk het hoogwater bij Vlissingen. (figuur afkomstig uit Steijn & Van Der Spek, 2005)

3.1.2 Golven en stormopzet

De golven komen voornamelijk uit het westen tot zuidwesten en hebben een gemiddelde significante golfhoogte (H_s) van 1,3 m. Bij stormen kunnen de golfhoogtes oplopen tot ca. 6 m. Tijdens stormen wordt het water door de wind en drukverschillen omhooggestuwd. Deze stormopzet kan meer dan 2 m bedragen. De hoogst gemeten waterstand bedroeg NAP+4,55 m bij Vlissingen gedurende de 1953 storm, omdat de stormopzet samenviel met springtij. Onder gemiddelde condities is het belang van golven beperkt tot vooral opwoeling. Tijdens stormen kunnen golven wel breken op de ondieptes zoals Vlakte van de Raan en het Bankje van Zoutelande. Golven genereren langs de (Zeeuws-)Vlaamse en Walcherse kust (ondieper dan ca. NAP -5 m) een brandingsstroom die door de aanwezige paalrijen onderbroken wordt (zie Steijn & Van der Spek, 2005).

3.1.3 Residuele stroomsnelheden

In de residuele (getijgemiddelde) snelheid is de invloed van de bodemligging en de geometrie te herkennen, zoals de contractie bij de havendammen van Zeebrugge en bij Westkapelle en de circulatie rondom het Bankje van Zoutelande (Figuur 3.4).



Figuur 3.4 Berekende residuele snelheden met het Delft3D-NeVla model (boven; op basis van twee springtij-doodtij cycli in augustus 2014; modelberekeningen zonder golven) en het Delft3D-VlaBa model (onder; berekend over de representatieve periode 14-03-2017–13-05-2017 met golven) (figuren afkomstig uit Vroom et al., 2005 en Röbbke et al., 2018)

Deze residuele snelheden zijn typisch $\sim 0,1$ m/s en dus een orde van grootte kleiner dan de pieksnelheden. Lokaal kunnen de residuele stromingen hoger zijn, zoals in de Honte en het Oostgat. De getoonde berekeningen zijn gedaan met twee Delft3D modellen. De belangrijkste verschillen tussen deze modellen zijn het wel/niet meenemen van golven, het rekenrooster en een andere simulatieperiode. De gelijkaardige residuele stroombeelden geven vertrouwen in de representativiteit ervan, en in de betrouwbaarheid van de modellen. De Wielingen is ebdominant in termen met residuele snelheden, in tegenstelling tot op basis van de pieksnelheden (Figuur 3.2).

3.1.4 Koppeling waterbeweging en sedimenttransport

Het getij en de golven zijn de belangrijkste krachten achter het sedimenttransport in de Schelde-monding.

De invloed van de golven wordt in belangrijke mate bepaald door de relatieve golfhoogte, H_s/d met H_s de significante golfhoogte en d de waterdiepte. Dit betekent dat onder gemiddelde omstandigheden met $H_s = 1\text{--}1,5$ m golven nauwelijks invloed hebben op het sedimenttransport in de getijgeulen. In de ondiepere gebieden, zoals de Vlake van de Raan, dragen ze bij aan de opwoeling van het sediment. Bij de kust, in de brandingszone, generen golven een langsstroming en langstransport. Golfscheefheid, met relatief hogere kustwaartse en lagere zeewaartse snelheid, in combinatie met het niet-lineaire karakter van sedimenttransport zorgt over het algemeen voor kustwaartse netto sedimenttransport. Bij stormen, met golven tot 6 m, reikt de invloed van de golven veel dieper. Er kan dan ook een sterk zeewaartse retourstroming ontstaan bij de kust (*undertow*) die sediment zeewaarts transporteert.

De invloed van het getij kan goed begrepen worden door aan te nemen dat het sedimenttransport instantaan reageert op de snelheid tot de macht 3, i.e. $q_s(t) \sim u^3(t)$. Dit is een erg simpel model, waarin veel processen niet mee worden genomen. Als deze vergelijking uitgewerkt voor een snelheid met een netto (getijgemiddelde) en een oscillerende (getijvariërende) component, dan blijken er drie bijdragen te zijn aan het netto zandtransport (zie Van der Werf et al, 2020):

1. Zandtransport volledig bepaald en in de richting van de getijgemiddelde snelheid.
2. Zandtransport volledig bepaald door getijvariërende snelheid, en in de richting van de grootste snelheid (getijasymmetrie).
3. Een combinatieterm: zand opgewoeld door de getijvariërende snelheid en getransporteerd door de getijgemiddelde stroming.

Dit betekent dat niet op voorhand óf de residuele snelheid óf getijasymmetrie (in termen van snelheden) representatief zijn voor het netto sedimenttransport. Beide spelen een rol.

Voor fijn sedimenttransport (slib) is hiernaast de duur van de kentering een belangrijke parameter. Het gaat dan met name om het verschil in de duur van de HW en LW kentering. Als de HW kentering langer duurt dan de LW kentering heeft sediment meer tijd heeft om tijdens HW uit te zakken dan tijdens LW, wat leidt tot een netto transport in vloedrichting.

Daarnaast dragen wind- en dichtheidsgedreven stroming bij aan het sedimenttransport. Het eerste is vooral belangrijk in ondiepe gebieden, en de subtiele dichtheidsgedreven stroming is vooral belangrijk voor fijn sediment c.q. slib (zie Vroom et al., 2016).

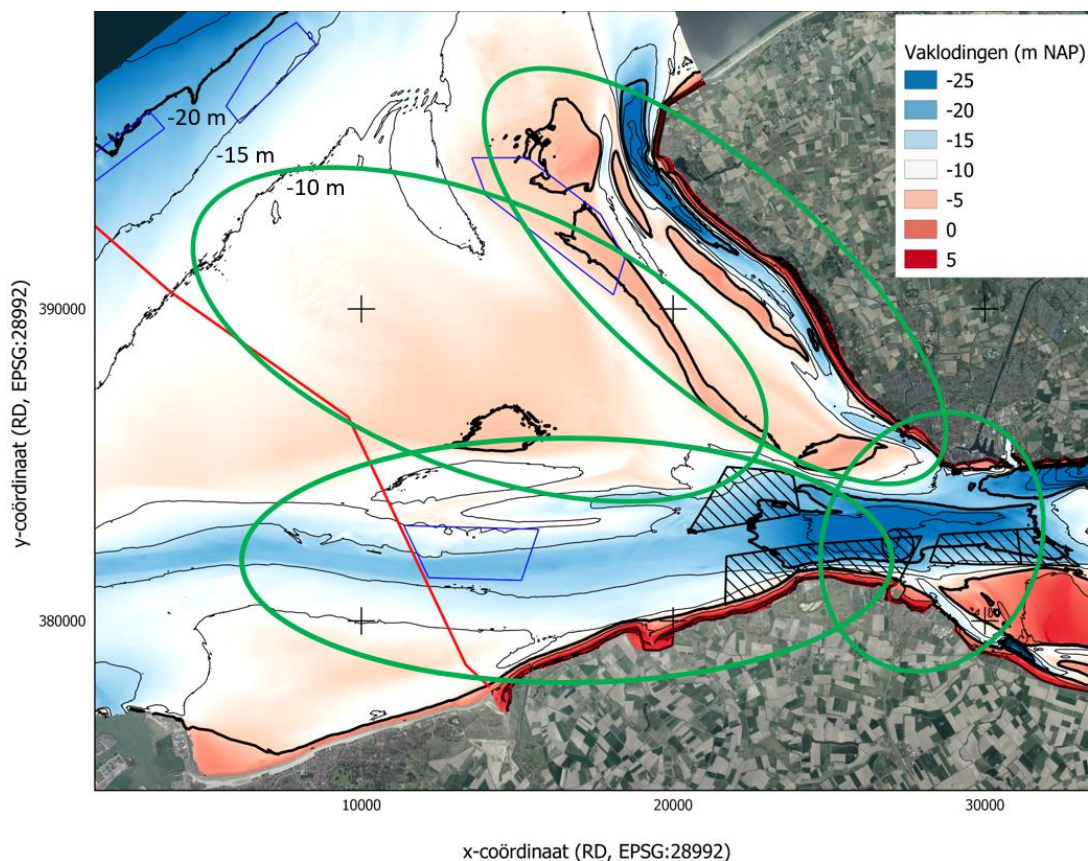
Tot slot speelt de aanbod van sediment op de bodem een rol. Op sommige plekken in de Schelde-monding liggen harde lagen waardoor sedimenttransport (lokaal) beperkt wordt (zie Rübke et al, 2018). Rondom Zeebrugge ligt een Holoceen slibbron alsook stortgebieden waar fijn sediment uit de haven van Zeebrugge en de omliggende vaargeulen wordt gestort. Dit geeft lokaal een verhoging van de slibtransporten (zie Vroom et al., 2016).

3.2 Vier deelsystemen

Op basis van de morfologie en dominante morfodynamische processen kan de Schelde-monding worden ingedeeld in vier deelsystemen (Figuur 3.5):

1. Noord: plaat-geul systeem rondom Oostgat/Sardijngeul. De geulen worden gedomineerd door het getij, terwijl voor de plaatdynamiek ook de golfwerking een belangrijke rol speelt. De kust van Walcheren is erosief en wordt op zijn plek gehouden door kustverdediging, strandsuppleties en, meer recent, geulwandsuppleties.

2. Centraal: Vlakte van de Raan. Deze ligt relatief stabiel, en golven spelen hier een relatief belangrijke rol. Deze wordt doorsneden door (oude) getijgeulen, zoals Deurloo West, Geul van de Walvischstaart en Spleet.
3. Zuid: (Zeeuws-)Vlaamse kust en Appelzak. Het is niet geheel duidelijk in welke mate golven en getij van belang zijn. Er is hier een belangrijk rol weggelegd voor sedimentbeheer en menselijke ingrepen: de haven van Zeebrugge, kustverdediging, het onderhoud van de vaargeulen en het storten van het gebaggerde sediment en kustverdediging.
4. Oost: instroming Westerschelde. Het bestaat uit de getij-gedomineerde geulen Wielingen-Honte en Schaar van de Spijkerplaat die de samenhang tussen de Schelde-monding en de Westerschelde bepalen, zoals de netto sedimentuitwisseling.

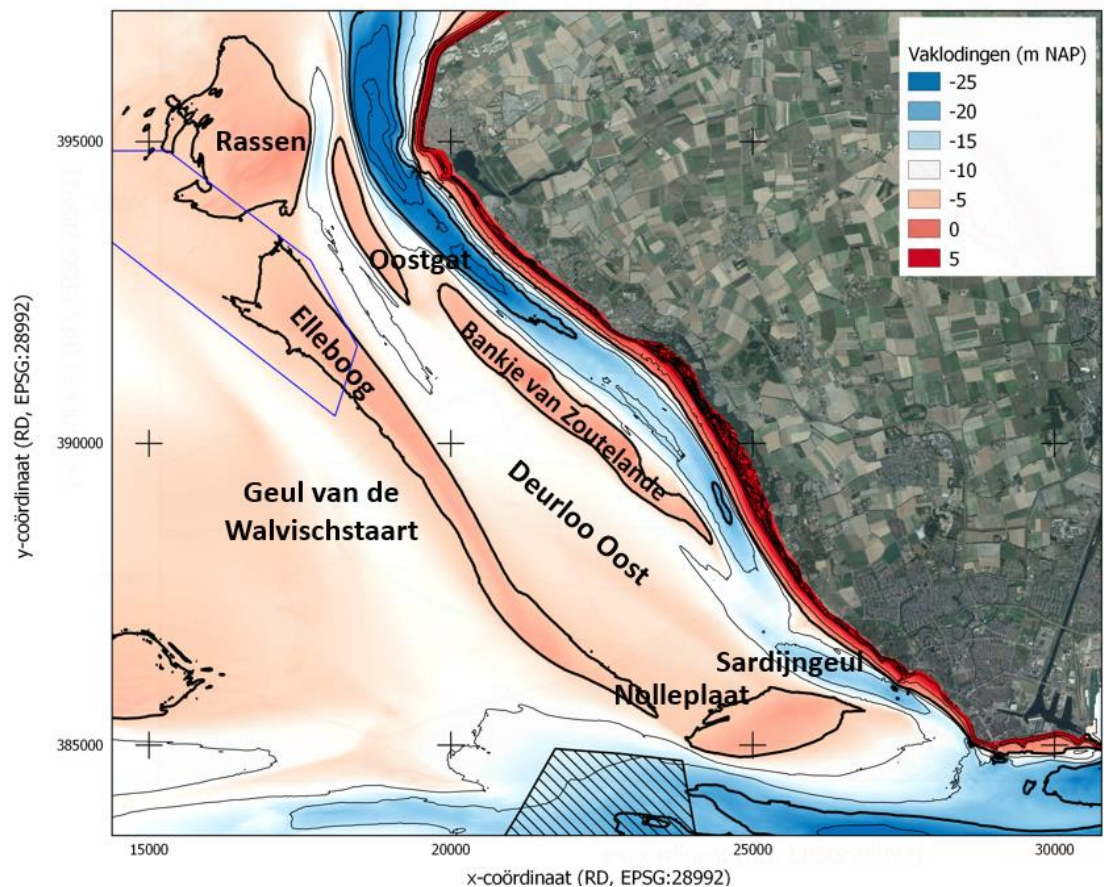


Figuur 3.5 Indeling Schelde-monding in vier deelsystemen: 1) Noord: plaat-geul systeem rondom Oostgat/Sardijngeul, 2) Centraal: Vlakte van de Raan, 3) Zuid: (Zeeuws-)Vlaamse kust en Appelzak en 4) Oost: instroming Westerschelde. Rode lijn: grens Nederland-België, blauwe polygonen: visserijgebieden, met diagonale lijnen gearceerde polygonen: ankergebieden.

De onderstaande paragrafen beschrijven resultaten van bestaande morfologische studies gericht op deze vier deelsystemen. Hierbij is dankbaar gebruik gemaakt van de Beheerbibliotheek van Walcheren (Mastbergen et al., 2017) en Zeeuw-Vlaanderen (Kuiper et al., 2016) bevatten uitgebreide beschrijvingen van deze kustvakken ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust.

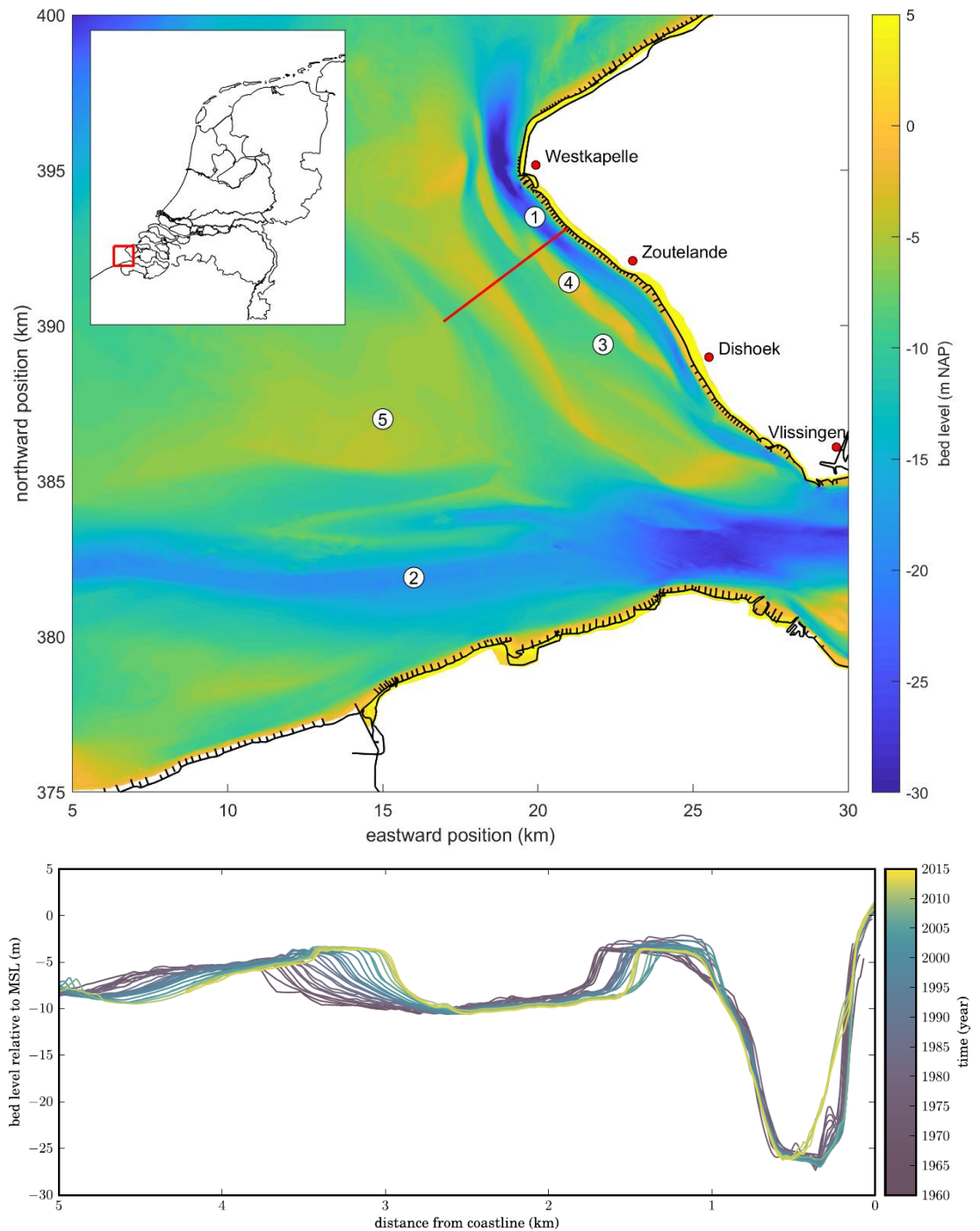
3.3 Noord: plaat-geul systeem rondom Oostgat/Sardijngeul

Het noordelijk deelgebied van de Schelde-monding beslaat het plaat-geul systeem rondom Oostgat/Sardijngeul (Figuur 3.6).



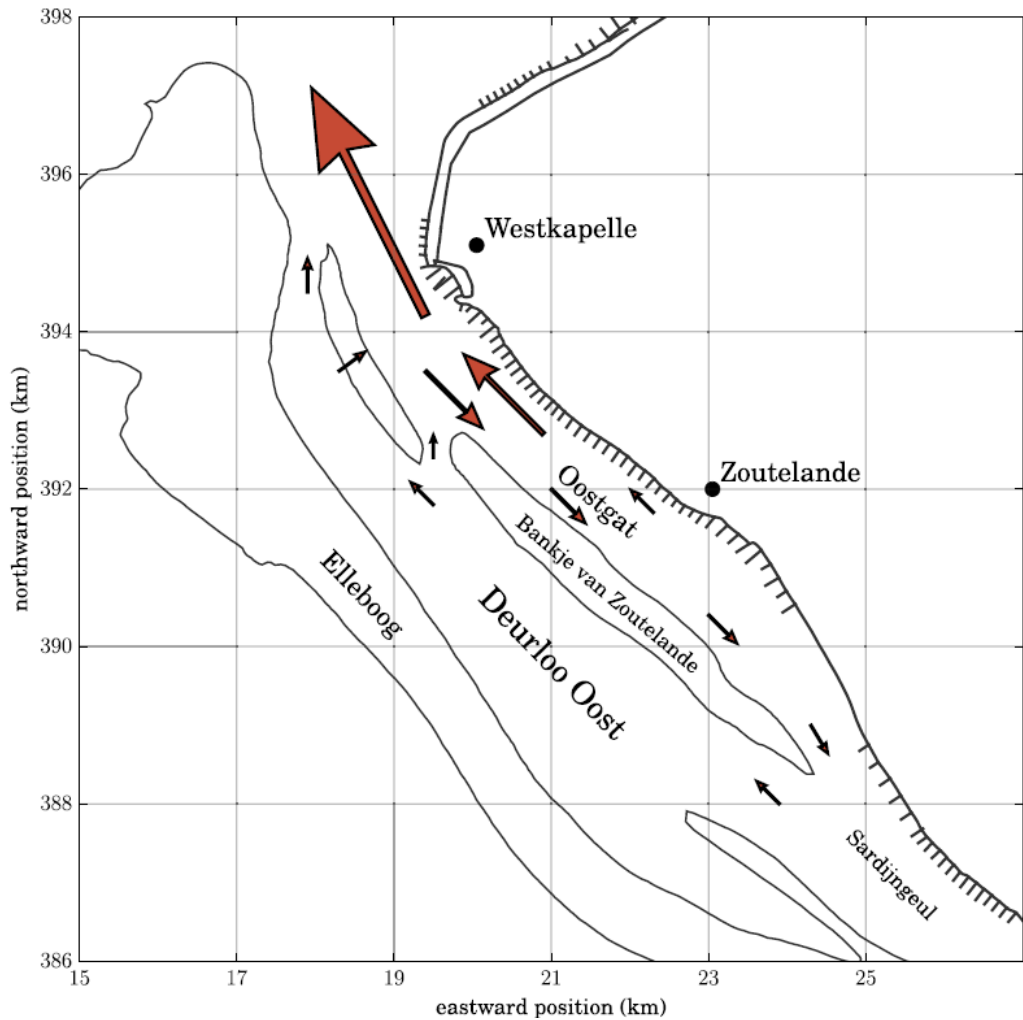
Figuur 3.6 Het noordelijk deelgebied van de Schelde-monding: plaat-geul systeem rondom Oostgat/Sardijngeul. Blauwe polygoon: visserijgebied, met diagonale lijnen gearceerde polygoon: ankergebied.

De ondiepte Elleboog, getijgeul Deurloo en het Bankje van Zoutelande migreren in landwaartse, noordoostelijke richting (Figuur 3.7). De Elleboog wordt eveneens hoger. De Elleboog “schuift” Deurloo-Oost voor zich uit waardoor het Bankje van Zoutenlande van achteren wordt aangetast en smaller wordt. Pas de laatste jaren wordt het Bankje weer iets breder. Ook de landwaartse geulwand van het Oostgat (gedeelte tussen ca. NAP -5 m en NAP -15 m) verplaatst zich langzaam, ca. 0,2 m/jaar, in deze richting. De landwaarts verplaatsing van het Oostgat wordt vertraagd door geulwandsuppleties (2005, 2009) en moeilijk-erodeerbare bodemlagen. In vergelijking met de meer zeewaartse delen van het profiel, liggen het Oostgat en de oostelijke rand van het Bankje van Zoutelande relatief stabiel, mogelijk omdat de landwaartse rand van het Oostgat nauwelijks meer kan opschuiven door moeilijk-erodeerbare bodemlagen en kustverdedigingswerken.



Figuur 3.7 Morfologische ontwikkeling van JARKUS raai 2408, van 1960 tot 2013. De rode lijn in de bovenste figuur geeft de ligging van de raai aan. (figuren afkomstig uit Van der Werf et al., 2020)

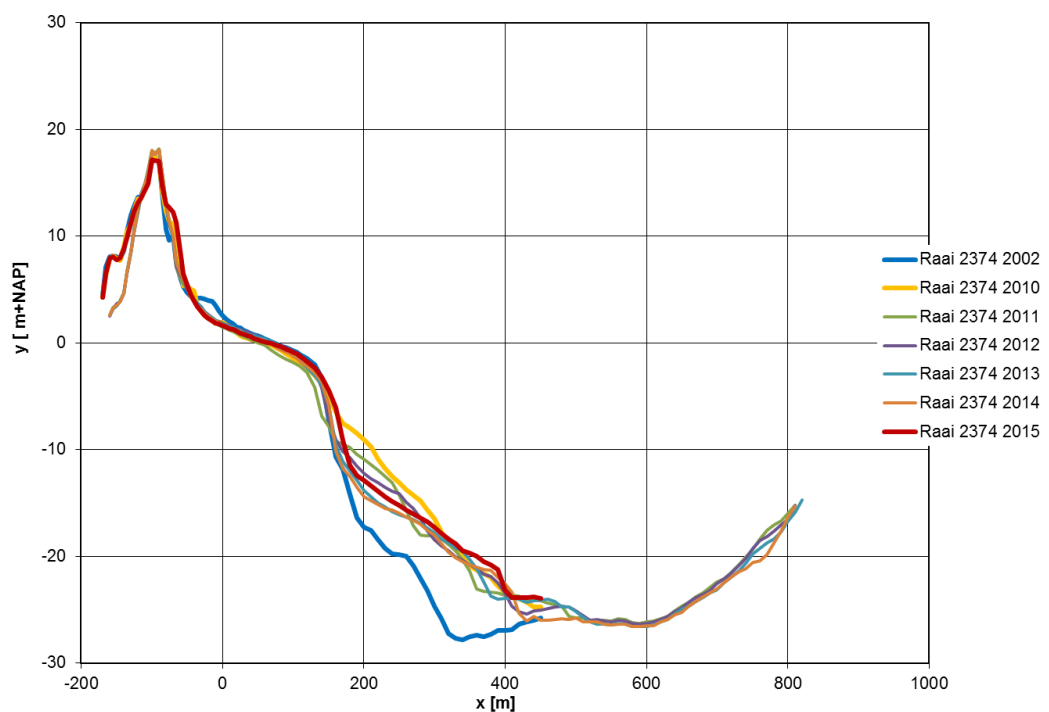
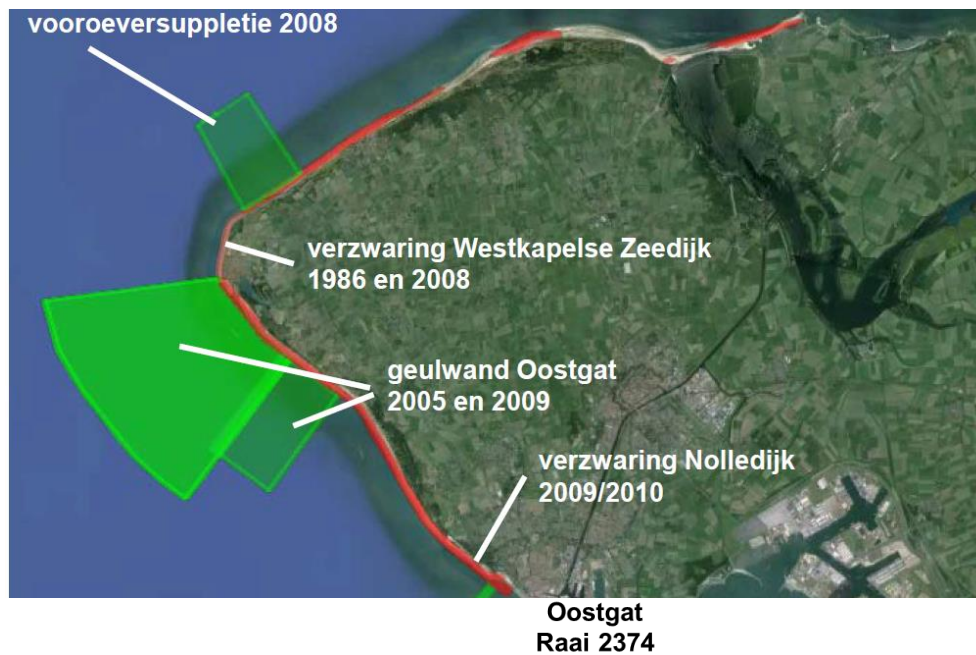
Op basis van Delft3D zandtransportberekeningen (forcering door getij, golven en wind) hebben Van der Werf et al. (2020) een schematische weergave gemaakt van het netto zandtransport rondom het Oostgat (Figuur 3.8). Zij concluderen dat de erosie tussen Zoutelande en Westkapelle hoofdzakelijk wordt veroorzaakt door een toenemend getij-gedreven transport in ebrichting, met een beperkte rol voor het Bankje van Zoutelande en golfwerking.



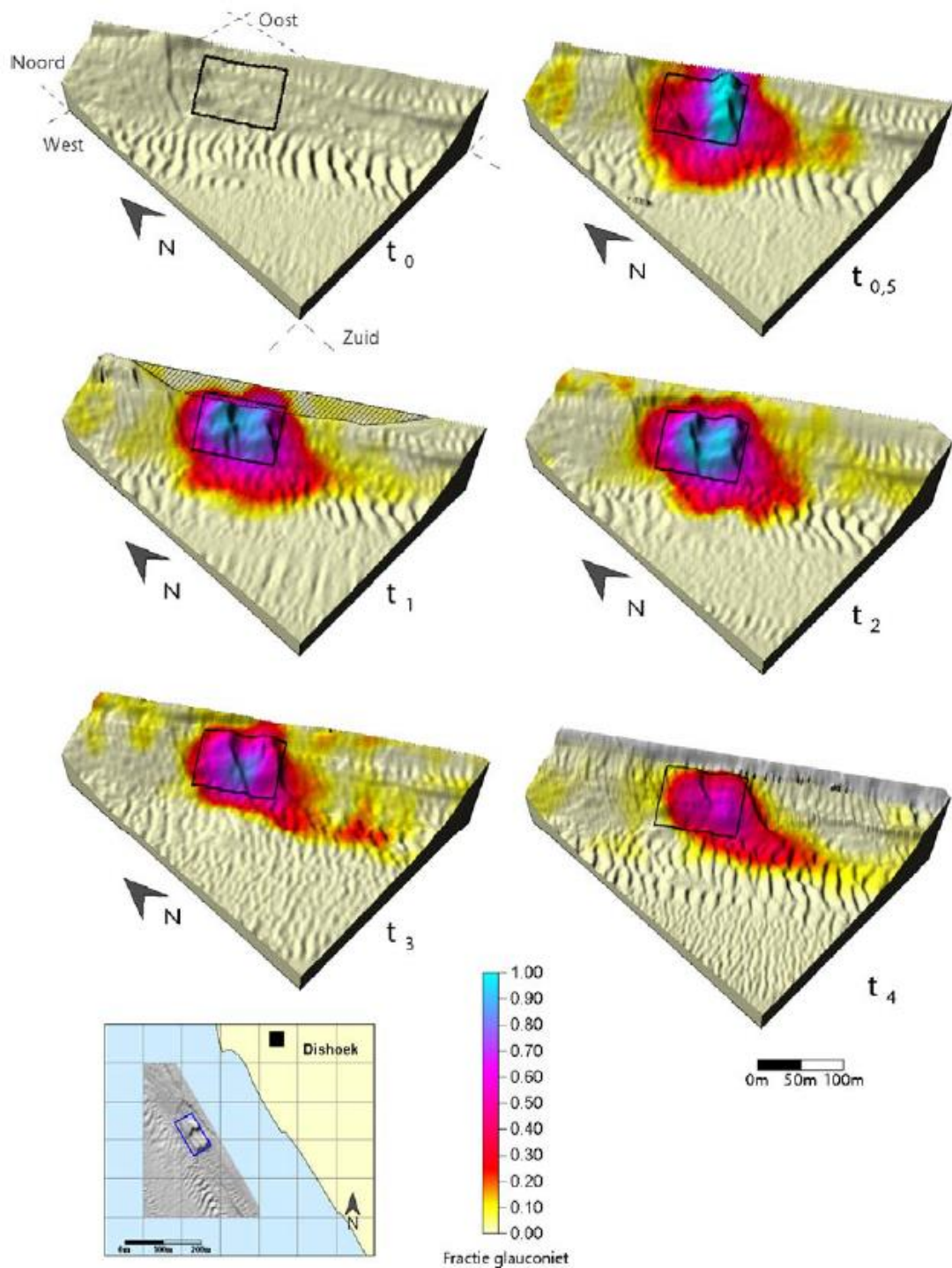
Figuur 3.8 Schematische weergave van het netto zandtransport rondom het Oostgat. (figuur afkomstig uit Van der Werf et al., 2020)

De Walcherse kust tussen Zoutelande en Westkapelle, landwaarts van het Oostgat, is onderhevig aan erosie. In het verleden bestond de kustverdediging uit het aanleggen van harde constructies, zoals strandhoofden. Sinds ca. 1950 wordt er regelmatig op het strand gesuppleerd. Er is tussen Westkapelle en Vlissingen sinds het begin van de BKL (Basis Kust Lijn) handhaving in 1990 tot 2016 gemiddeld $\sim 0,4$ miljoen m^3 /jaar op het strand gesuppleerd. Deze strandsuppleties hielden het landwaartse oprukken van het Oostgat niet tegen, waarna in 2005 en 2009 ca. 9 miljoen m^3 aan sediment op de geulwand is aangebracht (Figuur 3.9). Deze suppleties bleken effectief in het handhaven van de kustlijn (Tonnon & Van der Werf, 2014).

Deze “echte” geulwandsuppleties werden voorafgegaan door een proefsuppletie in 2001 (5-10 duizend m^3). Hieruit bleek, op basis van multibeamopnames en tracers (licht radioactief glauconiethoudend zand), het sediment voornamelijk in vloed (zuidwestelijke) richting getransporteerd te worden (Figuur 3.10). Deze proef is gemodelleerd door Hordijk (2002).

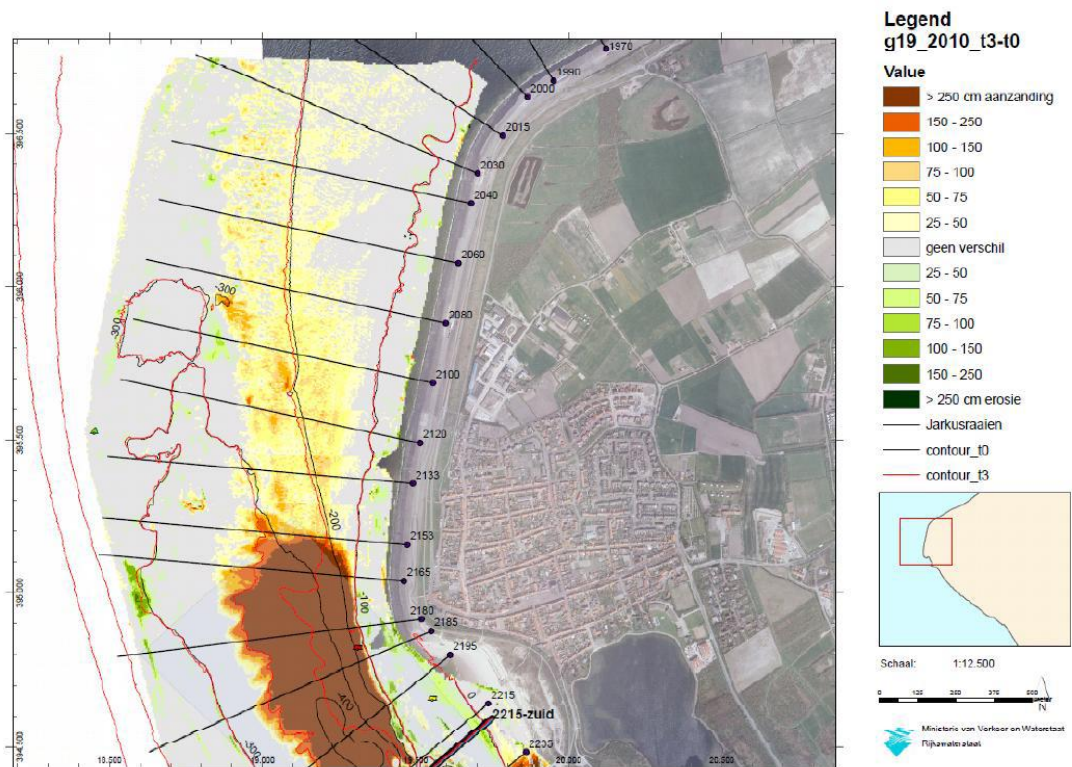


Figuur 3.9 Overzicht geulwandsuppleties en dijkverzwaringen langs de kust van Walcheren (boven) en morfologische ontwikkeling JARKUS raai 2374 tussen Westkapelle en Zoutelande waarin de effecten van de 2005/2009 suppleties zichtbaar zijn (onder). Het kleine groene vlak betreft de 2005 geulwandsuppletie, en de het grote vlak de 2009 geulwandsuppletie. (figuur afkomstig uit Schrijvershof & Mastbergen, 2016)

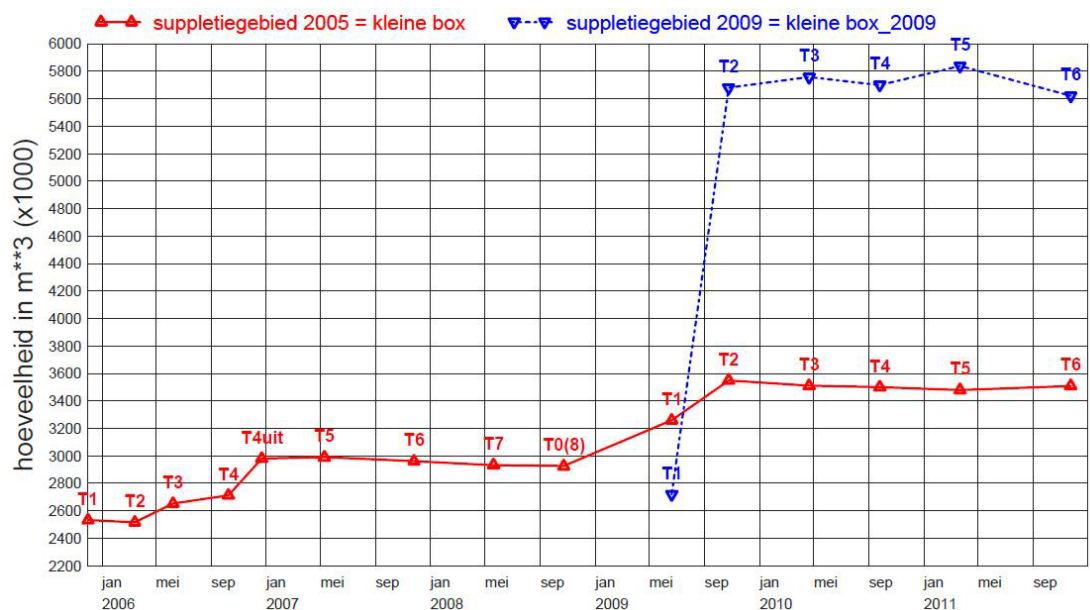


Figuur 3.10 Fractie glauconiethoudend zand geprojecteerd op 3D bodemopnames. t_0 = 18 september 2001, $t_{0.5}$ = 24 oktober 2001 (tijdens aanleg), t_1 = 10 november 2001, t_2 = 3 december 2001, t_3 = 18 februari 2002, t_4 = 7 oktober 2002. (figuur afkomstig uit Nederbragt & Koomans, 2005)

De twee uitgevoerde geulwandsuppleties uit 2005 en 2009 zijn door Dekker (2012) geanalyseerd op basis van multibeamopnames. Beide suppleties blijven relatief stabiel. De volumes nemen enigszins af (Figuur 3.12) en er is noordwaarts transport zichtbaar (Figuur 3.11). De geulwand komt vooral bovenin (NAP -8 tot -12m) weer bloot te liggen (Figuur 3.9).



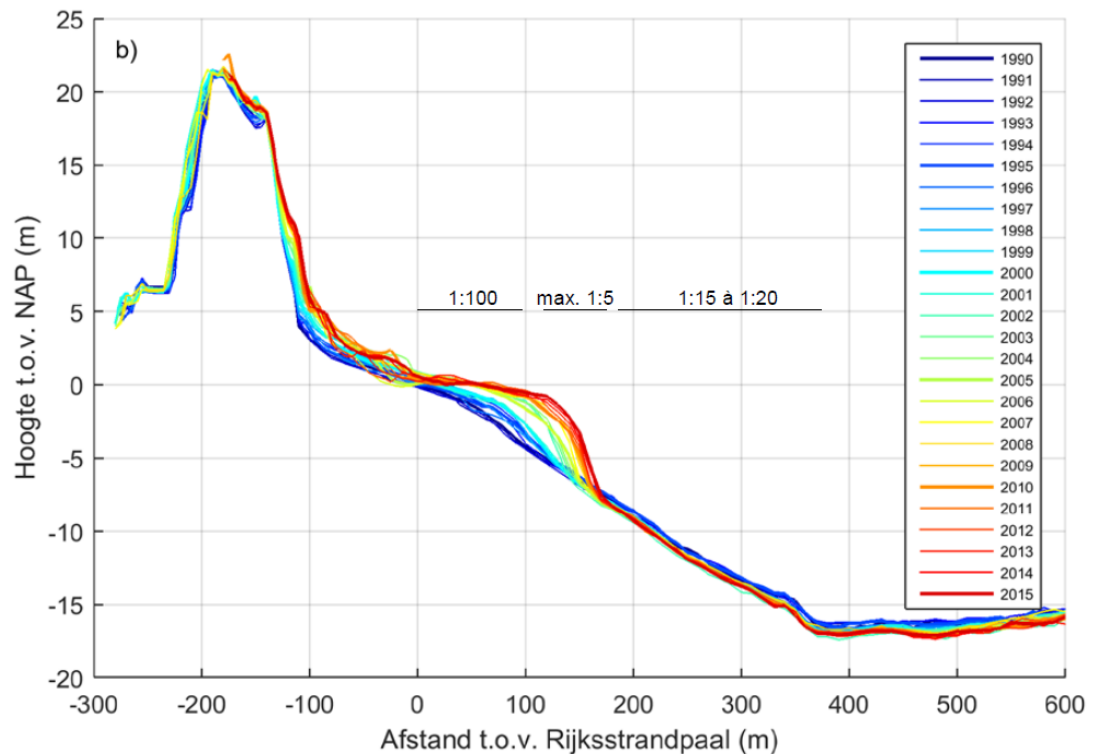
Figuur 3.11 Verschilkaart tussen oktober 2008 en april 2010 waarop de noordwaartse verplaatsing van het gesuppleerde sediment te zien is. (figuur afkomstig uit Dekker, 2012)



Figuur 3.12 Ontwikkeling van de volumes van de geulwandsuppleties Oostgat uit 2005 en 2009 ten opzichte van het volume voor aanleg (T0). (figuur afkomstig uit Dekker, 2012)

De geulwandsuppletie in het Oostgat zijn behoorlijk stabiel (Figuur 3.9, Figuur 3.11). *Hoe komt dit? Waar gaat het sediment naar toe?* Deze vragen zijn tot op heden nog niet volledig beantwoord, ondanks de eerder getoonde morfologische analyses van Dekker (2012). Hier kunnen mogelijk belangrijke lessen uit worden getrokken voor een pilotsuppletie in de Schelde-monding.

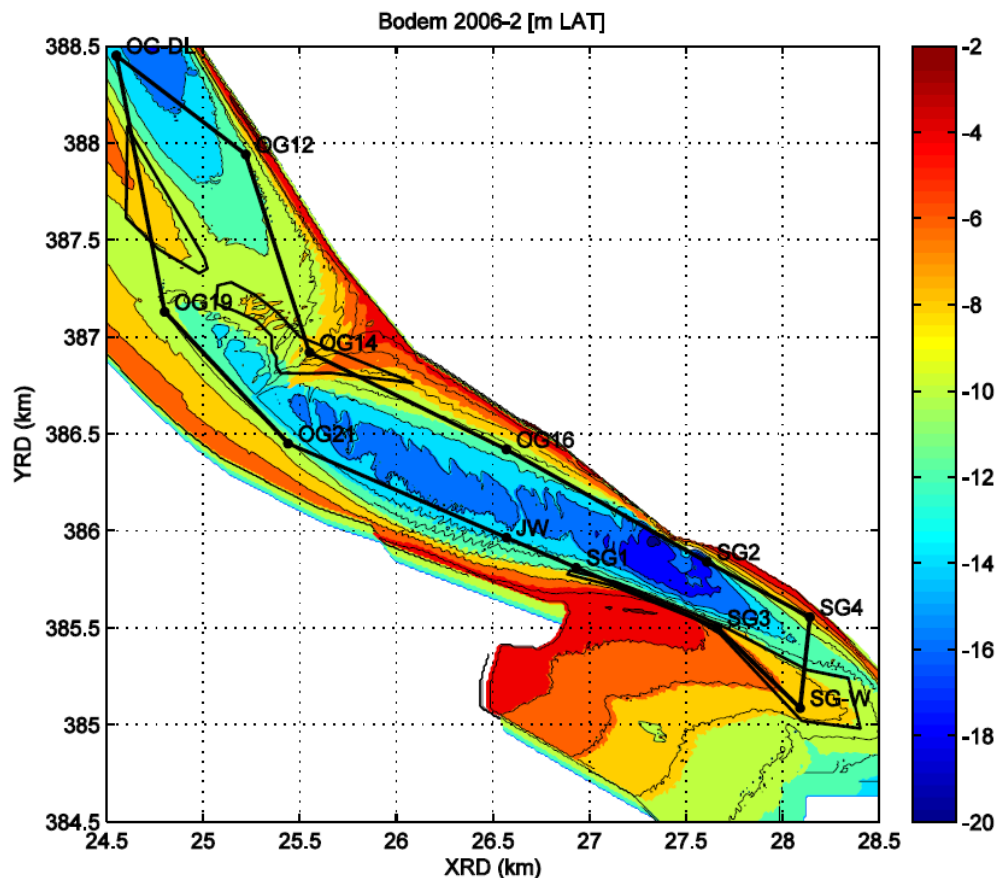
Deze geulwandsuppleties en strandsuppleties zorgen voor een uitbouw van de kust, met name nabij Zoutelande (Figuur 3.13). Als de aanzanding doorzet en het onderwatertalud steiler wordt, zouden er volgens Schrijvershof & Mastbergen (2016) zettingsvloeiingen kunnen optreden. Hierbij kan een flinke hoeveelheid zand van de vooroever en het strand verloren gaan, maar het is niet waarschijnlijk dat in dat geval de oorspronkelijke geulwand wordt beschadigd of dat de inscharing zich zal uitstrekken tot voorbij de laagwaterlijn, laat staan tot aan de duinvoet.



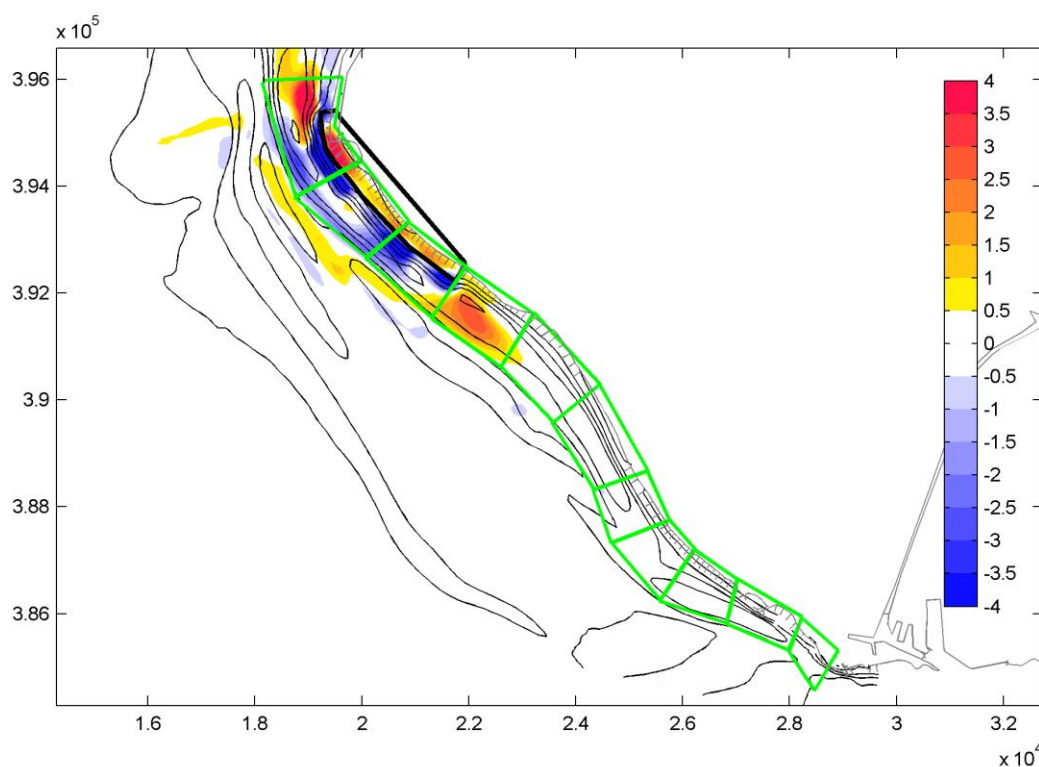
Figuur 3.13 Kustprofielen ter hoogte van raai 2694 (Zoutelande) in de periode na de start van het landelijk suppletiebeleid in 1990. (figuur afkomstig uit Schrijvershof & Mastbergen, 2016)

De overgang tussen de Sardijngeul en het Oostgat, genaamd de Galgeput, is een sedimentatiegebied (Figuur 3.14). Hetzelfde geldt voor de oostelijke rand van de Nolleplaat. Dit is ongewenst voor de scheepvaart en daarom wordt hier regelmatig gebaggerd, gemiddeld orde 0,1 miljoen m³/jaar.

Er was zorg dat de geulwandsuppleties in het Oostgat deze sedimentatie zouden versterken. Uit modelonderzoek van Ormondt & De Ronde (2009) bleek echter dat een geulwandsuppletie alleen een significant effect heeft op haar directe omgeving (tot ~2 km buiten het gesuppleerde gebied), zelfs bij een suppletievolume van 30 miljoen m³ (Figuur 3.15).



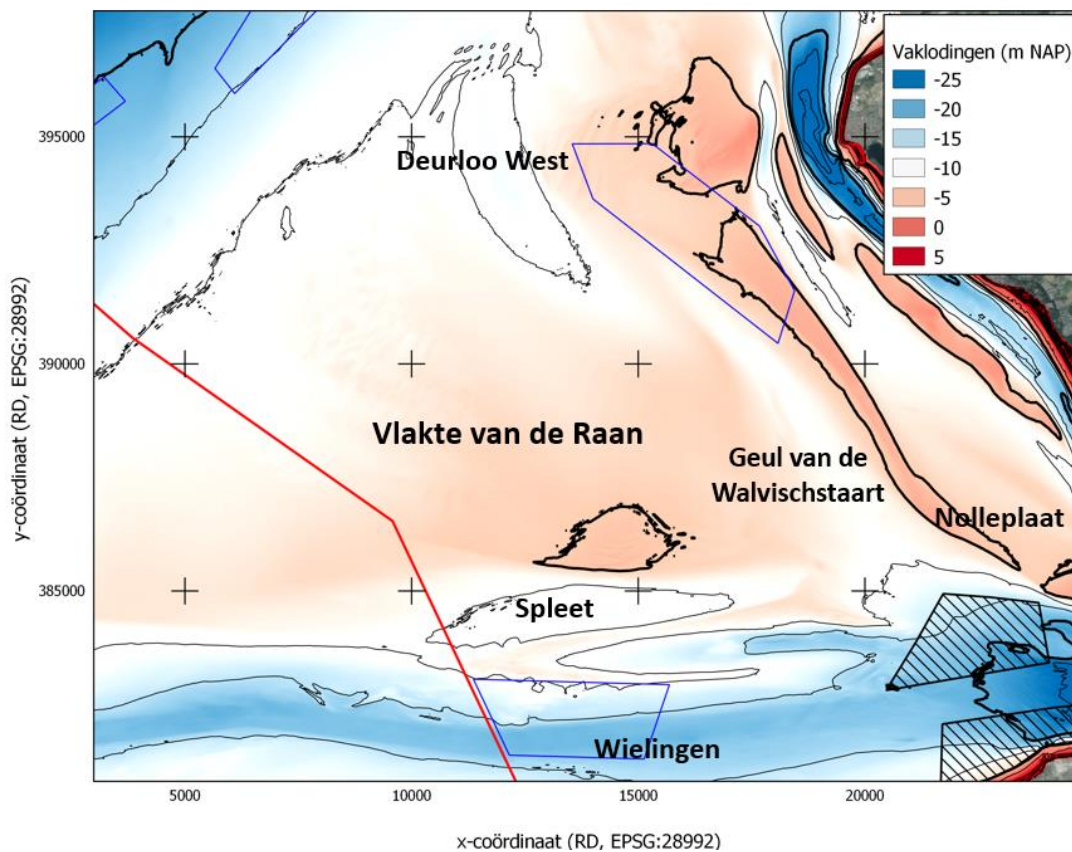
Figuur 3.14 Bodemligging uit 2006 van de vaargeul Oostgat-Sardijngemaal voor de baggerwerkzaamheden in de Galgeput (tussen OG14 en OG19) en de oostelijke rand van de Nolleplaat (ten oosten van SG-W). De annoteerde zwarte punten tonen de ligging van de vaargeul. (figuur afkomstig uit Van der Werf et al., 2011)



Figuur 3.15 Relatief effect (i.e. ten opzichte van geen ingreep) van een 30 miljoen m³ grote geulwandsuppletie op de bodemligging [m] na 4 jaar modelberekening (figuur afkomstig uit Van Ormondt & De Ronde, 2009)

3.4 Centraal: Vlakte van de Raan

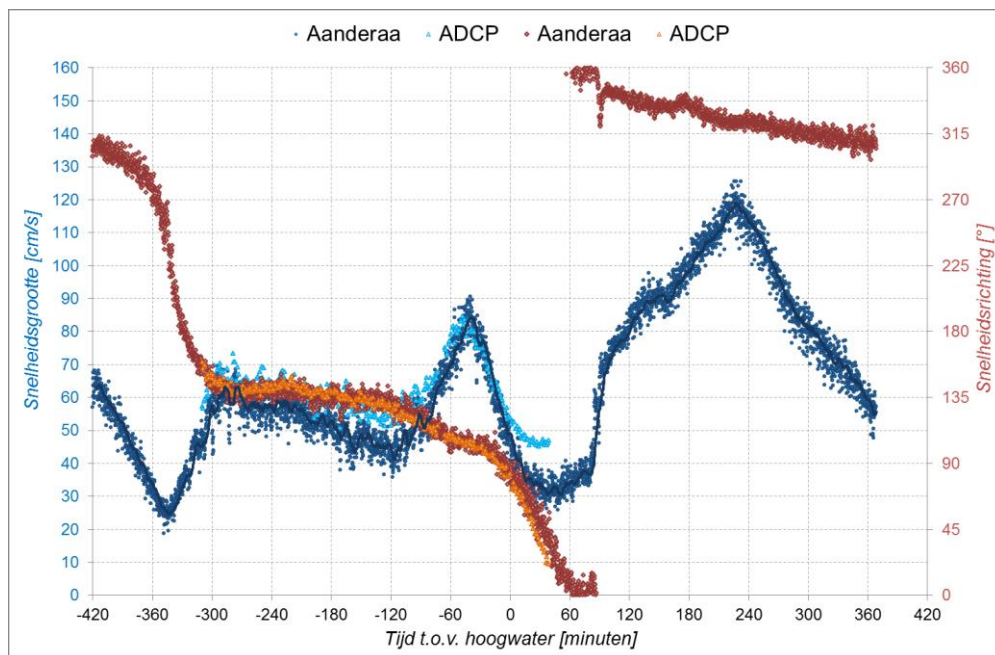
Het centrale deelgebied van de Schelde-monding bestaat uit de Vlakte van de Raan en aanpalende (oude) getijgeulen Deurloo-Oost, Geul van de Walvischstaart en Spleet (Figuur 3.16).



Figuur 3.16 Het centrale deelgebied van de Schelde-monding: Vlakte van de Raan. Rode lijn: grens Nederland-België, blauwe polygonen: visserijgebieden, met diagonale lijnen gearceerde polygonen: ankergebieden.

We hebben geen studie gevonden die zich specifiek richtte op de morfodynamica van de Vlakte van de Raan, naast de metingen uitgevoerd door Plancke et al. (2014) (beschreven in paragraaf 5.2).

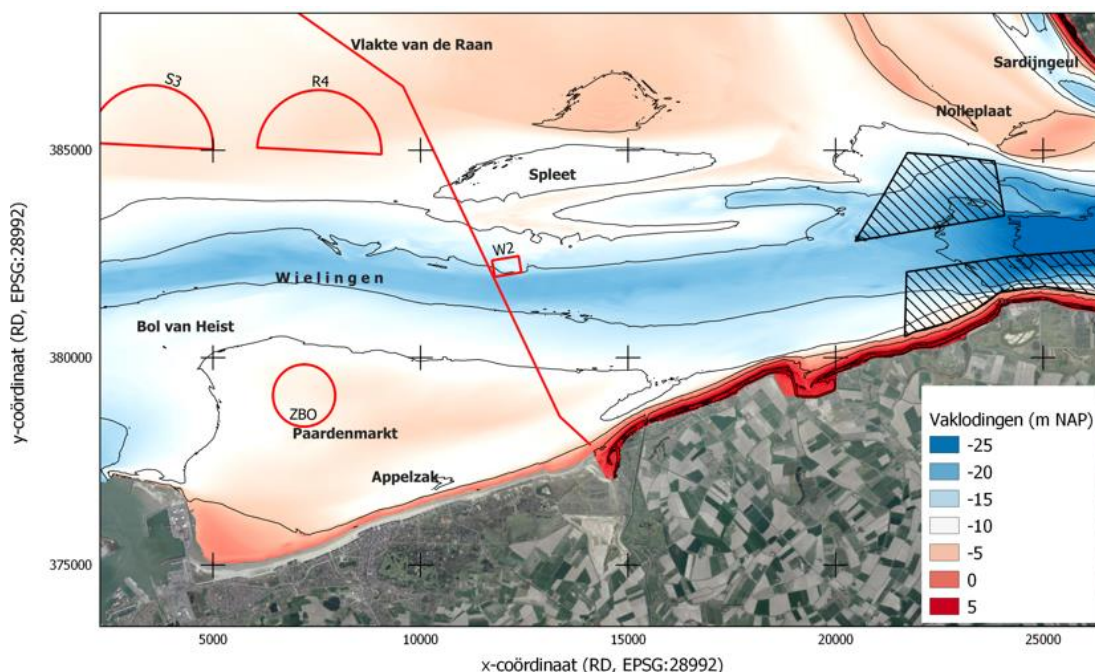
Zoals ook beschreven in paragraaf 3.1 blijkt uit deze metingen alsook uit numerieke modelberekeningen dat er geen echte kentering van de stroming optreedt op de Vlakte van de Raan. De gemeten minimale stroomsnelheden bedroegen nog steeds 30-40 cm/s (Figuur 3.17). Tijdens de kentering was er eerder sprake van het geleidelijk draaien van de stroming, zonder dat de stroming echt terugviel. Het ontbreken van een kentering van de stroming heeft implicaties voor het sedimenttransport. De minimale snelheden zijn nog zodanig groot dat er waarschijnlijk weinig (fijn) sediment uit suspensie naar de bodem kan bezinken.



Figuur 3.17 Grootte en richting van stroomsnelheden gemeten met de instrumenten Aanderaa (ca. 3 m onder het wateroppervlak) en ADCP (diepte-gemiddeld). De metingen zijn uitgevoerd op locatie GvdW2 (zie voor de ligging Figuur 5.1) op 9 september 2014. (figuur afkomstig uit Plancke et al., 2014)

3.5 Zuid: (Zeeuws-)Vlaamse kust en Appenzak

In zuiden van de Schelde-monding ligt de (Zeeuws-)Vlaamse kust en de voorliggende getijgeul Appenzak (Figuur 3.18). In het kader van het Vlaamse Baaien/Kustvisie project is dit gebied, met name de sectie Zeebrugge – Cadzand, uitgebreid bestudeerd (zie De Maerschalck et al., 2017, en verwijzingen hierin). De morfologische ontwikkeling en het kustbeheer van het Nederlandse deel, Zeeuws-Vlaanderen, staat goed beschreven in de Beheerbibliotheek (Kuiper et al., 2016).

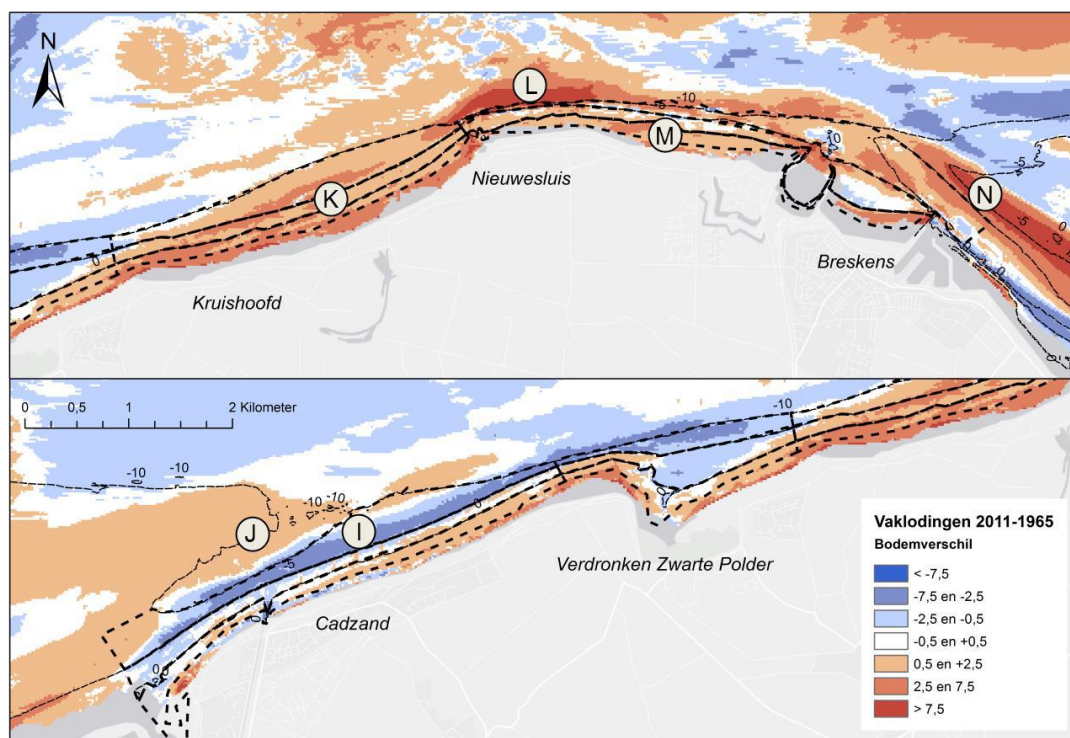


Figuur 3.18 Het zuidelijke deelgebied van de Schelde-monding. Rode lijn: grens Nederland-België, rode polygoenen: (oude) stortvakken, met diagonale lijnen gearceerde polygoenen: ankergebieden.

3.5.1 Zeeuws-Vlaanderen

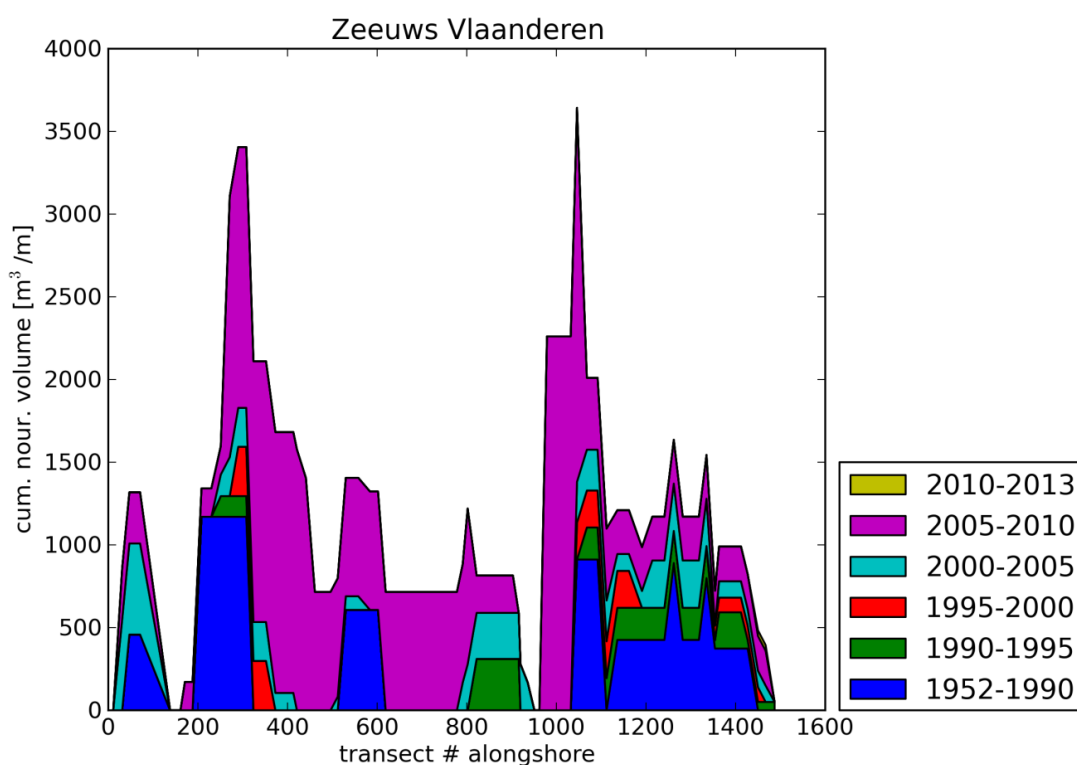
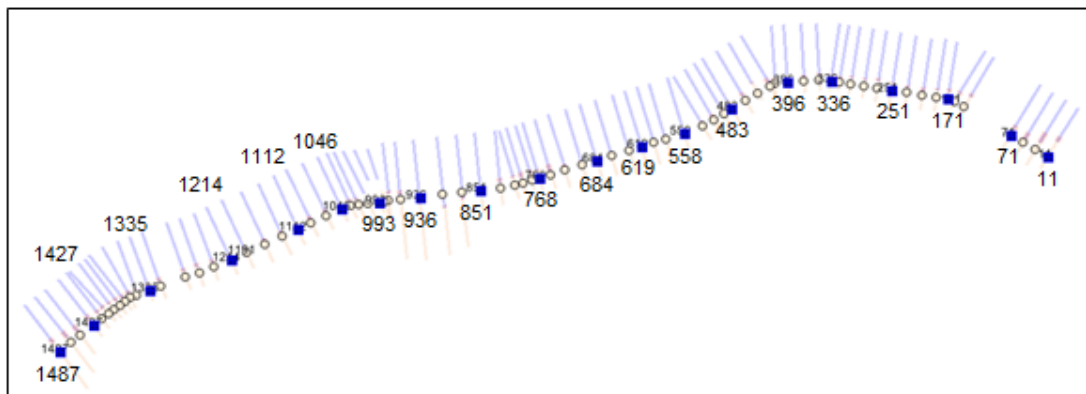
Figuur 3.19 geeft in meer detail de morfologische ontwikkelingen langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen weer (Kuiper et al., 2016). In de loop der jaren zijn veelvuldig suppleties uitgevoerd en de getoonde veranderingen worden hier sterk door bepaald. Langs het zuidwestelijke deel van de Zeeuwse kust, tussen Kruishoofd en het Zwin bij de grens, is erosie van de vooroever opgetreden (I) terwijl verder zeewaarts sprake is van sedimentatie (J).

Voor het opvolgende traject naar Nieuwesluis is er tot voorbij de NAP-10 m dieptelijn alleen een netto verondieping (K). De in 2009 uitgevoerde geulwandsuppletie bij Nieuwesluis verklaart de sterke netto bodemverondieping daar (L). Tussen Nieuwesluis en Breskens is dit eveneens het geval maar in mindere mate als gevolg van strandsuppleties (M) terwijl de verondieping van Vaarwater langs Hoofdplaat (N) de reactie van de geul is op het inpolderen van de Braakman in de 50-er jaren van de vorige eeuw. De Braakman is een voormalige zeearm van de Westerschelde bij Terneuzen en de komvulling van dit gebied verliep voor een belangrijk deel via de geul Vaarwater langs Hoofdplaat. Na inpoldering verloor de geul deze functie en nam het doorstroomprofiel af door de reductie van het getijdebiet. (Kuiper et al., 2016).



Figuur 3.19 Morfologische ontwikkeling voor de kust van Zeeuws-Vlaanderen tussen 1965 en 2011. Boven: van Breskens naar Nieuwvliet. Onder: van Nieuwvliet naar Cadzand-Bad. De getoonde dieptelijnen hebben betrekking op de 2011 bodem. (figuur afkomstig van Kuiper et al., 2016)

De verdeling van het totale suppletievolume per strekkende meter langs de kust voor de periode 1971-2013 wordt getoond in Figuur 3.20. Hieruit blijkt dat langs de gehele kust is gesuppleerd met het zwaartepunt van de suppleties ter plaatse van Nieuwesluis en westelijk en oostelijk hiervan (raai 200-600) en bij de Herdijkte Zwarte Polder (raai 1000-1100). (Kuiper et al., 2016)

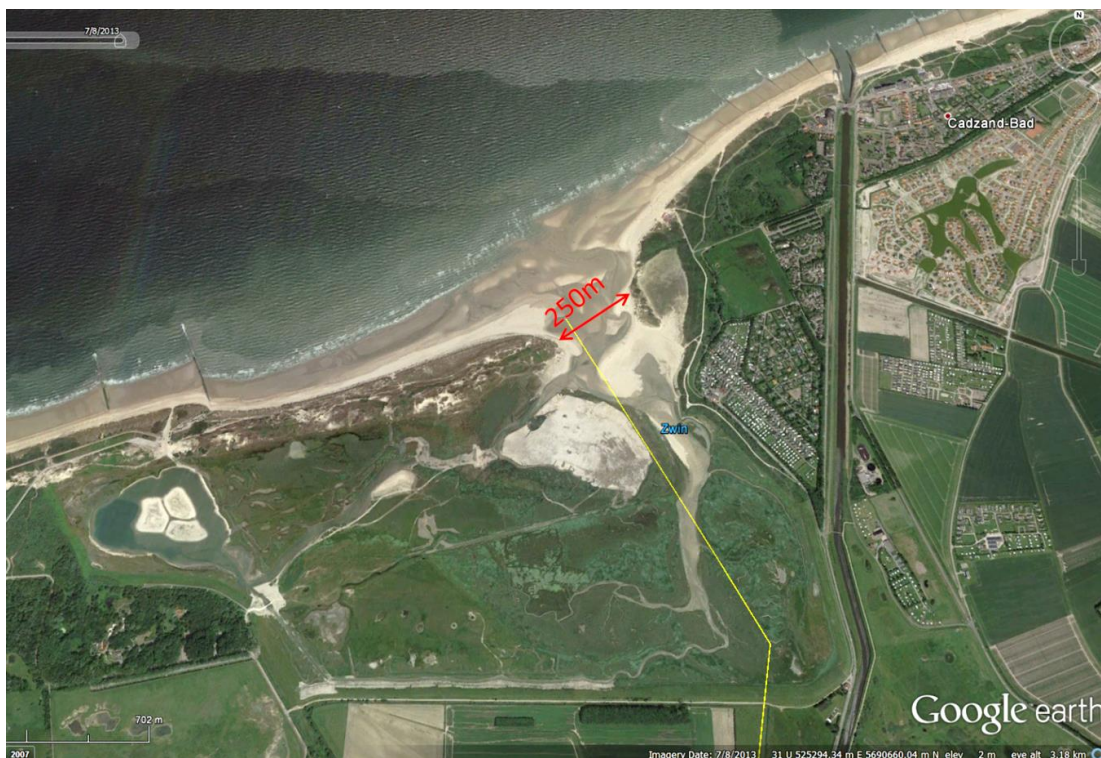


Figuur 3.20 Totaal suppletievolumen per strekkende meter langs de Zeeuws-Vlaamse kust voor de periode 1971-2013, met boven de grafiek ter referentie de locatie van de raainummers. (figuur afkomstig van Kuijper et al., 2016)

3.5.2 Het Zwin

Het Zwin is een oude verzande zeearm op de Vlaams-Nederlandse grens en sinds 1952 een belangrijk natuurreervaat van 158 ha (Figuur 3.21). Het bestaat grotendeels uit intergetijdengebied dat bij normaal getij slechts gedeeltelijk onder water loopt door een ca. 250 m brede bres in de duinregel. Grote delen van het slikken- en schorregebied komen enkel onder water bij springtij of stormvloed. De uitbreiding van Het Zwin met 120 ha is in 2019 voltooid.

De morfologische ontwikkeling van Het Zwin staat beschreven in De Maerschallck et al. (2017). Belangrijke noties zijn dat de monding van Het Zwin een dynamisch gebied is, en dat desondanks de toegangsgeul zonder menselijk ingrepen open is gebleven. Wel blijft door de netto invoer van sediment het getijprisma afnemen. De uitbreiding van Het Zwin in 2019 is mede bedoeld om de openhoudende werking van de toegangsgeul door de getijstroom te versterken.

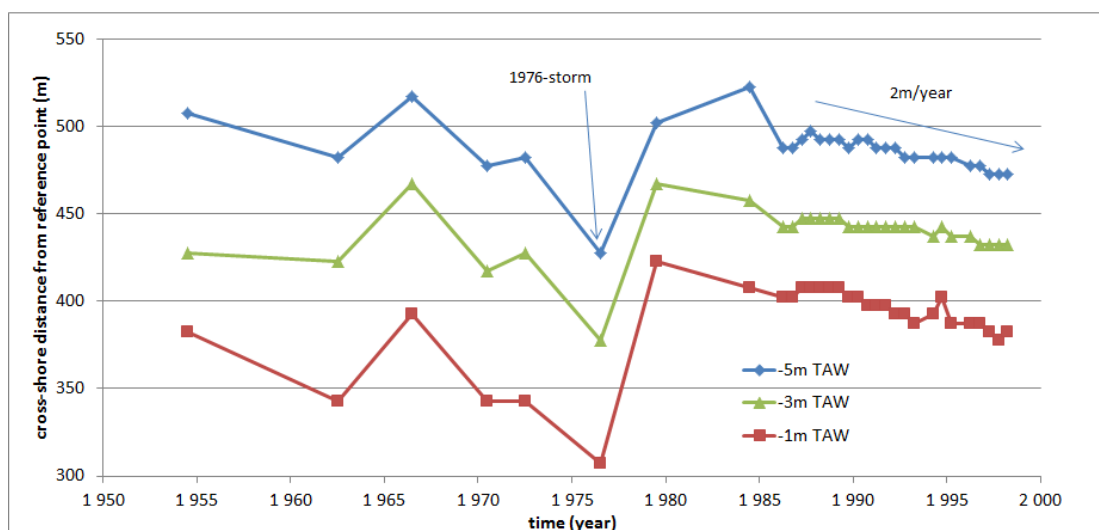


Figuur 3.21 Het Zwin voorafgaand aan de uitbreiding die in 2019 voltooid is. De gele lijn geeft de Nederlands-Belgische grens aan. Onderaan is in het midden van de foto de Internationale dijk zichtbaar die doorgebroken is ten behoeve van de uitbreiding.

3.5.3

Vlaanderen

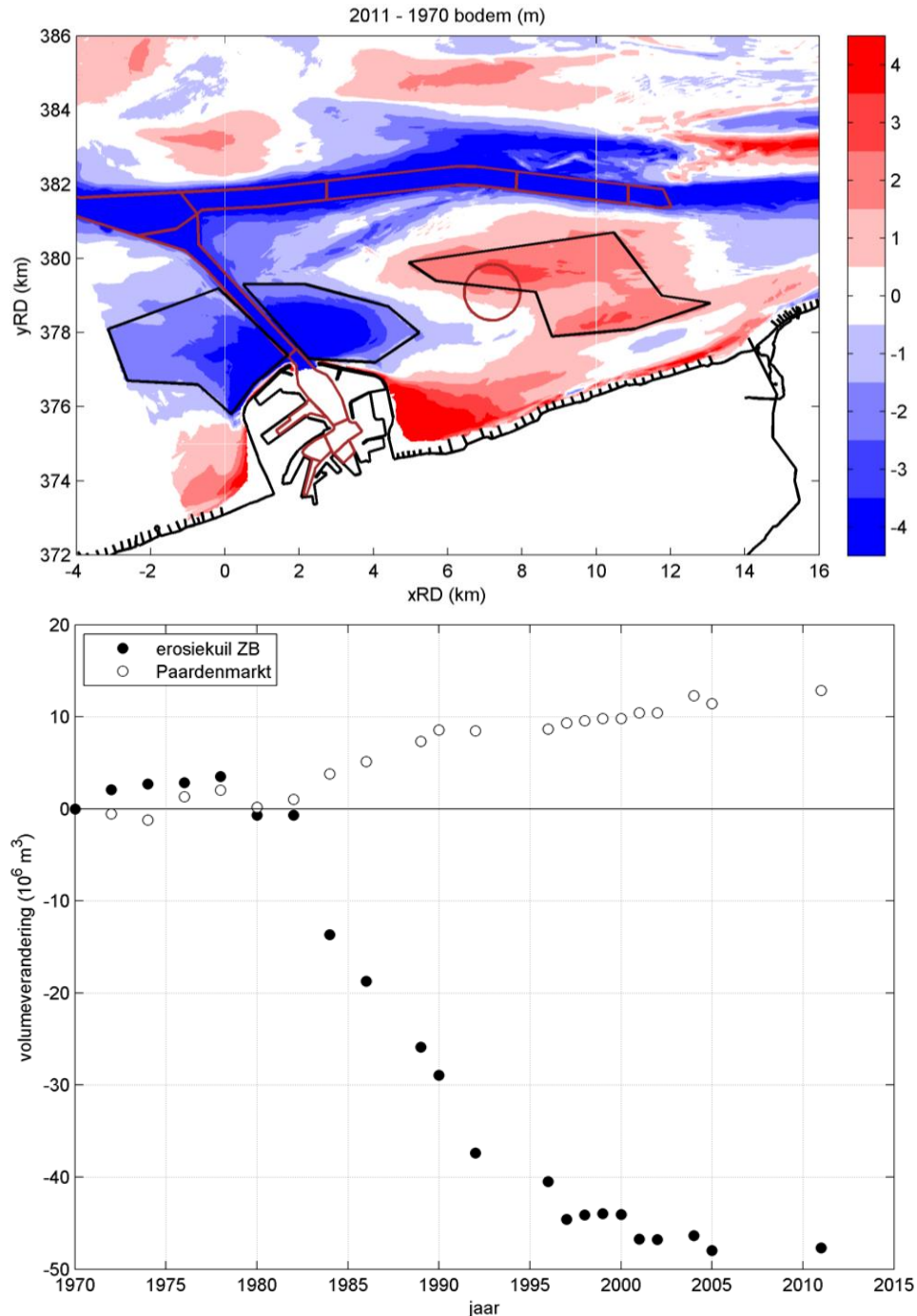
De stranden van Knokke-Heist eroderen door de voorliggende getijgeul Appelzak dat een steile (1/25) geulwand heeft, naast het vanaf de havendammen van Zeebrugge oplopende langstransport. De geul toont een langdurige trend van landwaartse verplaatsing (Figuur 3.22). Tussen 1977 en 1979 is er meer dan 8,5 miljoen m³ gesuppleerd over een afstand van 9 km. Deze suppletie verplaatst de Appelzak weer 100 m zeewaarts. De laatste jaren lijkt de landwaartse migratie van de Appelzak minder geworden te zijn met een typische verplaatsingssnelheid van ~2 m/jaar.



Figuur 3.22 Ontwikkeling van de positie van de Appelzak op basis van een dwarsprofiel. Het Belgische referentievlak TAW is ongeveer 2,5 m lager dan het Nederlandse NAP. (figuur afkomstig uit De Maerschalck et al., 2017)

Er is weinig informatie beschikbaar over de lokale transportrichting van de Appelzakgeul. De beperkte literatuur leidt daarenboven zelfs tot tegenstrijdige conclusies. Aangenomen wordt dat begin 20^e eeuw deze geul vloeddominant was, maar nu is ze gekend als een ebdominante geul. Door de dominante golfrichting heeft het netto sedimenttransport in de brandingszone een andere richting dan in de Appelzak, namelijk van west naar oost. (De Maerschalck et al., 2017)

Zeewaarts van de Appelzak ligt de ondiepte Paardenmarkt. Er heeft hier tussen 1970 en 2011 sedimentatie plaatsgevonden, lokaal meer dan 4 m (Figuur 3.23).

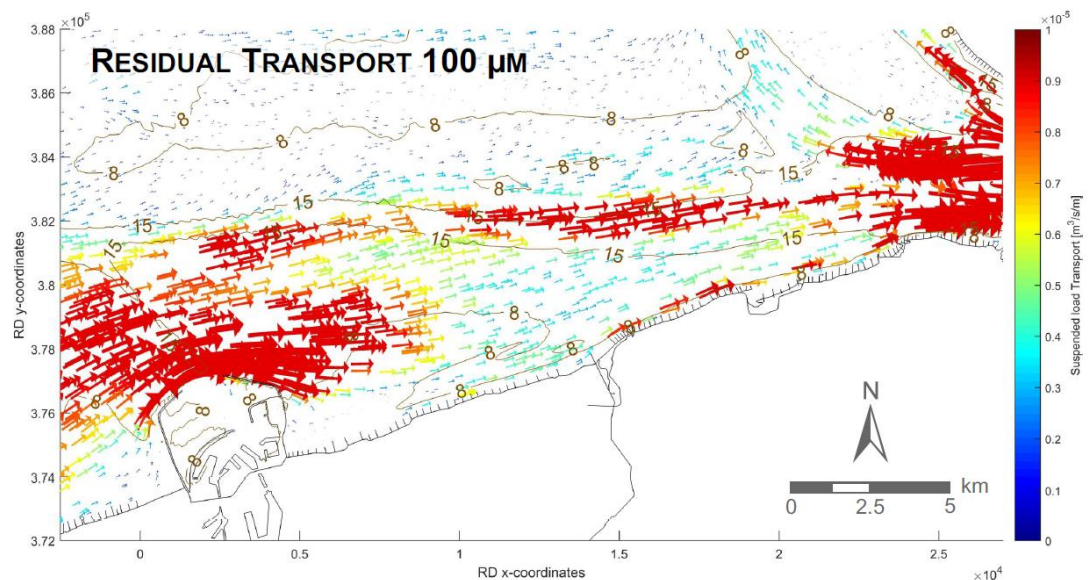


Figuur 3.23 Boven: verschilbodemap Paardenmarkt en omgeving 2011-1970. Bruine polygoenen: vaarpassen en stortvak Zeebrugge-Oost. De zwarte polygoenen zijn gebruikt voor de sedimentbalans. Positieve waarden duiden op sedimentatie. Onder: volumeverandering (relatief t.o.v. 1970) van de erosiekuil Zeebrugge en de Paardenmarkt. (figuren afkomstig uit De Maerschalck et al., 2017)

Deze aanzanding trad voornamelijk op vanaf het begin van de jaren 1980, en lijkt gekoppeld te zijn aan de erosiekuil die ontstaan is door de uitbreiding van de haven van Zeebrugge in de periode 1979-1986. De laatste jaren lijkt zowel de erosie als de aanzanding zich te stabiliseren. Het erosievolume is hoger dan het sedimentatievolume, omdat een deel waarschijnlijk elders bezinkt, b.v. in de Baai van Heist; de oksel direct ten oosten van Zeebrugge. Deze sedimentatie is waarschijnlijk versterkt door de stortingen in het stortvlak Zeebrugge-Oost (ZB0), juist ten westen van de Paardenmarkt. In de periode 1984-2014 is er hier vrij constant jaarlijks ~3 miljoen TDS (Ton Droge Stof⁷) gestort. Deze specie is voor het overgrote gedeelte afkomstig uit de haven van Zeebrugge, en dus erg slibrijk. Momenteel wordt dit stortvak niet cq. nauwelijks meer gebruikt.

3.5.4 Netto sedimenttransporten

Modelberekeningen wijzen op dominant suspensietransport in oostelijke (vloed) richting in de Wielingen en Appelzak, en netto langstransport in brandingszone in noordoostelijke richting (Figuur 3.24). Het vloeddominante sedimenttransport in de Wielingen is tegengesteld aan de ebdominante residuele snelheid (Figuur 3.4). Dit komt omdat sedimenttransport ook bepaald wordt door de getijasymmetrie die in de Wielingen vloeddominant is (Figuur 3.2). Het berekende netto zandtransportpatroon in de Appelzak is in tegenspraak met de opmerking uit De Maerschallck *et al.* (2017) dat de deze getijgeul momenteel ebgedomineerd is.

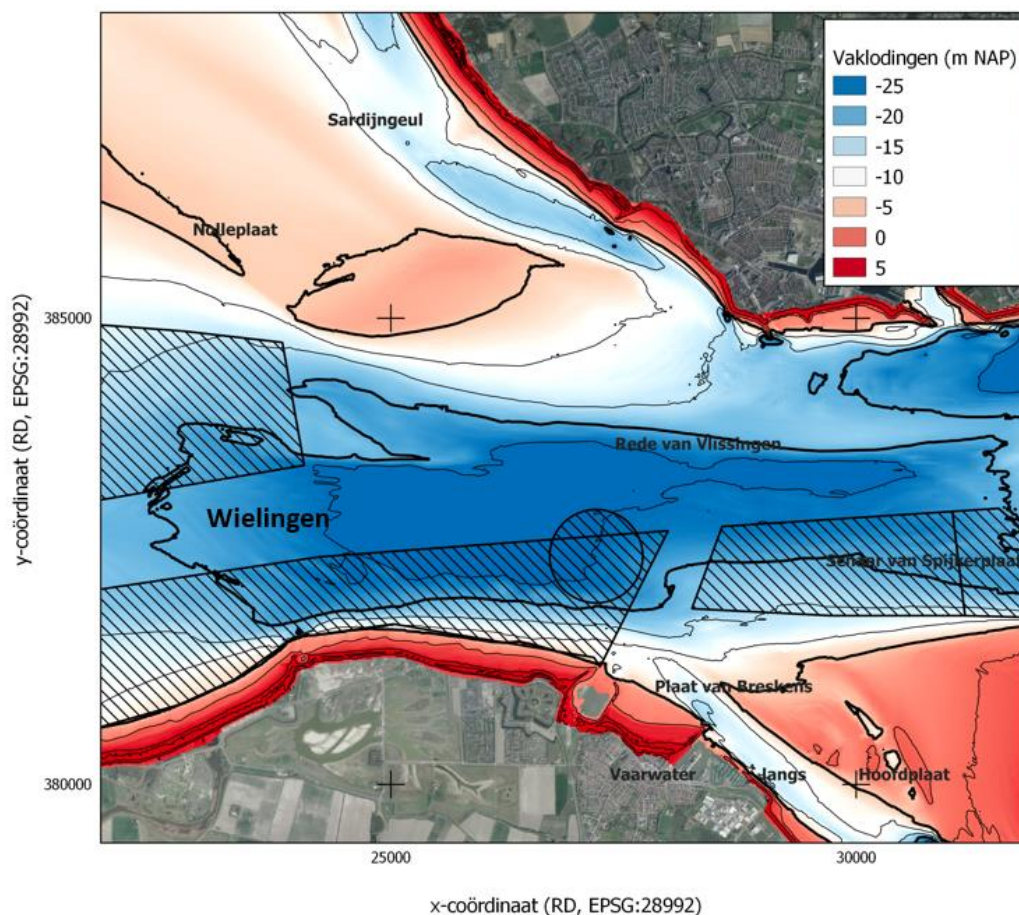


Figuur 3.24 Berekend netto suspensietransport van de fijne zandfractie (0,1 mm). De transport zijn kleiner voor de grove zandfractie (0,25 mm), maar de patronen zijn vergelijkbaar. (figuur afkomstig uit Røbke *et al.*, 2018)

3.6 Oost: Instroming Westerschelde

Het oostelijke deelgebied betreft de instroming van de Westerschelde via de getijgeul Wielingen-Honte (Figuur 3.25). Dit gebied bepaalt in belangrijke mate de morfologische interactie en de sedimentuitwisseling tussen de monding en de Westerschelde.

⁷ TDS is om te rekenen naar sediment kuubs met de sedimentdichtheid. Bij een typische dichtheid van kwarts sediment van 2650 kg/m³ komt 1 TDS (=1000 kg) overeen met 0,4 m³ sediment. De corresponderende bodemverandering bij een storting is groter vanwege het poriënvolume; het volume ingenomen door water. Dit hangt af van de pakking van sedimentdeeltjes gekoppeld aan de bodemsamenstelling en mate van consolidatie. Dit wordt tot uitdrukking gebracht in de porositeit. Bij een zandige bodem met een typische porositeit van 0,4 komt 1 TDS overeen met een bodemverandering van 0,6 m³. Bij een meer slibrijke bodem met b.v. een porositeit van 0,7 is dit 1,3 m³.



Figuur 3.25 Het oostelijke deelgebied van de Schelde-monding: de instroming van de Westerschelde. Met diagonale lijnen gearceerde polygonen: ankergebieden.

3.6.1 Sedimentuitwisseling monding - Westerschelde

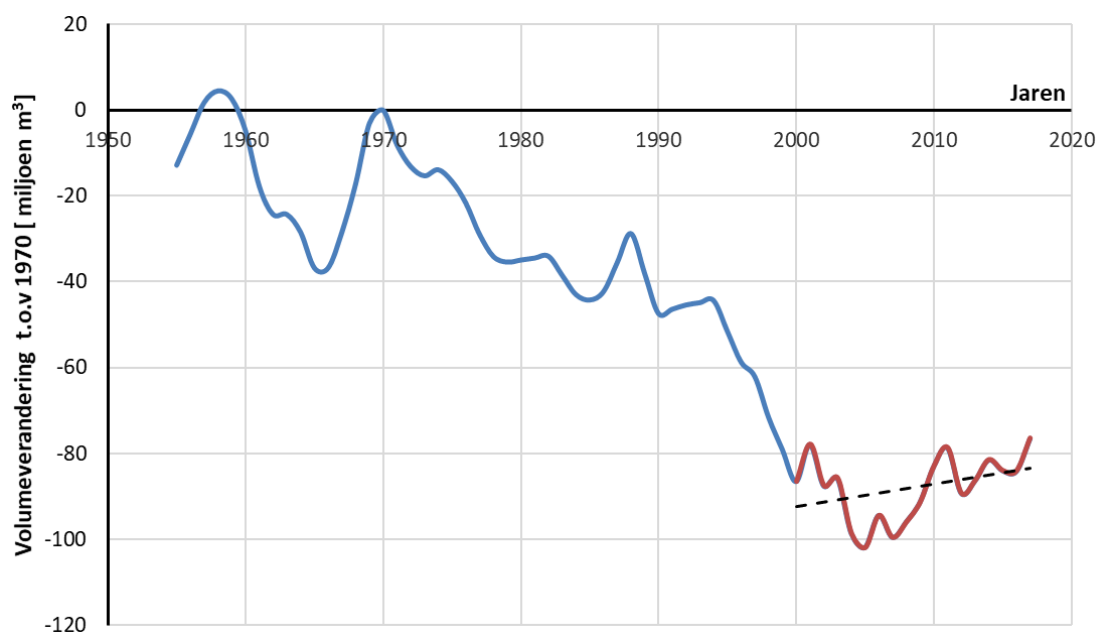
Deze paragraaf is sterk gebaseerd op paragraaf 3.5 uit Nolte *et al.* (2020).

De sedimentuitwisseling tussen de Westerschelde en de monding (over de grens Vlissingen-Breskens) kan worden afgeleid op basis van sedimentbalansstudies. Dergelijke studies zijn gebaseerd op (een combinatie van) metingen van de bodemligging en sedimenttransportberekeningen met numerieke modellen.

De sedimentinhoud van de Westerschelde varieert van jaar tot jaar (Figuur 3.26). Tussen 2000 en 2017 sedimenteerde de Westerschelde met ongeveer 0,5 miljoen m³/jaar, afwijkend van eerdere periodes die consequent een verruiming van de Westerschelde laten zien. Als we deze trend als representatief beschouwen voor de huidige situatie en als wordt uitgegaan van (a) een sedimentverlies naar de Zeeschelde van 1 miljoen m³/jaar, (b) geen zandwinning⁸ en (c) het volledig terugstorten van het gebaggerde sediment in de Westerschelde, is er een gemiddelde sedimenttransport van 1,5 miljoen m³/jaar van buiten de Westerschelde in. Dit is zand en slib samen.

Tabel 3.1 inventariseert sedimentbalansstudies waarin de sedimentuitwisseling bepaald is. De sedimentbalansen laten een zekere variatie zien, waarbij de beschouwde periode relevant is. De twee beschikbare periodes met onderscheid tussen zand en slib resulteren in slibimport en zandexport. Voor de recente periode, na 2000, is het onderscheid tussen slib en zand niet beschikbaar.

⁸ Vanaf 2010 is de zandwinning afgebouwd en in 2014 is er voor het laatst zand gewonnen in de Westerschelde (Van Leeuwen, 2013).



Figuur 3.26 Ontwikkeling sedimentvolume van de Westerschelde (van lijn Vlissingen-Breskens tot de grens Nederland-België) vanaf 1955 met 1970 als referentiejaar. Tussen 2000 en 2017 is er sprake van een sedimenterende trend van 0,5 miljoen m³/jaar (Nolte et al., 2020)

Tabel 3.1 Slib- en zanduitwisseling over de grens Vlissingen-Breskens in verschillende sedimentbalansstudies (positief is import van Voordelta naar Westerschelde).

Studie	Periode	Sedimentuitwisseling (miljoen m ³ /jaar)	Slibuitwisseling (miljoen m ³ /jaar)	Zanduitwisseling (miljoen m ³ /jaar)
Consortium Deltares et al. (2013a)	1955-1976	+1 tot +5	niet bekend	niet bekend
	1976-1994	+3 tot +5	niet bekend	niet bekend
	1992-2000	+0,2	+0,7	-0,5
	1994-2010	+0,7	niet bekend	niet bekend
Dam (2017)	1860-1955	-0,8/-0,9	+0,6/+1,5	-1,4/-2,4
Nolte et al. (2020)	2015-2017	+1,5	niet bekend	niet bekend

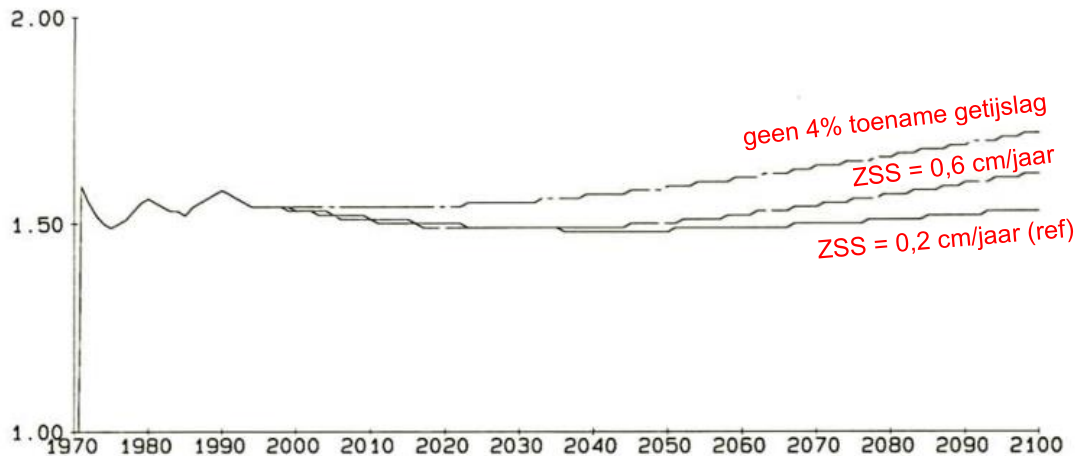
3.6.2 Effecten van zeespiegelstijging (ZSS) en sedimentbeheer Westerschelde

ASMITA staat voor “Aggregate Scale Morphological Interaction between a Tidal Inlet system and the Adjacent coast” (Stive et al., 1996). Dit model werkt met sterk geaggregeerde morfologische eenheden (geul- en plaatvolume van deelgebieden), waardoor het mogelijk is lange-termijn (eeuwen) berekeningen te doen. Het is een gedragsgeoriënteerd model waarbij elke eenheid streeft naar een eventwicht dat opgelegd c.q. bepaald wordt als functie van hydrodynamische parameters.

Wang (1997) heeft een ASMITA model gemaakt van het gekoppelde systeem Westerschelde – mondingsgebied. Na kalibratie en validatie aan de hand van de gemeten morfologische ontwikkeling is het model toegepast om via scenario-onderzoek het systeem beter te begrijpen.

ASMITA berekent een sedimentimport naar de Westerschelde van ca. 1,5 miljoen m³/jaar (Figuur 3.27). Een zeespiegel van 0,6 cm/jaar in plaats van 0,2 cm/jaar over de periode 1997-2100 zorgt voor een lichte toename van deze sedimentimport. Deze verandering is pas na ~30 jaar zichtbaar; de buitendelta fungeert als buffer. Ook hier ontstaat een sedimentvraag door ZSS waar eerst (voor een deel) aan voldaan moet zijn voordat de Westerschelde mee gaat groeien.

ZSS leidt door de grotere waterdiepte waarschijnlijk ook tot een grotere getijslag. Er is door Wang (1997) gerekend met een 4% toename. Een grotere getijslag valt samen met een groter getijvolume en daardoor een groter (nat) evenwichtsvolume van de getijgeulen. Hierdoor wordt de zandvraag en dus de sedimentimport verkleind. Het effect van de toegenomen getijslag op de sedimentimport is groter dan van de toegenomen ZSS.

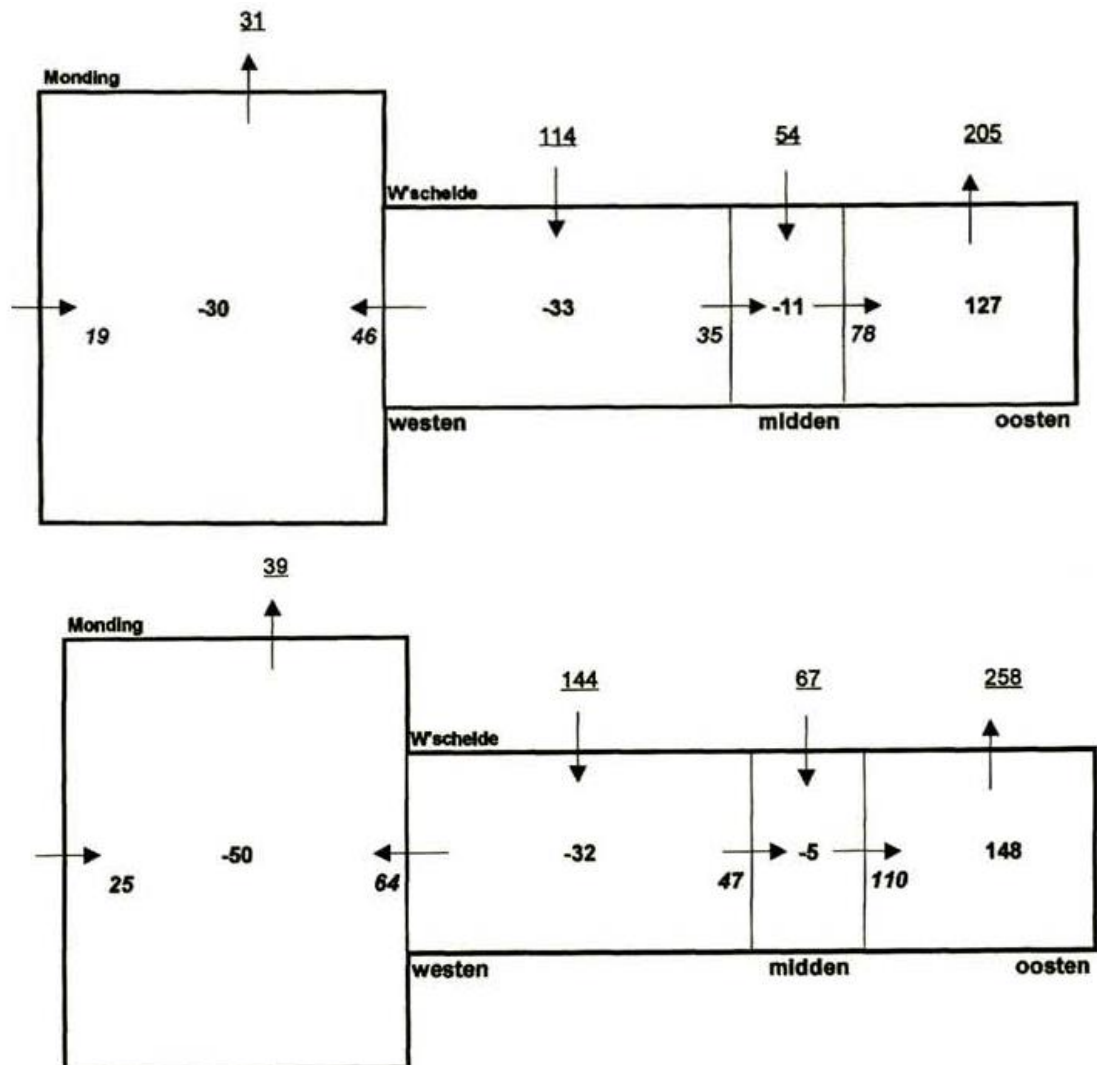


Figuur 3.27 Sedimentimport naar de Westerschelde [miljoen m³/jaar] berekend met ASMITA. De onderste lijn is de referentiesom met een ZSS van 0,2 cm/jaar (vanaf 1997). De middelste lijn betreft een ZSS van 0,6 cm/jaar. De bovenste lijn heeft een ZSS van 0,2 cm/jaar (als de referentiesom), maar dan zonder een 4% getijslag toename. Bagger- en stortvolumes waren in alle sommen hetzelfde. (figuur afkomstig uit Wang, 1997)

Volgens de ASMITA berekeningen heeft ook sedimentbeheer van de Westerschelde invloed op de sedimentuitwisseling met de monding, zie verder Bijlage B.

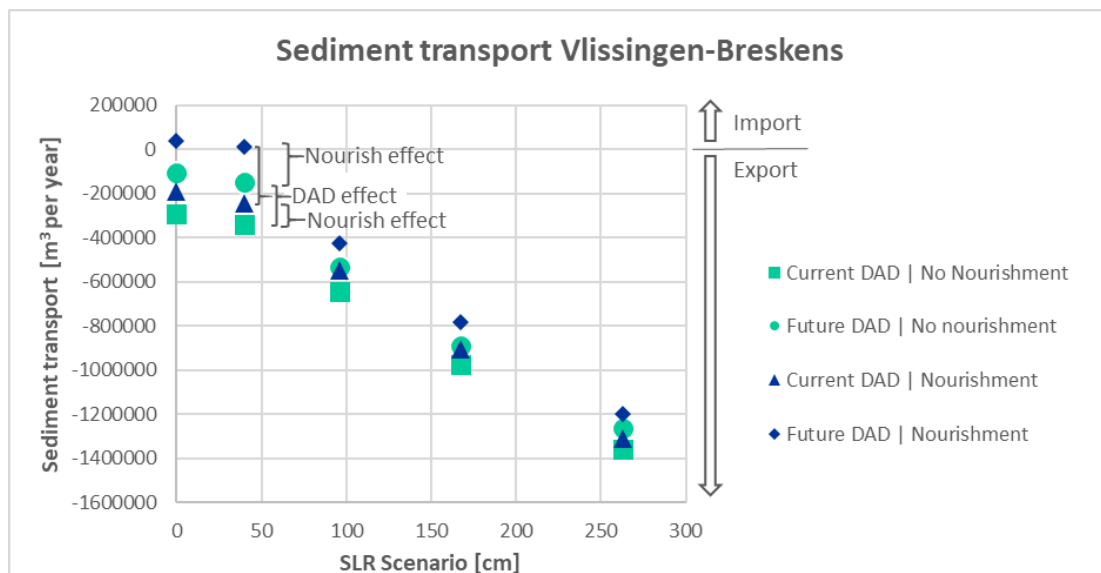
Later is door Jeuken et al. (2002) met het ESTMORF modelinstrumentarium het effect van ZSS bestudeerd. ESTMORF hanteert hetzelfde modelconcept als ASMITA, met het verschil dat de getijbeweging (incl. het effect van morfologische veranderingen) wordt uitgerekend met een 1D numeriek model (Wang & Van Helvert, 2001). En anders dan Wang (1997) dat één staatvariabele hanteerde (nat volume), onderscheidden Jeuken et al. de morfologische eenheden geul (onder gemiddeld laag water), laag gedeelte intergetijdengebied (GLW tot gemiddeld zeeniveau) en hoog gedeelte intergetijdengebied (gemiddeld zeeniveau tot gemiddeld hoogwater).

De modelberekeningen laten een sedimentexport zijn van de Westerschelde naar de monding van ~1,5 miljoen m³/jaar die door ZSS van 0,6 m/eeuw enigszins versterkt wordt (Figuur 3.28). Merk op dat in deze berekeningen ook een oost-west bagger- en stort-strategie is meegenomen. Jeuken et al. (2002) verklaren het effect van de ZSS op de sedimentexport via een groter evenwichtsvolume van de geulen, via een toename van de komberging en het kombergende oppervlakte. De hieraan gekoppelde erosie van de geulen versterkt de zandexport. Dit effect is sterker dan toename van het watervolume door ZSS, en de hiermee gepaard gaande sedimentbehoefte in de Westerschelde.



Figuur 3.28 Sedimentbalans [miljoen m³] over de periode 1999-2030 zonder ZSS (bovenste paneel) en over de periode 1999-2038 met ZSS van 0,6 m/eeuw (onderste paneel). (figuren afkomstig uit Jeuken et al., 2002)

Röbke et al. (in voorbereiding) berekenen met een Delft3D model een zandexport over de lijn Vlissingen-Breskens van 0,1-1,4 miljoen m³/jaar over de periode 2020-2100 afhankelijk van ZSS, baggeren/storten en kustsuppleties van ca. 1 miljoen m³/jaar in het mondingsgebied (met 25 jaar ingespeelde bodem; zonder golven; lineaire ZSS), zie Figuur 3.29. Een grotere ZSS stijging zorgt voor een grotere zandexport, en meer storten in diepe delen ("future DAD") verhoogt de export eveneens. Kustsuppleties leiden tot een relatieve afname van het zandexport vooral in de scenario's met kleine ZSS. Röbke et al. koppelen de toename van de zandexport door ZSS aan een afname van de vloeddominantie/toename van de ebdominantie als gevolg van de grotere waterdiepte.



Figuur 3.29 Netto zandtransport over de lijn Vlissingen-Breskens berekend met een Delft3D model over de periode 2020-2100. (figuur afkomstig uit Röbbke et al., in voorbereiding)

Het is duidelijk dat er nog geen eenduidig conceptueel model is van de sedimentuitwisseling tussen de Westerschelde en het mondingsgebied. En dat er nog een aantal onbeantwoorde vragen is, zoals bijvoorbeeld: *Wat zijn de sturende mechanismen (getijasymmetrie, retourstroming, sedimentvraag)? Hoe wordt dit beïnvloed door ZSS en beheer van de Westerschelde?*

De Vlake van de Raan bestaat uit permanent overstroomde zandbanken (H1110B), een habitatype dat veelal aanwezig is in de zuidelijke Bocht van de Noordzee, met uitgesproken zandbankcomplexen langs de zuidoost Engelse kust en de Noord-Franse, Belgische en Zuid-Nederlandse kust (Degraer et al., 2010). Zandbanken als deze zijn zeldzaam in heel Europa en van groot belang als leefomgeving van bodemdieren, zeezoogdieren en vissen. In 2010 is de Vlake van de Raan door de toenmalige minister van Economische Zaken aangewezen als Natura 2000-gebied. Sinds eind maart 2016 is er voor de Vlake van de Raan een beheerplan van kracht, opgesteld door Rijkswaterstaat en het Ministerie van Economische Zaken samen met belanghebbenden, om er voor te zorgen dat de natuurwaarden in dit zeegebied behouden blijven (Beheerplan 2016). Het Natura2000-gebied Vlake van de Raan grenst aan de noordkant direct aan het Natura2000-gebied Voordelta en in het oosten aan het Natura2000-gebied Westerschelde & Saeflinghe en in het zuiden aan het Belgische Natura2000-gebied Vlake van de Raan.

In dit hoofdstuk wordt een kort overzicht gegeven van het beheer en beleid van de Schelde-monding, waarna de status van bodemdieren, vogels, vissen en zeezoogdieren aan de hand van beschikbare literatuur worden besproken.

4.1 Natuurbeleid en beheer voor de Schelde-monding

In de Schelde-monding ligt de Vlake voor de Raan. Voor de Vlake van de Raan is een beheerplan opgesteld, wat een vereiste is voor elk Natura2000 gebied onder de NB-wet 1998. In dit beheerplan worden zowel het internationale als nationale beleid samengebracht. Hier volgt een korte schets van de meest relevante programma's en verdragen. De Schelde-monding valt onder de kustzone en daarmee onder het **Noordzeebeleid**. Vanuit het Noordzeebeleid wordt de ecosysteembenadering toegepast en is het ruimtelijk beheer gericht op duurzame ontwikkeling en duurzaam ruimtegebruik. De bescherming van de natuur voor de gehele kustzone is vastgelegd in een afwegingskader (**Integraal Beheerplan Noordzee**). Naast nationale kaders zijn er ook internationale kaders van toepassing zoals OSPAR (*OSPAR is het vervolg op twee eerdere verdragen het OSlo-verdrag en PARIjs-verdrag*), KRM (Kaderrichtlijn Marien), KRW (Kaderrichtlijn Water) en Natura2000. In het kader van **OSPAR** is de Vlake van de Raan een beschermd zeegebied. Voor de gehele Noordzee, dus inclusief de Schelde-monding worden in het kader van de **KRM** maatregelen getroffen om de biodiversiteit te verbeteren, vervuiling terug te dringen en onderwatergeluid te verminderen. Deze maatregelen hebben een positieve uitwerking op het functioneren van de Schelde-monding en de staat van instandhouding van de Vlake van de Raan. Ook de landelijke doelstelling van de **KRW** om de ecologische en chemische waterkwaliteit van de Europese rivierstroomgebieden te herstellen hebben een positieve uitwerking op de Schelde-monding. De Schelde-monding valt geheel binnen de KRW onder "Kustwater: open en euhalien", (K3). Aangezien de Schelde-monding zowel onder de KRM als de KRW valt geldt voor de KRM dat deze alleen van toepassing is op elementen die van belang zijn voor de bescherming van het mariene milieu en die niet vallen onder de KRW.

Andere programma's met een visie en strategie voor de kustzone zijn hieronder opgesomd.

- de **Programmatistische Aanpak Grote Wateren (PAGW)**, waarin drie oplossingsrichtingen (1. verbindingen herstellen, 2. leefgebieden ontwikkelen en herstellen en 3. een uitgekiende sedimentstrategie toepassen) centraal staan om de natuur in de Zuidwestelijke Delta robuuster te maken;
- het **Deltaprogramma kust**, waarin gewerkt wordt aan een lange termijn visie voor de kust
- het **Nationaal waterplan**, waarin wordt gestreefd naar een gezond en veerkrachtig marien ecosysteem;

- het **VIBEG-akkoord** met betrekking op visserijmaatregelen voor Natura2000 gebieden. Voor het VIBEG-akkoord is er specifiek voor de Vlakte van de Raan afgesproken dat er vanaf 2016 niet meer met wekkerkettingen gevisst wordt, dat er enkel duurzame visserij plaats zal vinden en dat de intensiteit van visserij niet zal toenemen. Daarnaast zijn er specifieke onderzoeksgebieden aangewezen.

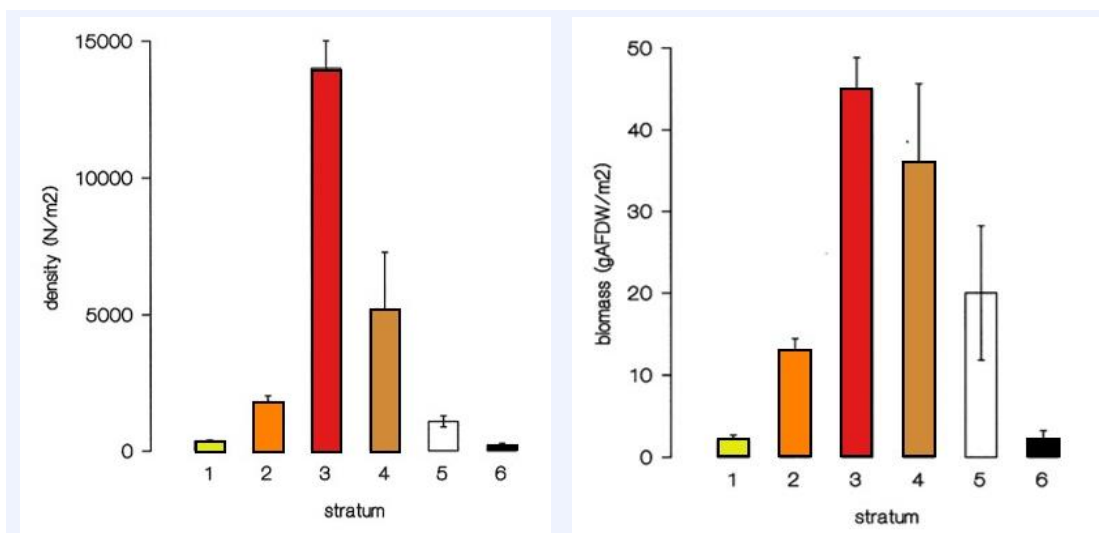
In het kader van Natura2000 zijn er doelstellingen opgesteld ten aanzien van oppervlakte en kwaliteit voor specifieke habitattypen en habitatsoorten. De Vlakte van de Raan is in het kader van Natura2000 aangewezen als habitattype H1110B en van belang voor de habitatsoorten bruinvis, grijze zeehond, gewone zeehond, zeeprik, rivierprik en fint. Voor het habitattype H1110B en deze habitatsoorten is de landelijke doelstelling behoud van het huidige oppervlakte en behoud van de huidige kwaliteit. Alleen voor de bruinvis geldt een verbeteropgave ten aanzien van de kwaliteit. De landelijke staat van instandhouding (LSI) voor H1110B, bruinvis, grijze zeehond, zeeprik en rivierprik is matig-ongunstig. Voor de gewone zeehond is de status gunstig en voor de fint is deze ongunstig. In het beheerplan wordt de bijdrage van de Vlakte van de Raan aan de LSI in het kader van Natura2000 ingeschat als positief voor zeeprik, rivierprik en fint en gering ten aanzien van bruinvis, grijze zeehond en gewone zeehond (Beheerplan 2016). Dit is opvallend aangezien tegelijk gesteld wordt dat het onduidelijk is wat de trend is voor deze soorten op de Vlakte van de Raan. Ten aanzien van de Vlakte van de Raan is de huidige kwaliteit niet altijd één op één vergelijkbaar met het landelijke beeld. Zo is volgens het beheerplan op de Vlakte van de Raan de huidige kwaliteit voor de grijze zeehond, gewone zeehond, zeeprik, rivierprik en fint goed. Echter voor H1110B en de bruinvis wordt de kwaliteit als matig beoordeeld. De inschatting die gemaakt wordt in het Beheerplan 2016 gaat er vanuit dat onder het nu geldende beheerplan de doelstellingen van behoud van de kwaliteit van H1110 en de verbetering van de kwaliteit voor de bruinvis in respectievelijk de 1^{ste} en 2^{de} beheerperiode behaald zullen worden (Beheerplan 2016).

4.2 Bodemdieren

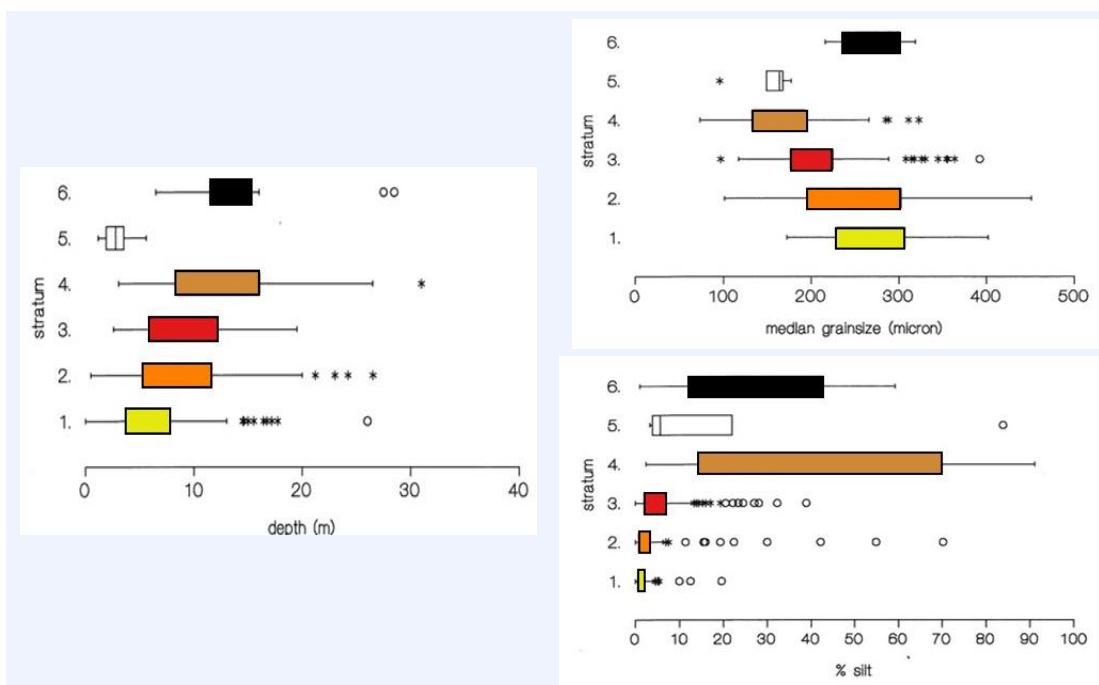
Bodemdieren hebben als voedsel voor vogels en vissen een belangrijke functie in de voedselketen voor krabben, vissen en vogels. Bodemdieren zijn daarnaast verantwoordelijk voor verschillende processen waarbij het sediment wordt omgewoeld, verplaatst of vastgeplakt of waarbij het indringen van water en zuurstof in de bodem wordt beïnvloed (Reise, 2002). In de Noordzee leven in en op de bodem meer dan duizend macrozoöbenthische soorten (Künitzer et al., 1992; Greenstreet et al., 2007; Rees et al., 2007). Sommige soorten kunnen onder veel verschillende omstandigheden leven en komen in een groot deel van de Noordzee voor (eury-topische soorten). Andere soorten komen alleen maar in specifieke habitats voor (stenotypische soorten). Soorten met gelijkaardige habitatpreferenties komen vaak samen voor en vormen zo een zogenaamde gemeenschap. De grenzen tussen deze gemeenschappen zijn niet scherp en gaan gelijk aan de fysische omgeving geleidelijk over van de ene naar de andere gemeenschap (zie o.a. Ysebaert et al., 2003; Van Hoey et al., 2004). De gemeenschappen worden meestal benoemd naar het type habitat of de kenmerkende of dominante soorten (zie o.a. Petersen, 1924; Jones, 1950; Duineveld et al., 1991; Rachor & Nehmer, 2003; Rees et al., 2007; Degraer et al., 2006). Het grootste deel van de kustzone kan gezien worden als een enkele gemeenschap met ruimtelijke (en temporele) verschillen (De Mesel et al., 2011; Eisma, 1966), bekend als de *Abra alba-gemeenschap* (Van Hoey et al., 2004 en referenties daarin). Lokaal, met name in het zuidelijke deel van de monding van de Schelde en in het mondingsgebied van het Haringvliet is het sediment slibrijker ten opzicht van het omliggende gebied en is er sprake van een andere gemeenschap, de *Limecola balthica-gemeenschap*.

4.2.1 Verdeling van de bodemdiergemeenschappen over het mondingsgebied

In het mondingsgebied van de Schelde zijn de dichtheden lager dan in andere delen van de Voordelta. Toch is de gemiddelde biomassa vergelijkbaar met de andere delen van de Voordelta (Craeymeersch et al., 1990; Wijnhoven et al., 2006). Voor het Nederlandse deel heeft Craeymeersch et al. (1990) op basis van data verzameld tussen 1984 en 1988 ruimtelijk zes gemeenschappen onderscheiden waarbij de monding van de Westerschelde en de Vlakte van de



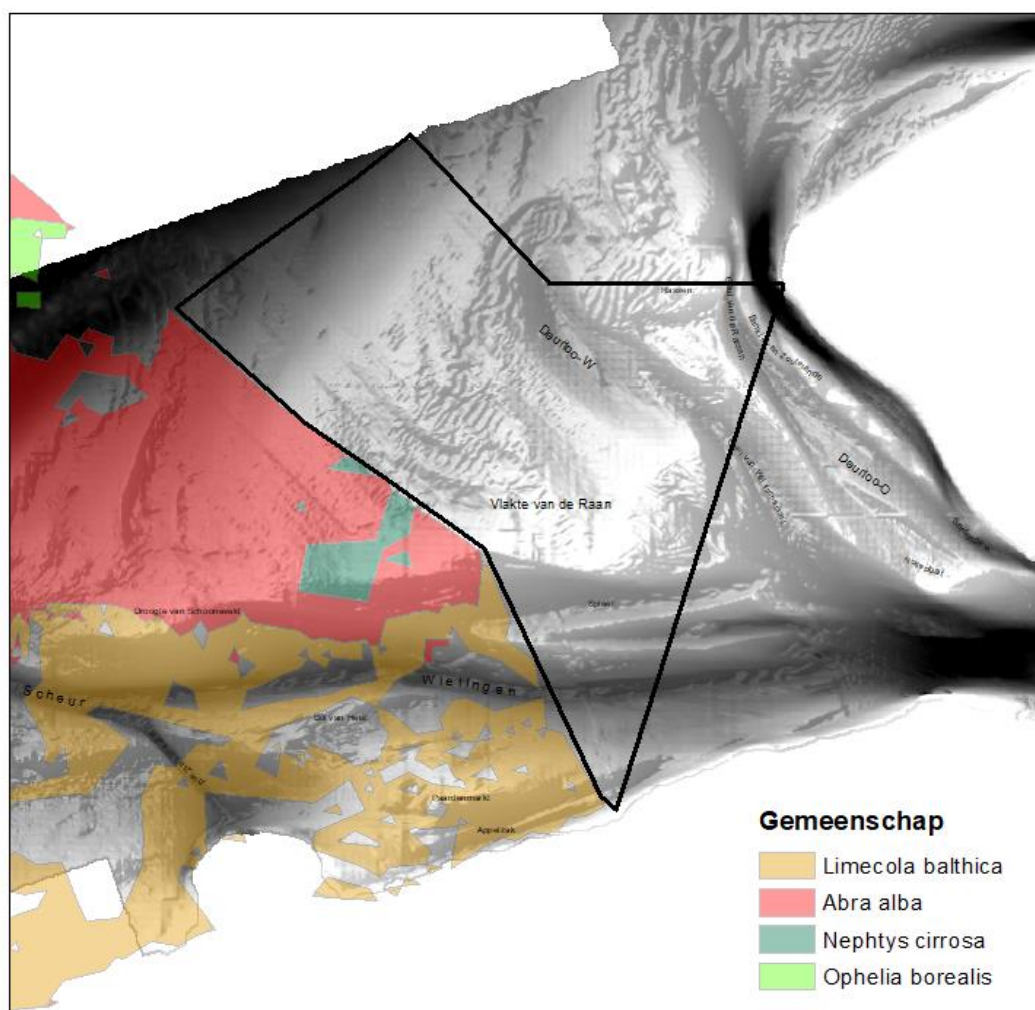
Figuur 4.2 Verdeling dichtheid (density) (links) en biomassa (biomass) (rechts) tussen de bodemgemeenschappen verkregen aan de hand van bemonsteringen uitgevoerd tussen 1984 en 1986. (Craeymeersch et al. (1990)).



Figuur 4.3 Verdeling van diepte (depth) (links), mediane korrelgrootte (median grain size) (rechtsboven) en slib percentage (silt) (rechtsonder) voor de gebieden gerelateerd aan de bodemgemeenschappen verkregen aan de hand van bemonsteringen uitgevoerd tussen 1984 en 1986. (Craeymeersch et al. (1990)).

Het zuidelijke deel van de Schelde-monding ligt op het op het Belgisch Continentaal Plat (BCP). Degraer et al. (2008) geeft de ruimtelijke verspreiding van bodemdiergemeenschappen weer op basis van habitatgeschiktheidsmodellen en data uit 1994-2000 (Figuur 4.4). Recent is een nieuwe analyse gedaan met data van 1994-2012 (Breine et al., 2018) met vergelijkbare uitkomsten. In de Scheldemonding worden drie van de vier gemeenschappen van het BCP geïdentificeerd. De *Abra alba* (witte dunschalen) gemeenschap op het grootste deel van de Vlakte van de Raan. Op een klein gebiedje de *Nephtys cirrosa* (borstelworm) gemeenschap. Op de overgangen naar de geulen en nabij de kust op de Appenzak en de Paardenplaat komt de *Limecola balthica* (nonnetje) gemeenschap voor (Van Hoey et al., 2004; Degraer et al., 2006). De *Abra alba* gemeenschap wordt

gezien als het rijkste biotoop binnen het Belgische deel van de Noordzee (Van Hoey et al., 2004). Tussen deze gemeenschappen bestaan overgangsgemeenschappen. Deze zijn bij de modellering aan een van de vier hoofdgemeenschappen toegewezen (Van Hoey et al., 2004). Echter, zijn de habitatgeschiktheidsmodellen gevoelig voor instelparameters van het model om te komen tot de gemeenschappen. Bij een iets hogere waarde valt de top van de Vlakte van de Raan in de *Nephtys cirrosa* gemeenschap (mond. med. K. Hostens) en sluit daarmee aan op de resultaten van Craymeersch (1990).

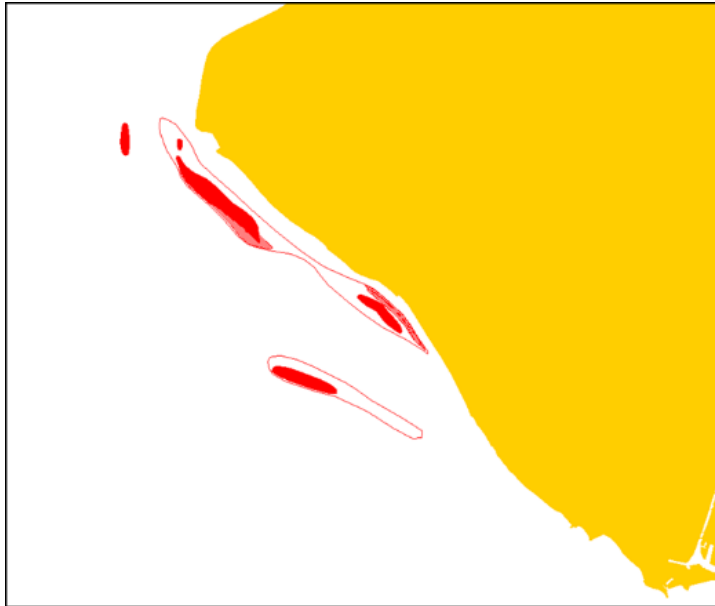


Figuur 4.4 Gemodelleerde distributie van benthische biotopen op het Belgische deel van de Vlakte van de Raan. Figuur naar Degraer et al. (2008).

Breine et al. (2018) onderscheiden ook een vijfde gemeenschap op het BCP: de *Magelona-Ensis leei* gemeenschap. Deze laatste is het meest verwant aan de *Abra alba* gemeenschap, zowel faunistisch als sedimentologisch. Ze wordt vooral dicht tegen de kust gevonden, en is wellicht een 'nieuwe' variant binnen de *Abra alba* gemeenschap. Ook De Mesel et al. (2011) typeren *Ensis leei* als een tegenwoordig kenmerkende soort voor de *Abra alba* gemeenschap

4.2.2 Mosselbanken

In sommige jaren wordt in het Oostgat en Deurloo mosselzaad gevonden (zie Figuur 4.5). De mosselen ontwikkelen zich niet tot meerjarige mosselbanken, want het meeste mosselzaad wordt door zeesterren opgegeten (mond. med. M. van Stralen).

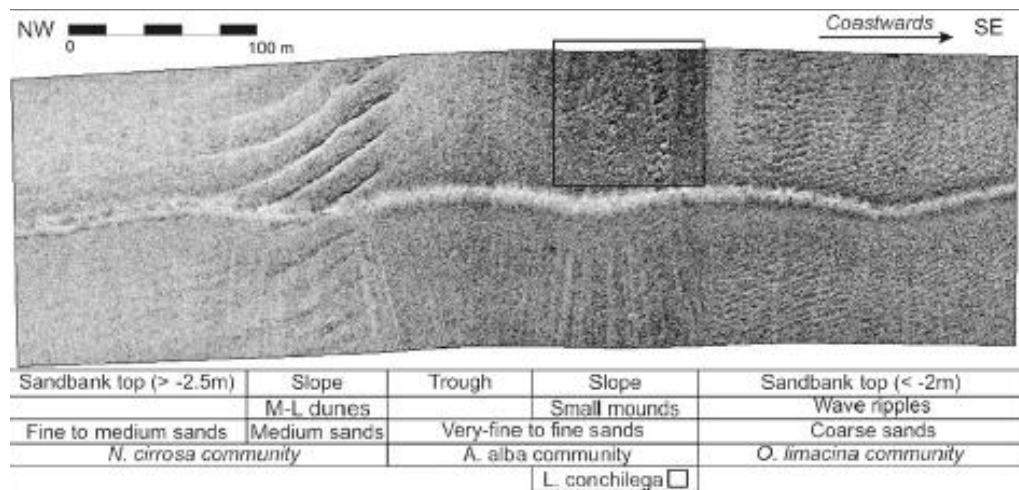


Figuur 4.5 Vindplaatsen van mosselzaad. Donker rood: contouren survey MarinX in januari 2009. Rood gearceerd: contouren surveys in andere jaren vanaf 2000, voor zover bekend. Rood omlijnd: globaal ingetekend gebied waar het mosselzaad tijdens de survey alweer was opgevreten door zeesterren (Deurloo, Oostgat) en waar tijdens de visserij nog gemiste plekjes zaad zijn gevonden (Oostgat) (Bron: Bestandsopnamen Bureau MarinX in opdracht van de PO mosselcultuur).

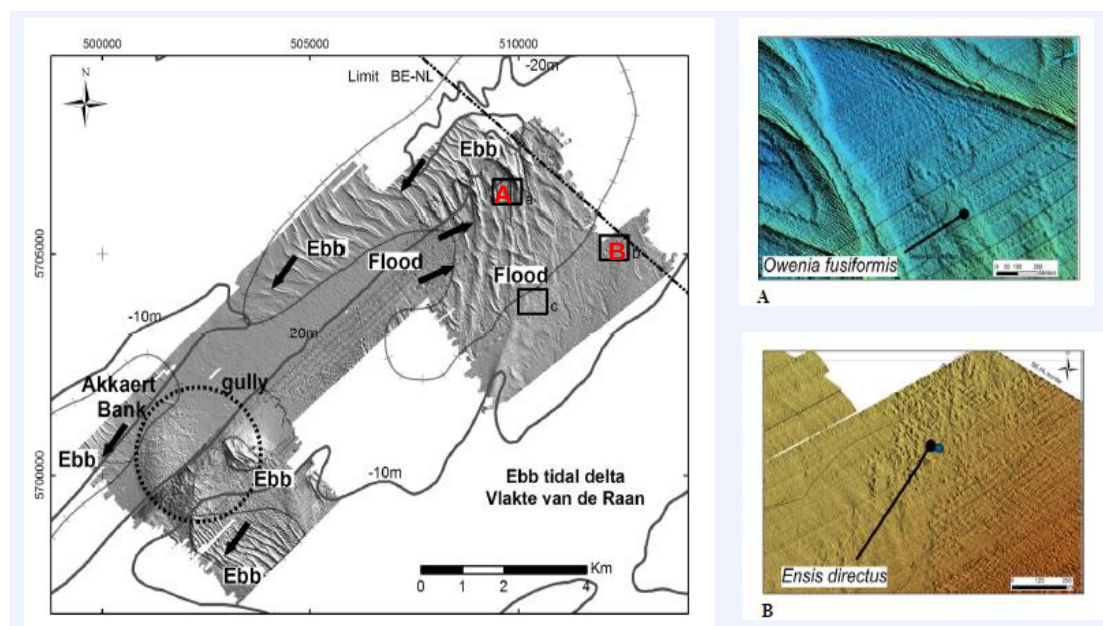
4.2.3 Ruimtelijke verspreiding van bodemdieren

De hierboven geschetste ruimtelijke verspreiding van bodemdiergemeenschappen geven een beeld op een grove schaal. Maar ook op kleine(re) schaal hebben verschillen in geomorfologie en sedimentkarakteristieken een invloed op de bodemdier-gemeenschappen. Voorbeelden hiervan zijn waargenomen in gebieden met zandgolven waar significante verschillen in sediment en bodemdiersamenstelling tussen de toppen en troggen zijn waargenomen (Baptist et al., 2006; Damveld et al., 2018). Ook voor de meer stabiele banken voor de kust op ongeveer 20 meter diepte zijn voor de toppen, troggen en flanken van de bank onderscheidende gemeenschappen waargenomen waarbij de verschillen in sediment als belangrijkste sturende parameter wordt aangemerkt (Markert et al., 2015, van Dijk et al., 2012). Dicht langs de kust, op een waterdiepte tussen de 5 en 8 meter, gelijk aan de Vlake van de Raan, liggen de brekerbanken. De brekerbanken zijn zeer dynamisch en migreren binnen enkele jaren in zeewaartse richting waarna ze verdwijnen. Ondanks de dynamische omstandigheden waarbij golven en stroming er dagelijks voor zorgen dat het sediment in beweging is, worden er op de toppen, troggen en flanken van de brekerbanken verschillende gemeenschappen waargenomen met elk hun eigen karakteristieke soorten (Holzhauer et al., 2020; Janssen et al., 2008; van Dalfsen, 2009; van Dalfsen & Oosterbaan, 1996).

Remote sensing technieken zoals side scan sonar opnames zijn ook instaat gebleken om de ruimtelijke verspreiding van bodemdieren op kleine schaal waar te nemen (Dolan et al., 2012). Een opname van een ondiepe zandbank nabij de Franse grens laat duidelijk de aanwezigheid van *Lanice conchilega* in de *Abra alba* gemeenschap langs de randen van een zandbank zien (Figuur 4.6). Echter, de monding van de Schelde is een minder geschikt habitat voor *Lanice conchilega* (Degraer & Hostens 2016). Op multibeam beelden nabij de Vlake van de Raan is een duidelijke link tussen vloed- en ebstromen, sedimentatie, bodemmorfolgie en voorkomen van bodemdieren waargenomen (Dolan et al., 2012) (Figuur 4.7).



Figuur 4.6 side scan sonar beeld van een transect over een ondiepe zandbank (Van Lancker et al., 2012).



Figuur 4.7 De morfologie van de zeebodem op fijne schaal gebaseerd op multibeam-waarnemingen. In het westen (cirkel) ligt een depot van baggerslib en ook zandduinen. In de geul ('gully', west) zijn de kleine heuvels indicatief voor bedekking door baggerslib (bv). In het oosten domineert een complex van zandduinen. Buiten deze zone, langs de helling van de Vlakte van de Raan, komt een hoge soortdiversiteit voor (Dolan et al., 2012).

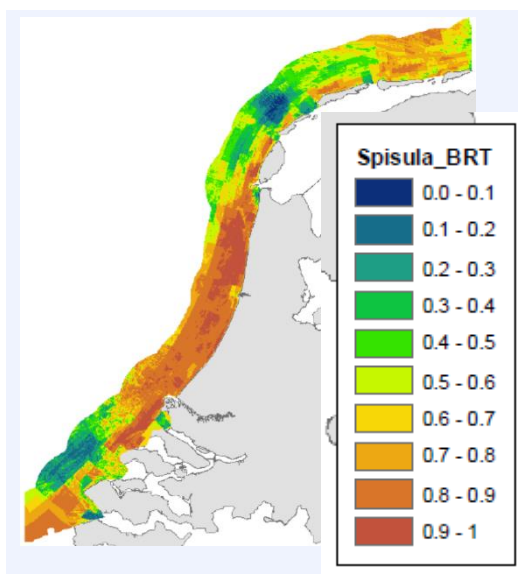
A. Dichte aggregaties van *O. fusiformis* in de dalen van de ribbels. Hun voorkomen is waarschijnlijk gerelateerd aan de fluxen van fijn materiaal zowel in de lengte- als de breedterichting van de geulen.

B. Deel van een lange band waar hoge dichtheden van *O. fusiformis* (11000 ind/m² en *E. leei* (>500 ind/m²) gevonden zijn. De afmetingen van de patronen zijn hier rond de 20m doorsnee, met een hoogte van 20-40m.

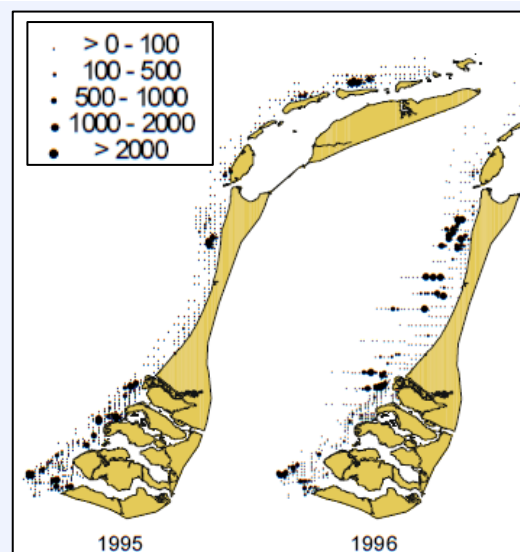
4.2.4 Kansenskaarten voor specifieke bodemdieren

Bij kansenskaarten voor schelpdieren wordt uitgegaan van het potentieel van een gebied voor het voorkomen van een bepaalde soort. De Mesel et al. (2011) beschrijven de kans op voorkomen van 5 soorten schelpdieren (*Ensis* sp., *Spisula subtruncata*, *Tellina fabula*, *Limecola balthica* en *Donax vittatus*) in de Nederlandse kustzone. Hiervoor zijn de gegevens van de WOT-schelpdiersurvey (1995-2009) gebruikt als input. Per monsterpunt is de maximale dichtheid ooit waargenomen uit de dataset gehaald en als input gebruikt. Als voorbeeld is in Figuur 4.8 de kansenskaart voor *Spisula subtruncata* weergegeven, samen met de daaraan ten grondslag liggende gegevens (Figuur 4.9).

Hieruit is te zien dat het potentieel voor *Spisula subtruncata* voor de monding van de Schelde vrij hoog is. In het mondingsgebied van de Schelde kwamen vooral halverwege de jaren negentig grote dichtheden voor (Figuur 4.9). In Figuur 4.10 is recente data van dichtheden *Spisula subtruncata* weergegeven, op basis van bemonsteringen in 2019.



Figuur 4.8 Kansenkaart voor *Spisula subtruncata* (De Mesel et al., 2011).



Figuur 4.9 Dichtheid (ind/m^2) van *Spisula subtruncata* in 1995 en 1996 (Craeymeersch et al., 2001) WOT gegevens. Deze data zijn gebruikt voor de kansenkaart in Figuur 4.8.



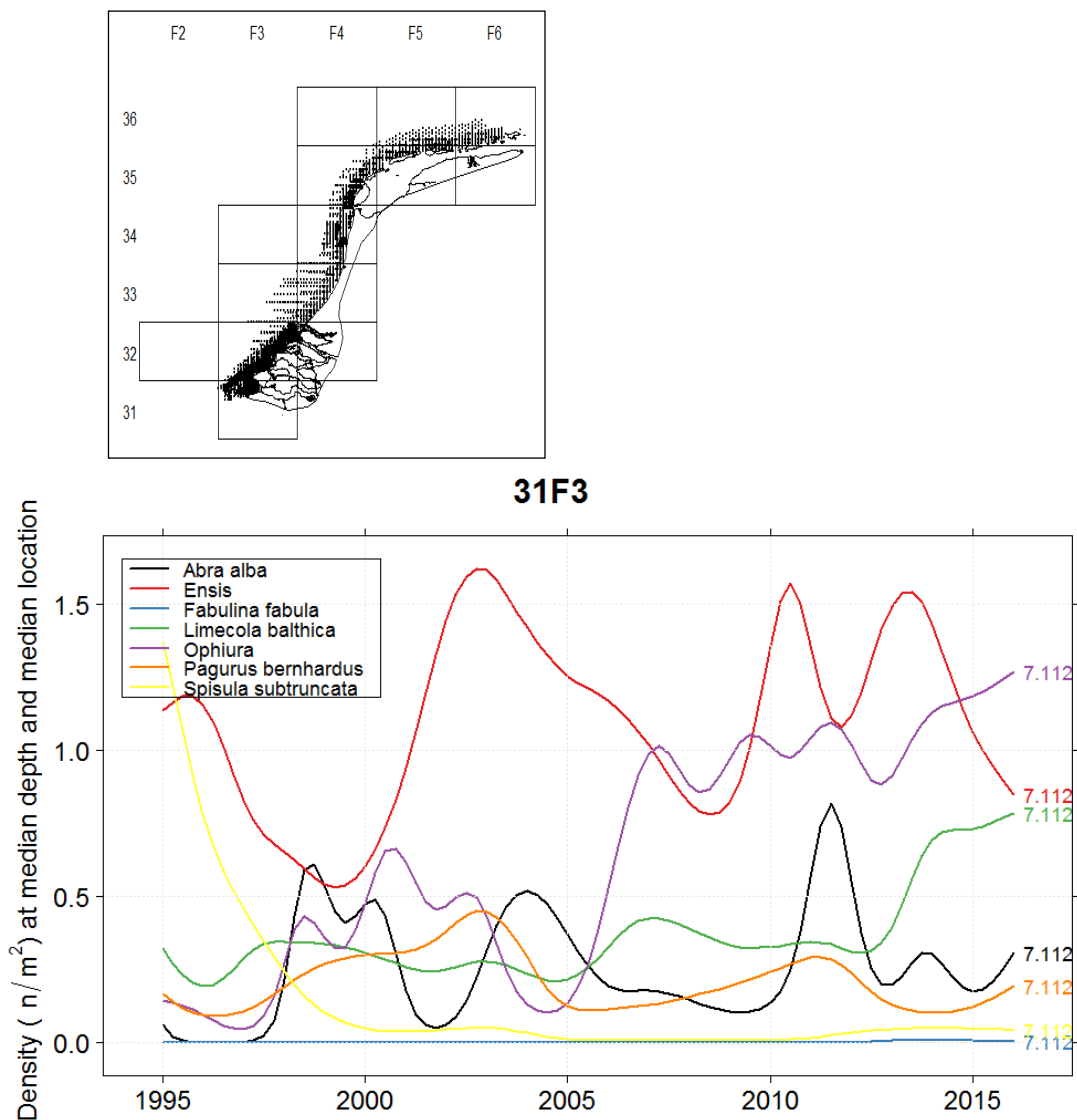
Figuur 4.10 Dichtheid (ind/m^2) van *Spisula subtruncata* in 2019 op basis van WOT gegevens Perdon et al. (2020), links aantallen grote *Spisula*'s, rechts de biomassa.

4.2.5 Trends en jaar op jaar variatie

Binnen iedere gemeenschap zijn er ruimtelijke en temporele verschillen, gerelateerd aan o.a. abiotische gradiënten en verschillen in broedvalsucces. Veel bodemdiersoorten kennen grote temporele verschillen. Met name schelpdieren kennen periodes met een goede broedval en periodes met een slechte broedval.

Trendanalyses voor de Westerscheldemonding zijn beperkt uitgevoerd. Dat komt voor de MWTL-box-corer data met name door de beperkte hoeveelheid gegevens gedurende opeenvolgende jaren (Wijnhoven et al., 2006). Voor schelpdieren zijn meer gegevens beschikbaar dankzij de WOT-surveys (WOT-Wettelijke Onderzoekstaken). Aan de hand van deze data zijn enkele trendanalyses uitgevoerd, maar over een relatief korte tijdsperiode. Craeymeersch (1999) vergelijkt trends in de periode 1993-1997 in de vier buitendelta's van de Voordelta en laat zien dat het verloop in de delta's soms niet synchroon is (bijv. voor *Limecola balthica*), en soms wel (*Spisula subtruncata*). Daarnaast zijn de dichtheden per gebied wel sterk verschillend. Ook uit een later onderzoek over periode 1993-2005 blijkt dat het dichtheidsverloop van schelpdieren meestal niet synchroon verloopt in verschillende deelgebieden van de Voordelta (Craeymeersch & Wijsman, 2006).

In een analyse in het kader van PMR zijn trends opgewerkt voor onder andere de Westerscheldemonding (ICES vak 31F, zie Figuur 4.11). Hieruit blijken voor sommige soorten grote jaarlijkse schommelingen (bv *Ensis* en *Abra alba*) en voor sommige soorten duidelijke trends (bv afname *Spisula subtruncata* en toename *Ophiura*).



Figuur 4.11 Trends van zeven verschillende soorten gevangen in de WOT schelpdiersurvey in ICES vak 31F (opwerking in het kader van PMR, Tulp et al., 2018).

4.3 Vis

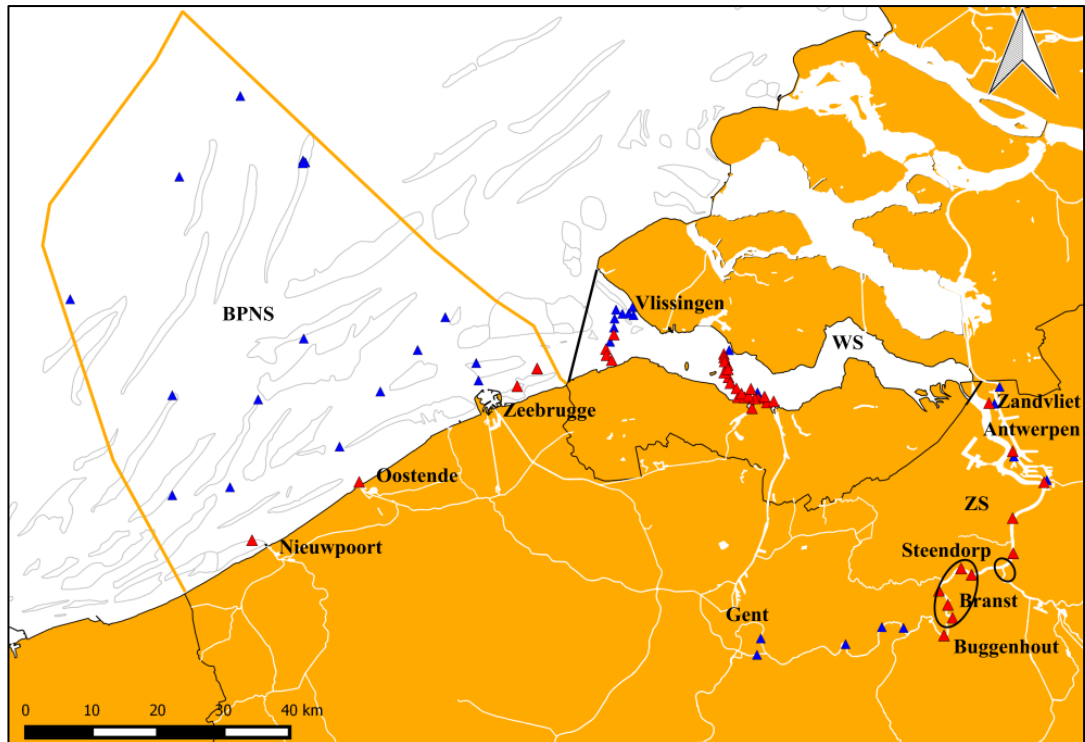
In het kader van Natura2000 wordt de Vlakte van de Raan gezien als een gebied dat rijk is aan vissoorten en van belang is als opgroeigebied voor jonge vissen (Beheerplan 2016). Vis is o.a. voedsel voor bruinvissen en zeehonden. Het gebied is vanwege zijn ligging waarschijnlijk belangrijk voor zowel trekvis, residente vissoorten als de echte kinderkamers soorten. Er ontbreekt een specifieke analyse van beschikbare gegevens voor dit gebied. Er zijn monitoringgegevens beschikbaar, maar er zijn nooit geen analyses van die gegevens toegespitst op de Westerscheldmonding uitgevoerd, en al helemaal niet naar de effecten van bodemberoerende visserij of de relatie met bodemfauna. Daarmee kan er geen uitspraak gedaan worden over het specifieke belang van de vlakte van de Raan voor trekvis. In het kader van deze rapportage zijn wel enkele basale opwerkingen op basis van de Nederlandse Demersal Fish Survey (DFS) data gedaan (zie Figuur 4.15 en Figuur 4.16).

4.3.1 Trekvis

De Vlakte van de Raan is een doortrekgebied voor trekvis (fint, zeeprk en rivierprk) om paai- en opgroeigebieden in en langs de Schelde te bereiken. De zeeprk en rivierprk leven als parasiet

op andere vissen. De zeeprík trekt in de periode februari-juni stroomopwaarts plaatsvindt. De rivierprík trekt in het najaar vanuit zee de rivieren op, waar paai in maart-mei plaatsvindt. Nadat de larven twee tot vijf jaar in de rivierbodem hebben geleefd, is er een metamorfose en trekken de vissen naar zee. Jonge rivierprikken doen dit van mei tot oktober, jonge zeepríkken in december en januari.

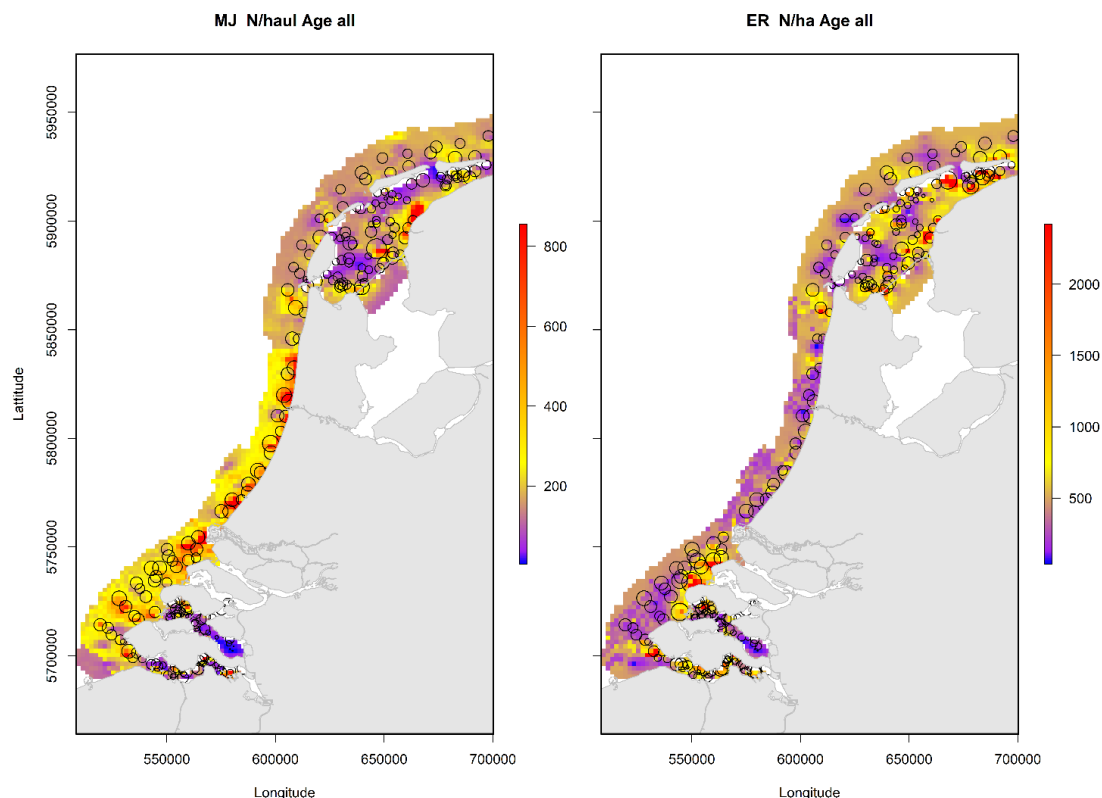
De fint is een haringachtige die het grootste deel van zijn leven in zee en estuaria doorbrengt. De trek van zee naar het zoete water vindt plaats kort voorafgaand aan de paaitijd in mei-juni. Na de paai trekken de volwassen vissen weer naar zee. Sinds 2007 zijn er weer volwassen finten in de Zeeschelde waargenomen. In 2009 wees de vangst van een juveniel exemplaar op voortplanting. Dat werd in 2014 bevestigd door het horen en zien van paaigedrag in het ruime gebied tussen de monding van de Rupel en Baasrode (Website INBO).



Figuur 4.12 De ontvangstations (driehoekjes) werden op strategisch belangrijke plaatsen bevestigd zodat de mogelijkheid van detectie van de vissen maximaal is. Op de rode driehoekjes werden finten gedetecteerd, op de blauwe niet. Uit: <https://www.inbo.be/nl/migratie-en-paaiactiviteiten-van-de-fint-de-zeeschelde-nb-07-17>

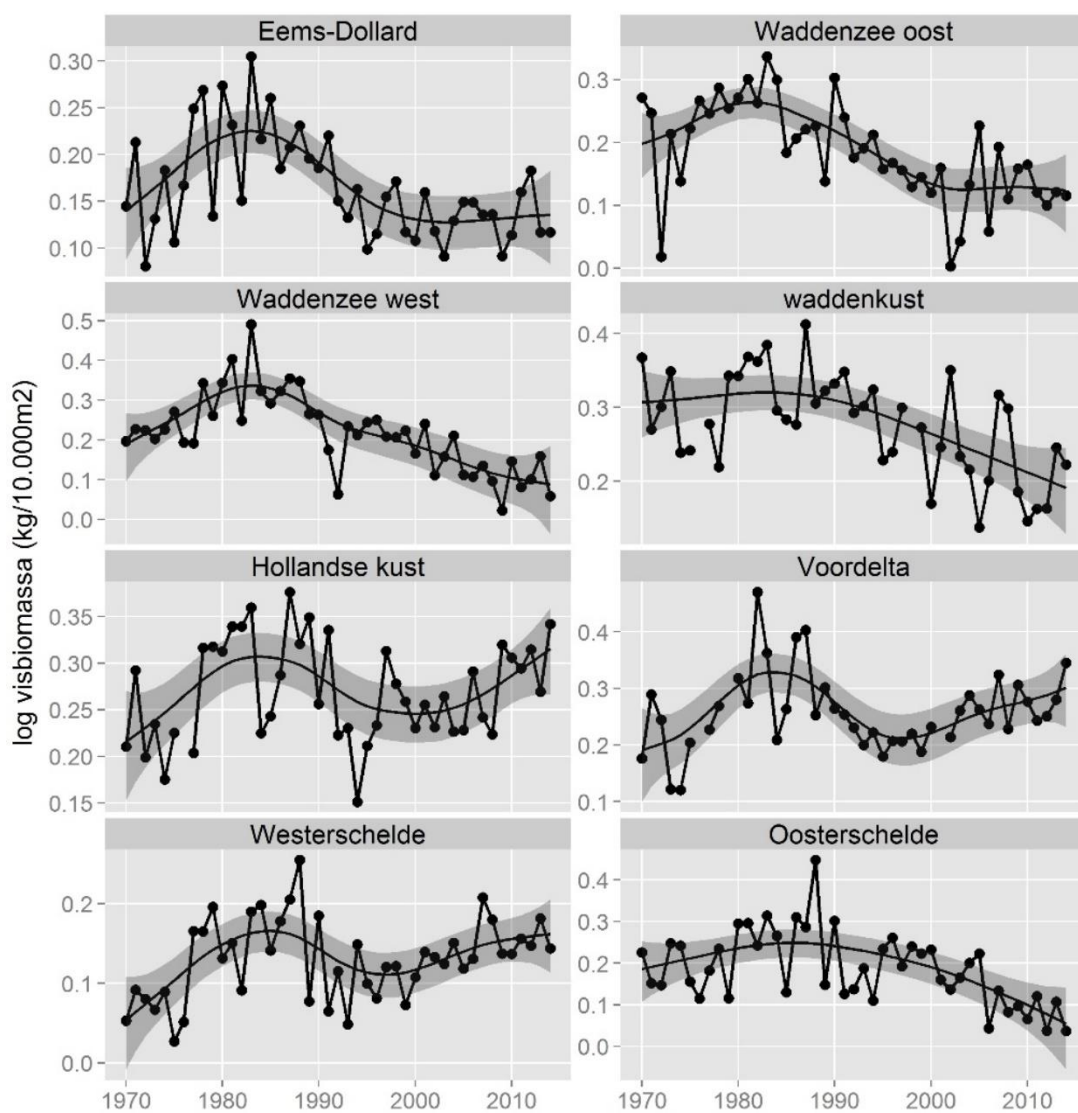
4.3.2 Kinderkamersoorten

De Nederlandse Demersal Fish Survey (DFS) levert informatie over dichtheden, leeftijden (platvis), soortenrijkdom, soortdiversiteit, samenstelling van de bodem- en epibenthische visgemeenschap (krabben, zeesterren, slangsterren). Er is nooit een analyse uitgevoerd op basis van de DFS data naar het gebied Vlake van de Raan/Schelde monding. DFS data zijn wel opgewerkt in het kader van PMR via R-INLA modellering, waarbij de verspreiding van bot, tong, schol en schar voor de 0 en 1 groep en voor de soortgroepen marien juvenielen en residente soorten is gemodelleerd in relatie tot abiotische factoren en visserijdruk voor de hele Nederlandse kust (Figuur 4.13). Hieruit blijkt dat het mondingsgebied van de Schelde belangrijk is voor zowel kinderkamersoorten (mariene juvenielen (MJ)) als estuariene residente soorten (ER). In al deze analyses zijn juist de drie monsterpunten op de Vlake van de Raan niet meegenomen (vanwege het afwijkende karakter van deze punten) voor de vraagstelling in het kader van PMR.



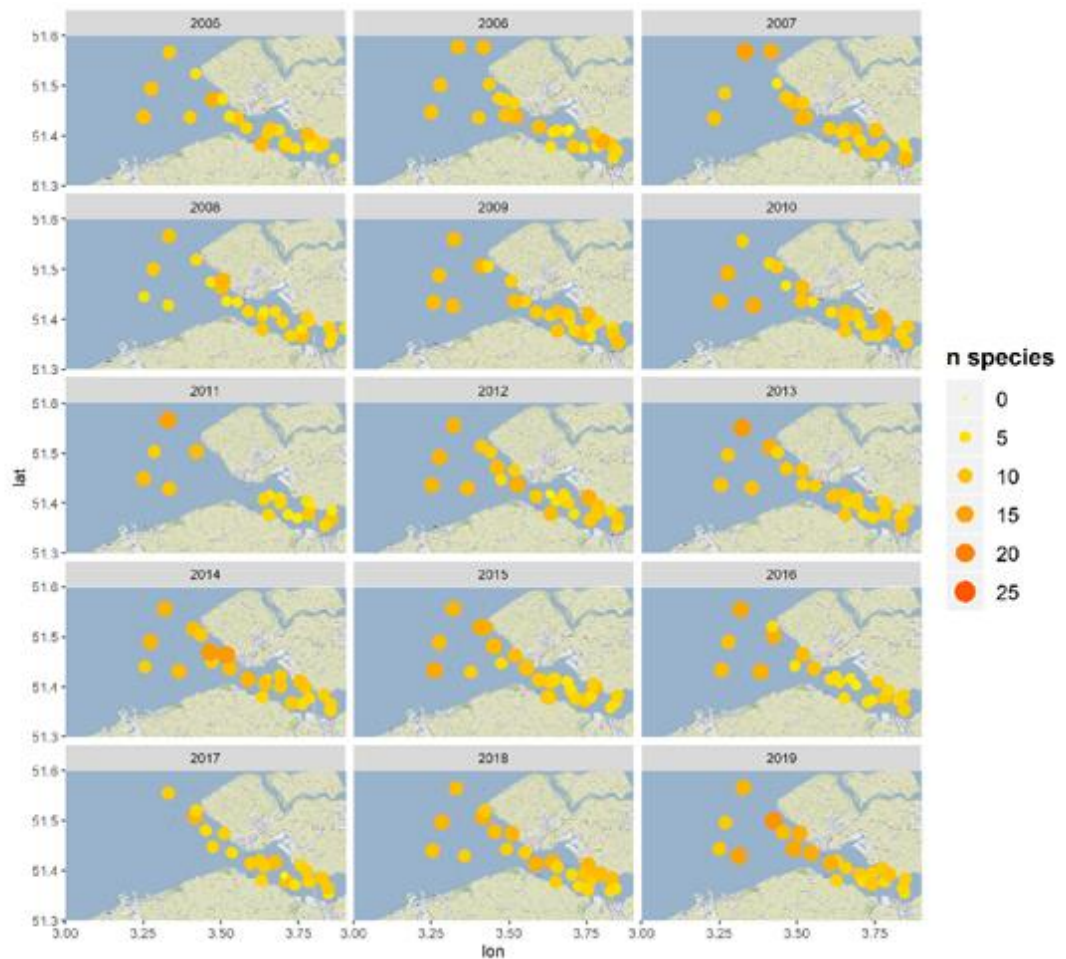
Figuur 4.13 Voorbeelden van R-INLA modellering: verspreiding kinderkamersoorten (MJ, links) en estuariene residente soorten (ER, rechts) voor het jaar 2018 (Aarts et al., 2019). De bollen geven de visdichtheden (n/ha) weer, de kleurschalen geven de voorspelde dichtheden op basis van het model voor het jaar 2018. Let op: in deze analyse zijn dus de drie punten op de Vlakte van de Raan niet meegenomen.

Trendanalyses zijn wel uitgevoerd voor de onderscheiden gebieden Westerschelde en de Voordelta in het kader van PMR en in een aantal publicaties (Tulp et al., 2008; Tulp, 2015; Aarts et al., 2019a). Echter de Vlakte van de Raan is hierin niet meegenomen vanwege bovengenoemde reden. Verder vertonen de trends in de voor de scheldemonding meest relevant gebieden (Voordelta en Westerschelde) schommelingen en zijn ze zeer soortspecifiek. Over het algemeen laat de totale visbiomassa in deze gebieden een piek zien in de jaren 1980-1990 gevolgd door een afname en sinds 2000 weer een stijging (Figuur 4.14).



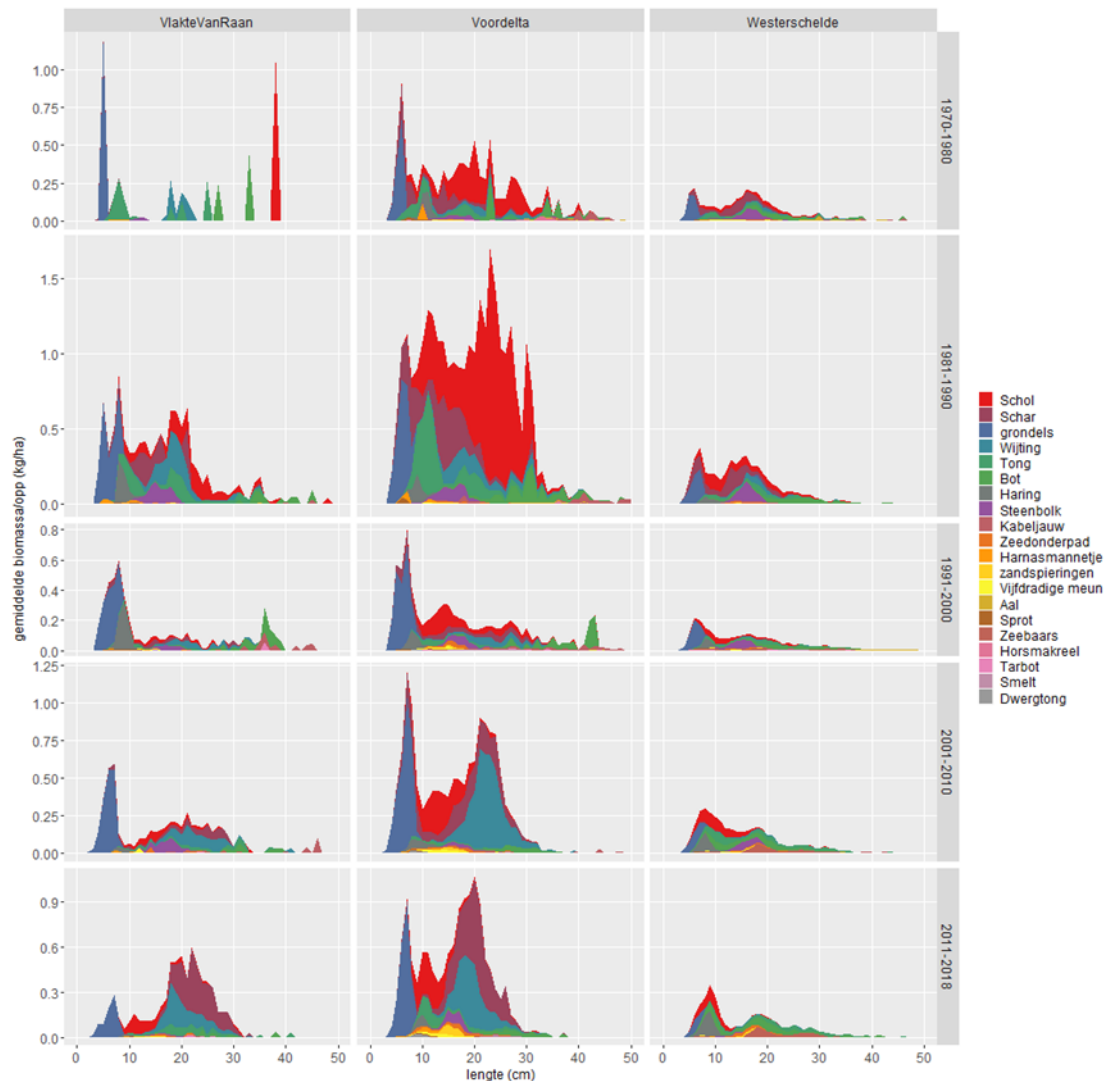
Figuur 4.14 Trends in log-getransformeerde visbiomassa voor verschillende delen van de Nederlandse kust. NB. Voor de grafiek voor de Westerschelde is de Schelde-monding niet meegenomen.

Op basis van de DFS-data voor de Westerschelde zijn specifiek voor deze rapportage kaartjes gemaakt van het aantal jaarlijks aangetroffen vissoorten in de Westerschelde over de periode 2005-2019 (Figuur 4.15). Tevens is de lengte-biomassa verhouding voor de 20 meest algemene soorten voor de drie punten op de Vlakte van de Raan in vergelijking met nabije gebieden (Westerschelde en Voordelta) weergegeven. Over het algemeen is het aantal soorten dat voorkomt op de Vlakte van de Raan groter dan in de Westerschelde (Figuur 4.15).



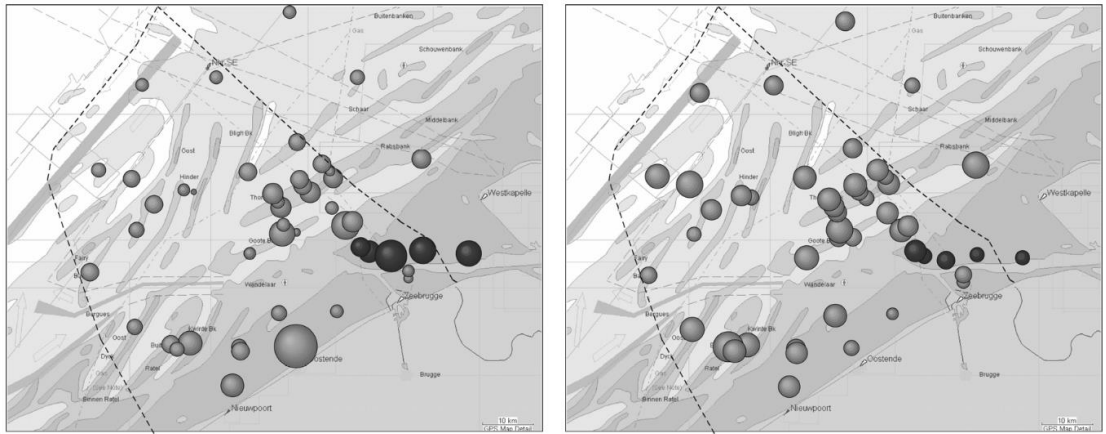
Figuur 4.15 Aantal soorten per DFS trek in de Westerscheldemonding op basis van de Nederlandse DFS in de periode 2005-2019.

De lengte-biomassaverdeling van het laatste decennium (Figuur 4.16, onderste panelen) geeft aan dat er op de Vlakte van de Raan relatief grotere vissen voorkomen dan in de Voordelta en Westerschelde, wat waarschijnlijk veroorzaakt wordt door de grotere diepte van de drie punten ten opzichte van de range aan dieptes van het veel grotere aantal punten in de Voordelta en Westerschelde. De soorten die het meest bijdragen aan de totale biomassa zijn schar, wijting, schol, grondels en tong.



Figuur 4.16 Lengte-biomassaverdelingen van de 20 meest algemene soorten in de trekken op de Vlakte van de Raan (de drie meest zuidwestelijk gelegen punten (open vierkantjes) in Figuur 5.5) in vergelijking met de Westerschelde en de Voordelta.

In 2006 is een analyse gedaan voor de Vlakte van de Raan op basis van de Belgische DFS data (Hostens en Moulaert, 2006). Aan de hand van gegevens uit de Belgische DFS-survey wordt de Vlakte van de Raan aangemerkt als een rijk gebied. Ten opzichte van de offshore zone werd op de Vlakte van de Raan een relatief hoge dichtheid waargenomen, welke wel vergelijkbaar was met de omliggende, meer kustnabije gebieden op het BCP (Figuur 4.17). Twee grondelsoorten *Pomatoschistus spp.* maakten in bijna alle vistrekken ongeveer 50% uit van de visgemeenschap, gevolgd door tong (*Solea solea*) en schol (*Pleuronectes platessa*), en in mindere mate door steenbolk (*Trisopterus luscus*), haring (*Clupea harengus*) en harnasmannetje (*Agonus cataphractus*). Schar (*Limanda limanda*) was enkel in de beginjaren van de 21e eeuw van enig belang en zandspiering (*Ammodytes lanceolatus*) kwam bijna niet voor rond de 'Vlakte van de Raan'. De demersale visfauna was, in vergelijking met andere gebieden op het BCP, gekenmerkt door een iets lagere soortenrijkdom. De soortenrijkdom varieerde tussen 5 en 17 soorten per trek, met meestal hogere waarden in het najaar. In zowel de Nederlandse als de Belgische DFS worden grote en snelzwemmende soorten (zoals bv haaien en roggen, maar ook zeebaars en harders) niet goed gevangen. Het tuig en de vissnelheid zijn vooral gericht op jonge bodemgebonden vis.

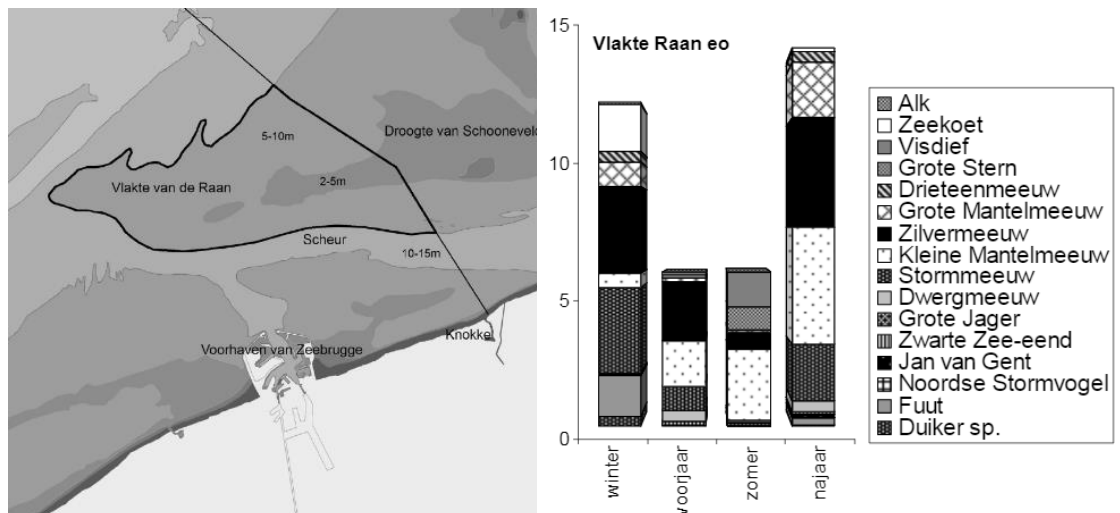


Figuur 4.17 Ruimtelijke verspreiding van de demersale visfauna op het BCP, gebaseerd op een gemiddelde voor 2005. Links dichtheid (5 - 180 ind.1000m²), rechts soortenrijkdom (9 - 24 soorten) (Hostens en Moulaert, 2006). De zwarte bollen liggen op de Vlake van de Raan.

4.4 Vogels

Resultaten van de tellingen vanuit de MWTL monitoring zijn beschikbaar als kaarten en trends worden berekend voor het hele NCP en voor zee-eenden voor deelgebieden waaronder de Voordelta. Uit de verspreidingskaarten blijkt dat de Schelde-monding gebruikt wordt door roodkeelduikers, dwergmeeuwen, kleine mantelmeeuwen, grote sterns en zwarte zee-eenden (Fijn et al., 2019, Lillipally et al., 2018).

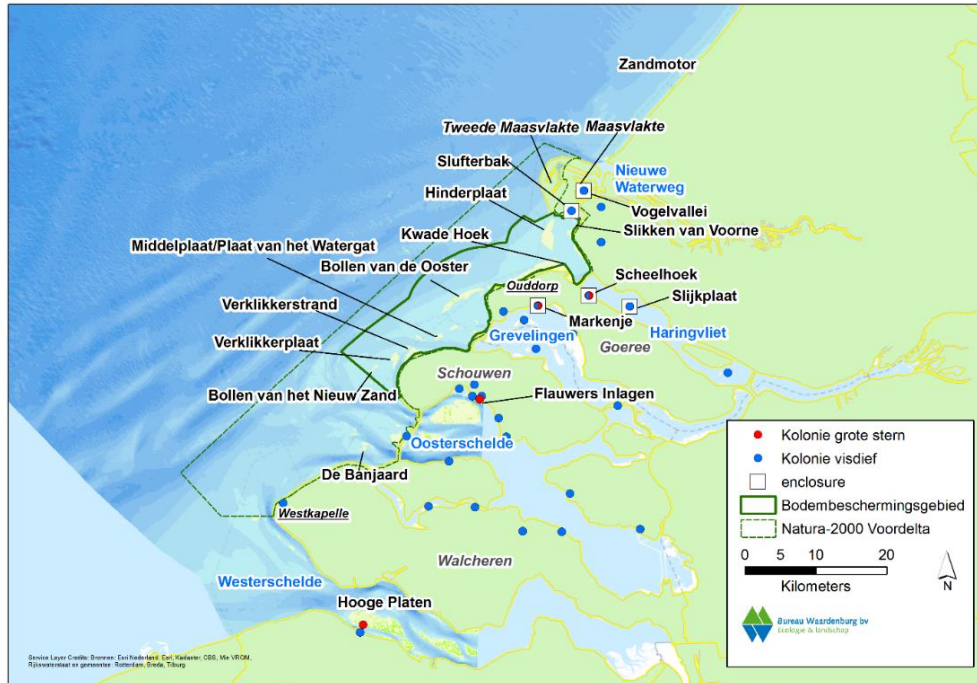
Aan de hand van tellingen tussen 1992 en 2004 op het Belgische deel van de Vlake van de Raan blijkt dat dit gebied wordt gedomineerd door grote meeuwen en dat het een aantrekkelijk gebied is voor duikende zeevogels. Duikende vogels zoals de visdief en de grote stern broeden in nabijgelegen gebieden zoals de voorhaven van Zeebrugge en de Hooge Platen en foerageren bij de Vlake van de Raan op vis. In de winter komen viseters als de roodkeelduiker en de fuut voor. Ook heeft de Vlake van de Raan een functie als migratiecorridor, vooral voor de dwergmeeuw, de kleine mantelmeeuw, de visdief en de grote stern (Courstens et al., 2006).



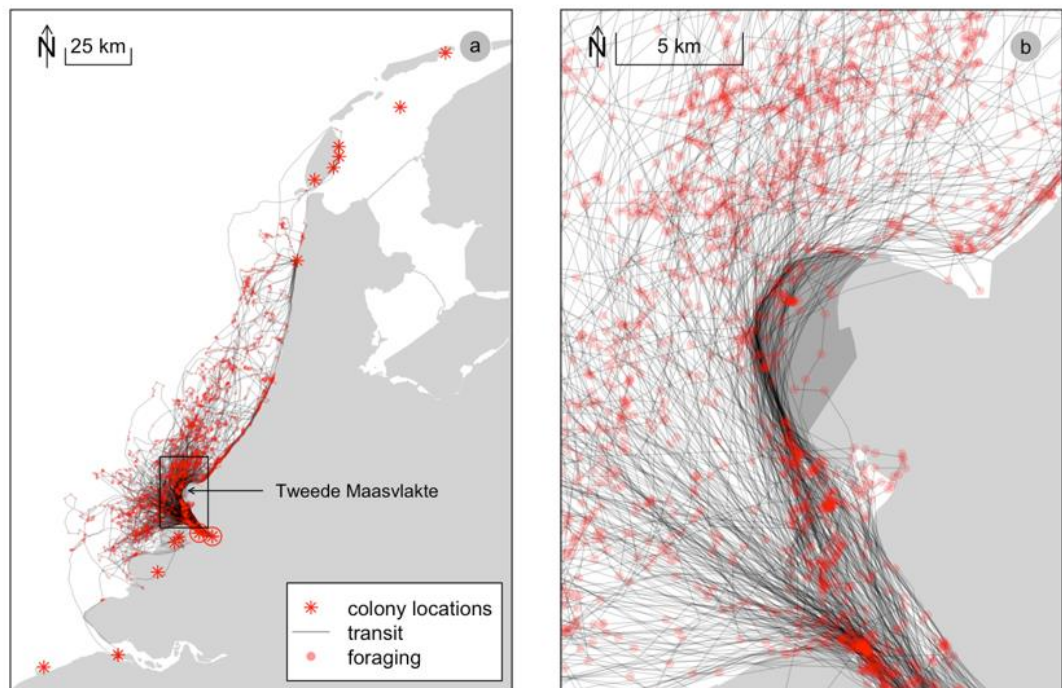
Figuur 4.18 Ligging van het door Courstens et al. (2006) bestudeerde deel van de Vlake van de Raan (links) en het voorkomen van zeevogels van september 1992 tot en met december 2004 (rechts).

4.4.1 Broedkolonies

In het kader van PMR zijn in de periode 2008-2018 in de broedkolonies in de ZW Delta grote sterns gezenderd met GPS loggers (meest gevangen op de Scheelhoek in de Noordelijke delta). De gecombineerde informatie van al deze zenderstudies wordt momenteel uitgewerkt (pers. med. Ruben Fijn). Afgezien van deze kolonie wordt er in de meeste jaren ook gebroed op de Hoge Platen (Figuur 4.19 en Figuur 4.20), een kolonie die veel zuidelijker ligt. Grote sterns die in deze kolonie broeden zouden heel goed van het gebied rond de Vlake van de Raan gebruik kunnen maken om te foerageren.

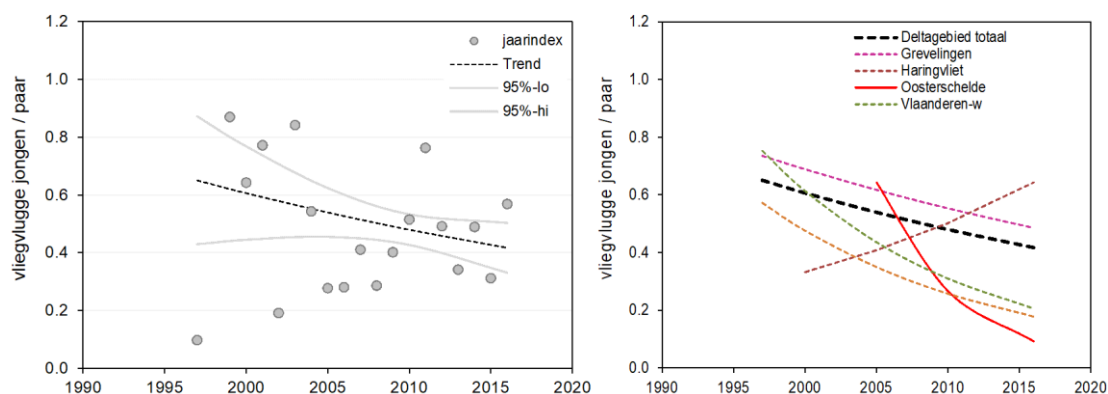


Figuur 4.19 Locatie van kolonies van grote stern en visdief in de delta.

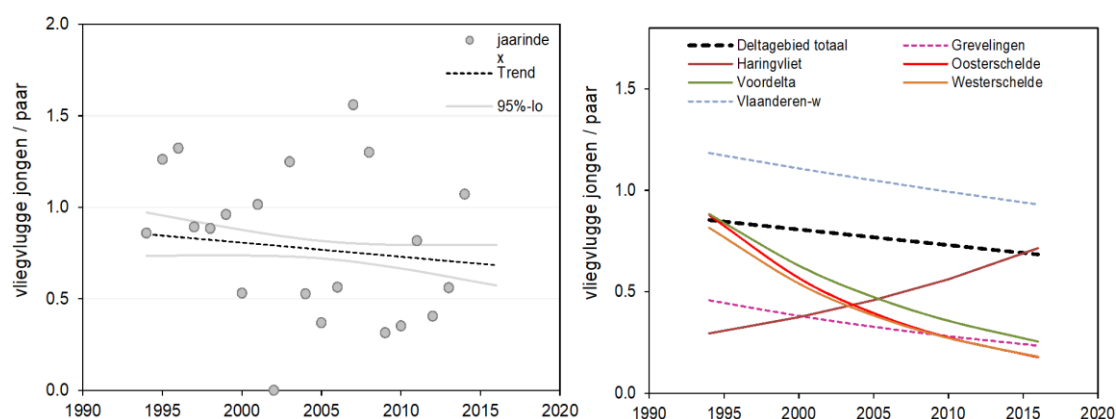


Figuur 4.20 Overzicht van vliegtrajecten (grijze lijnen) en foerageersspots (kleine rode sterretjes) van grote sterns uit de kolonies Scheelhoek en Slijkplaat, in 2012-2015 en 2017 (uit Van Bemmelen et al., 2019).

Recent zijn door SOVON Vogelonderzoek Nederland, Vogeltrekstation, Delta Project Management en het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (Scheekerman et al., 2017) de broedsuccesdata van grote sterns en visdieven in de Delta geanalyseerd voor de verschillende deelgebieden. Hieruit blijkt dat het broedsucces in grote stern kolonies in het Deltagebied sterk varieert tussen jaren en is alleen in de Oosterschelde een significante neergaande langjarige trend te zien (Figuur 4.21). Naar verwachting is een gemiddeld broedsucces van ongeveer 0.5 jong per paar voldoende om een stabiele populatie van deze langjarige soort te kunnen waarborgen (Scheekerman et al., 2017). Voor visdieven varieert het broedsucces in deze kolonies ook sterk tussen jaren en is er een algemeen neergaande langjarige trend te zien.



Figuur 4.21 Ontwikkeling van het reproductiesucces van grote sterns in het Deltagebied. Weergegeven is het jaargemiddelde (stippen) en trend met 95% betrouwbaarheidsinterval (lijnen) voor het hele Deltagebied (links) en per bekken (rechts, doorgetrokken streep is significant, gestippeld is niet significant). Hierbij moet worden opgemerkt dat de trend voor het Haringvliet de meest recente jaren gebaseerd is op enclosure waarnemingen terwijl in de eerste jaren een kolonie-gemiddelde werd bepaald. Overgenomen uit (Scheekerman et al., 2017)



Figuur 4.22 Ontwikkeling van het reproductiesucces van visdieven in het Deltagebied. Links: jaargemiddelden (stippen) en trend met 95% betrouwbaarheidsinterval (lijnen) voor het Deltagebied als geheel. Rechts: trends in deelregio's met voldoende gegevens. Trends die significant afwijken van 0 (= broedsucces stabiel) zijn weergegeven als doorgetrokken lijn, overige met een gebroken lijn. Overgenomen uit Scheekerman et al. (2017).

De haven van Zeebrugge vormt voor veel zeevogels een belangrijke broedkolonie. Deze broedvogels maken voor een belangrijk deel ook gebruik van de Vlakte van de Raan als foerageergebied. Afgezien van tellingen van de kolonies bij Zeebrugge is er ook informatie beschikbaar over broedsucces en kuikencondities voor visdief, kleine mantel- en zilvermeeuw tot 2019 en voor grote stern tot 2007 (daarna broedden ze hier niet meer, mond. med. Wouter Courtens). Voor zilvermeeuw en kleine mantelmeeuw zijn ook veel zenderdata beschikbaar, maar niet specifiek uitgewerkt voor de Vlakte van de Raan.

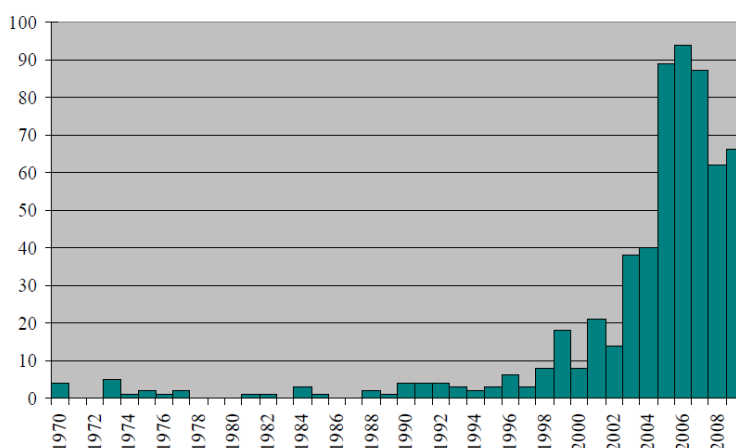
4.5 Zeezoogdieren

Op de Vlakte van de Raan leven bruinvissen, die behoren tot de walvisachtigen. Resultaten van de bruinvistellingen vanuit de MWTL monitoring zijn beschikbaar als kaarten en trends worden berekend voor het hele NCP (Fijn et al., 2019). Daarnaast is de Vlakte van de Raan belangrijk voor de gewone zeehond en de grijze zeehond, die het gebied gebruiken als foerageergebied.

4.5.1 Bruinvissen

De bruinvis is het talrijkste zeezoogdier van het Noordzeegebied. Het specifieke belang van de Westerscheldmonding voor de bruinvis voor de hele populatie is niet bekend. Het voedsel is gevarieerd en bestaat vooral uit vis die nabij de zeebodem voorkomt, zoals wijting, kabeljauw en grondels. Bruinvissen leven meestal solitair of in kleine groepen tot vier dieren. De aanwezigheid van voldoende voedsel en de afwezigheid van verstoring als gevolg van menselijk gebruik (geluid en bijvangst) bepalen de kwaliteit van het leefgebied. Bruinvissen worden maximaal twintig jaar oud. Een bruinvisvrouwje kan maar één jong per twee jaar grootbrengen. De voortplantingscapaciteit is dus laag.

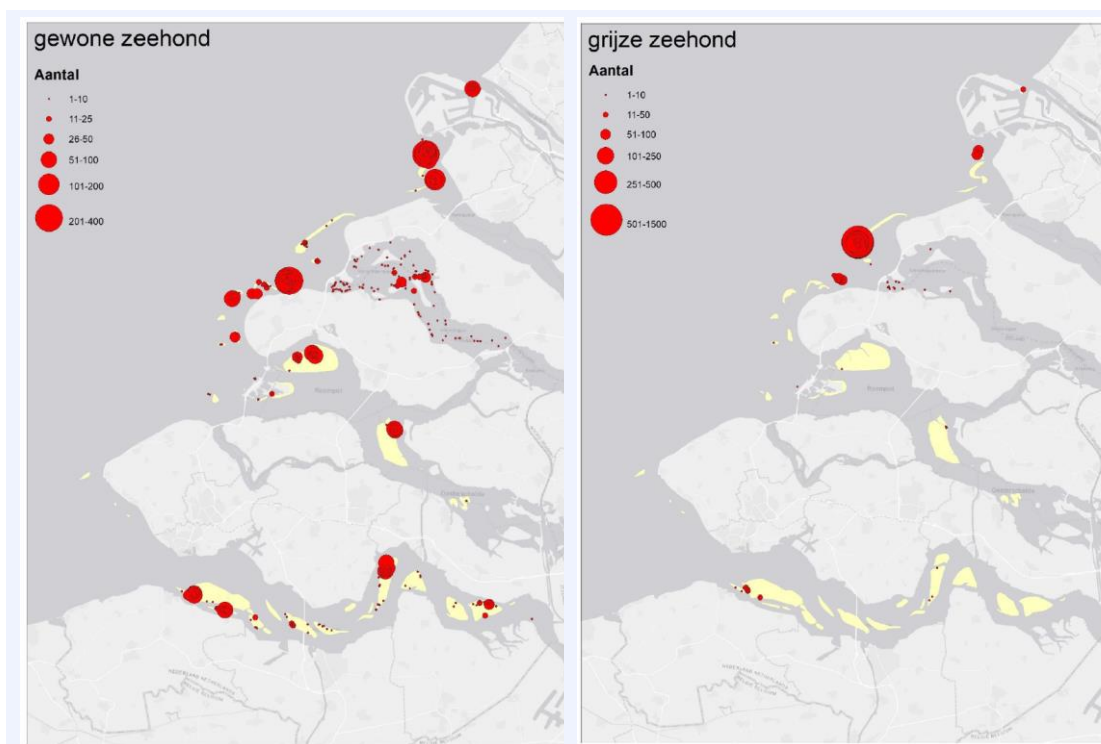
Het voorkomen van bruinvissen in de kustzone vertoont een consistent seizoenspatroon met de hoogste aantallen in de late winter en het vroege voorjaar. Daarna trekken ze weg uit de Nederlandse kustwateren, mogelijk om jongen te baren in de Duitse Bocht (beheerplan 2016). Bruinvissen zijn aangetroffen met tellingen vanaf ESAS-schepen over meerdere jaren. In een strook van ongeveer honderd kilometer langs de Nederlandse kust is in april 2009 een dichtheid van gemiddeld één individu per km² geteld. De soort kwam algemeen voor in de zuidelijke Noordzee tot de jaren 1950; daarna was ze er nagenoeg volledig verdwenen, tot het begin van de jaren 1990. Het aantal gestrande dieren per jaar geeft een goed beeld van de terugkeer van het dier (Figuur 4.23).



Figuur 4.23 Aantal gestrande bruinvissen in België (uit (Degraer et al., 2010))

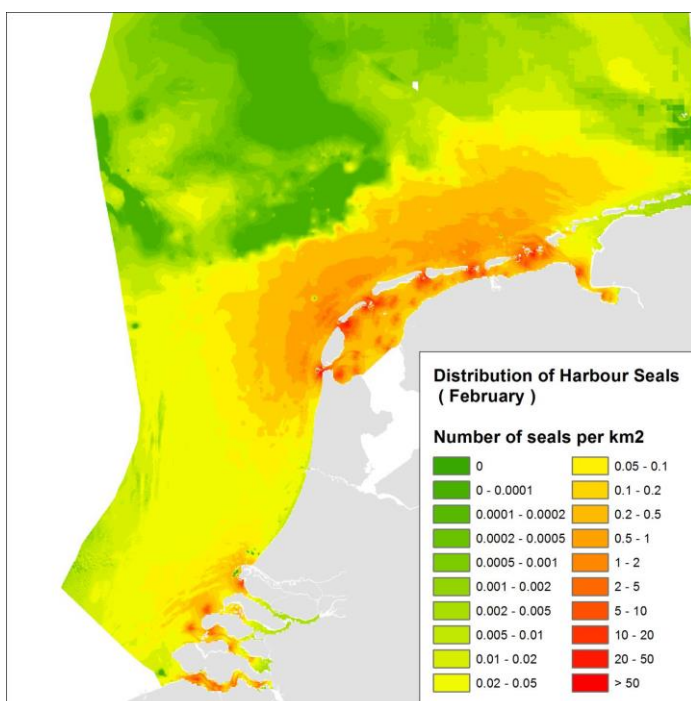
4.5.2 Grijze zeehond en gewone zeehond

In het gebied komen twee soorten voor: de gewone zeehond (*Phoca vitulina*) en de grijze zeehond (*Halichoerus grypus*). De populatie van de beide soorten zeehonden lijkt in de Nederlandse kustwateren langzaam maar zeker toe te nemen. Beide soorten komen in het Deltagebied in alle zoute watersystemen voor. Voor de grijze zeehond is de kustzone van de Noordzee, inclusief Voordelta en monding van de Schelde, het belangrijkste foerageergebied. Dit in tegenstelling tot de gewone zeehond die ook een deel van de tijd in de Waddenzee foerageert (Aarts et al., 2019). Beide soorten zeehonden eten vissen die nabij de bodem leven, zoals wijting, zandspiering, bot, tong en andere platvissen. Beide soorten zeehonden verblijven en foerageren regelmatig in de monding van de Schelde. De zeehonden bewegen zich tussen de Westerschelde via de Vlakte van de Raan en de Voordelta tot verder de Noordzee op en ook tot in de Waddenzee en weer terug. De Vlakte van de Raan is daardoor een klein onderdeel van een veel groter leefgebied.



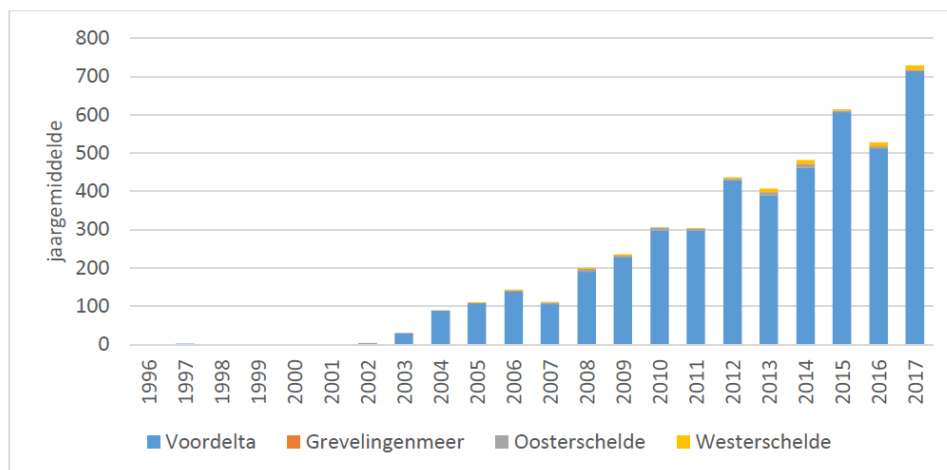
Figuur 4.24 Ligplaatsen van gewone zeehond en grijze zeehond in de ZW Delta, gebaseerd op alle tellingen in seizoen 2017/2018. Gebaseerd op Arts et al., 2019.

In de winterperiode trekt de gewone zeehond ook meer naar de kustzone van de Noordzee. Aan de hand van de zenderdata zijn maandelijkse kaartjes geconstrueerd (Figuur 4.25). Er is nooit een specifieke studie uitgevoerd naar het gebruik van de Vlake van de Raan voor zeehonden.

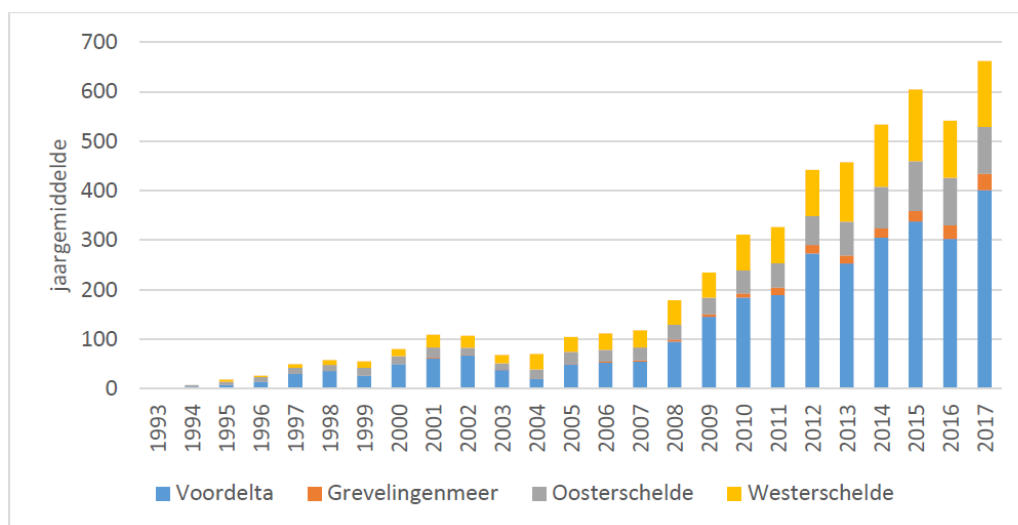


Figuur 4.25 Voorspelde ruimtelijke verdeling (februari) van reizen van gewone zeehonden vanaf ligplaatsen in Nederland (Aarts et al., 2016) <https://edepot.wur.nl/400306>.

Belangrijk voor het voorkomen van zeehonden zijn droogvallende zandplaten waar de zeehonden rusten tijdens laagwater. Deze ontbreken veelal in de Schelde-monding. In het Deltagebied zijn dat de zandplaten in de Voordelta, Oosterschelde en Westerschelde (Arts et al., 2018, 2019). In het Grevelingenmeer rusten de zeehonden op basaltblokdammen die dienen als oeververdediging. In het Belgische deel zijn geen geschikte rustplaatsen waar dieren ongestoord aan land kunnen gaan (Degraer et al., 2010). Grijze zeehonden gebruiken de Hoge platen om hun jongen te werpen. Gewone zeehonden hebben een actieradius vanuit de delta tot 100 km de Noordzee op, grijze zeehonden gaan nog verder. Aan noordkant van de delta zijn weinig ligplaatsen, de Hoge platen worden wel als ligplaats gebruikt. Beide soorten zijn sterk in aantal toegenomen sinds begin deze eeuw (Figuur 4.26 en Figuur 4.27).



Figuur 4.26 Verloop van jaargemiddelde van de grijze zeehond in het deltaggebied (uit Arts et al., 2019)



Figuur 4.27 Verloop van jaargemiddelde van de gewone zeehond in het deltaggebied (uit Arts et al. 2019)

5 Monitoringsdata

5.1 Inleiding

Als voorbereiding op de pilotsuppletie in de Schelde-monding is in 2019 een inventarisatie gemaakt van de inrichting en gebruikersfuncties van de Schelde-monding en de beschikbare monitoringsdata (Van Weerdenburg & Holzhauser, 2019). De verzamelde ruimtelijke informatie is gebundeld in een GIS omgeving. De beschrijving van de inrichting en gebruikersfuncties (incl. bagger- en stortgegevens) zal hier niet worden herhaald; daarvoor wordt verwezen naar het genoemde rapport. Wel wordt de beschikbare monitoringsdata hier beschreven, zodat de monitoring van de pilotsuppletie hierop afgestemd kan worden. Het betreft een data-overzicht. De systeemkennis afgeleid uit deze monitoringsdata staat beschreven in de voorafgaande hoofdstukken.

5.2 Waterbeweging en sedimentconcentraties

Metingen van de waterstand en van golven in de Schelde-monding worden uitgevoerd door Rijkswaterstaat (op Nederlands grondgebied, zie <https://waterinfo.rws.nl/>) en de Vlaamse overheid (op Belgisch grondgebied, zie <https://meetnetvlaamsebanken.be/>). Daarvoor zijn permanente meetstations en golfboeien operationeel (zie Figuur 5.1). Bij de Belgische meetstations Scheur Wielingen en Bol van Heist wordt naast de waterstand ook de stroomsnelheid halverwege de waterkolom gemeten.

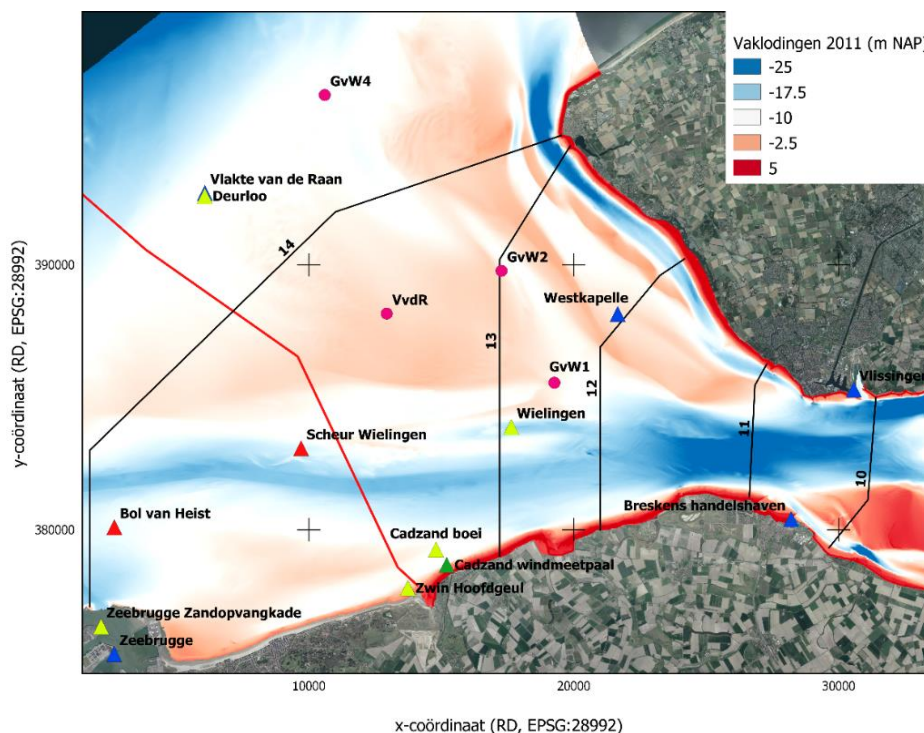
In opdracht van Rijkswaterstaat worden op verschillende raaien periodiek gedurende 13 uur tijdens springtij de stroomsnelheid en -richting gemeten met ADCP-instrumenten (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Op basis van deze gegevens wordt het debiet in de raai berekend. De locaties van deze zgn. debietraaien in de monding zijn aangegeven in Figuur 5.1. Raai 14, Raai 12 en Raai 10 worden eens per 6 jaar gemeten. Raai 11 wordt eens per 3 jaar gemeten. Tabel 5.1 toont wanneer de debietraaien worden gemeten in de periode 2020-2026.

Tabel 5.1 Overzicht wanneer de debietraaien in de Schelde-monding worden gemeten in de periode 2020-2026. De locaties van de debietraaien zijn aangegeven in Figuur 5.1.

Raai	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
10					X		
11		X			X		
12				X			
14	X						X

In het kader van de Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands (MWTL) worden metingen gedaan van de korrelgrootteverdeling van sediment. De metingen worden vanuit ecologische overwegingen geïnitieerd; de meetlocaties worden daarom toegelicht in paragraaf 6.3. Sinds 1998 worden er jaarlijks boxcore monsters genomen tijdens bodemdiermonitoring, op basis waarvan de korrelgrootteverdeling van sediment in de bodem wordt bepaald. Daarnaast wordt sinds 1998 tijdens periodieke vaartochten de korrelgrootteverdeling van sediment in de bodem en in zwevende stof bepaald. De data van deze metingen is beschikbaar via het Informatiehuis Marien (<https://www.informatiehuismarien.nl/>).

In 2020 en 2021 worden sedimenttransportmetingen uitgevoerd op een raai tussen Vlissingen en Breskens. De metingen staan eens per kwartaal gepland. Het gaat dus om 8 meetcampagnes in 2 jaar, waarvan de eerste is uitgevoerd op 16 en 17 maart 2020. De meetcampagnes bevatten ADCP backscatter metingen en multibeam metingen. Er worden monsters genomen voor de ijking van meetinstrumenten. De gemeten ADCP backscatter wordt gebruikt om het sedimenttransport door de raai te bepalen. De verschillende meetcampagnes zouden inzicht kunnen geven in de seizoensafhankelijkheid van de transporten door de raai. Daarnaast wordt er uitvoeringstechnisch veel ervaring opgedaan met het doen van deze metingen, zodat dergelijke meetcampagnes later wellicht structureel uitgevoerd kunnen worden.



Figuur 5.1 Overzichtskartaal van beschikbare monitoringsdata in de Schelde-monding. Vaste meetpunten zijn als driehoeken weergegeven, waarbij de kleur aangeeft wat er gemeten wordt (blauw: waterstand; geel: golven; groen: waterstand en golven; rood: waterstand, golven en stroming). Debietraaien zijn aangegeven als zwarte lijnen. Debietraai 13 wordt tegenwoordig niet meer ingemeten. Meetpunten tijdens een meetcampagne in 2014 (Plancke et al., 2014) zijn opgenomen als roze cirkels. De landsgrens is aangegeven met een rode lijn.

In Figuur 5.1 zijn ook de meetpunten opgenomen waar metingen werden uitgevoerd tijdens een meetcampagne van 8 augustus tot 4 september 2014 door het Waterbouwkundig Laboratorium (Plancke et al., 2014). Dit was een eenmalige meetcampagne op de Vlakke van de Raan en in de Geul van de Walvischstaart. Op elk van de vier locaties is het stromingsprofiel gemeten met ADCP instrumenten. Daarnaast zijn sedimentconcentraties gemeten met OBS instrumenten (*Optic Backscatter*) op de locaties GvW1, GvW2 en VvdR. Op locatie GvW4 werd de stroomsnelheid op hoge resolutie gemeten met een ADV instrument (*Acoustic Doppler Velocymeter*) en werd een LISST instrument (*Laser In-Situ Scattering and Transmissometer*) ingezet voor het meten van de troebelheid. Tijdens deze meetcampagne zijn 13-uursmetingen uitgevoerd op locaties GvW1, GvW2 en VvdR, waarbij sedimenttransport en stroomsnelheid werden gemeten vanaf een voor anker liggend schip. De uitgevoerde metingen worden beschreven door Plancke et al. (2014).

Rondom Zeebrugge zijn op een aantal locaties sedimentconcentraties gemeten in het kader van studies naar de bereikbaarheid van de haven van Zeebrugge. De meetpunten van deze zgn. MOMO meetcampagne liggen buiten het interessegebied. De meetcampagne wordt beschreven door De Maerschalck et al. (2012).

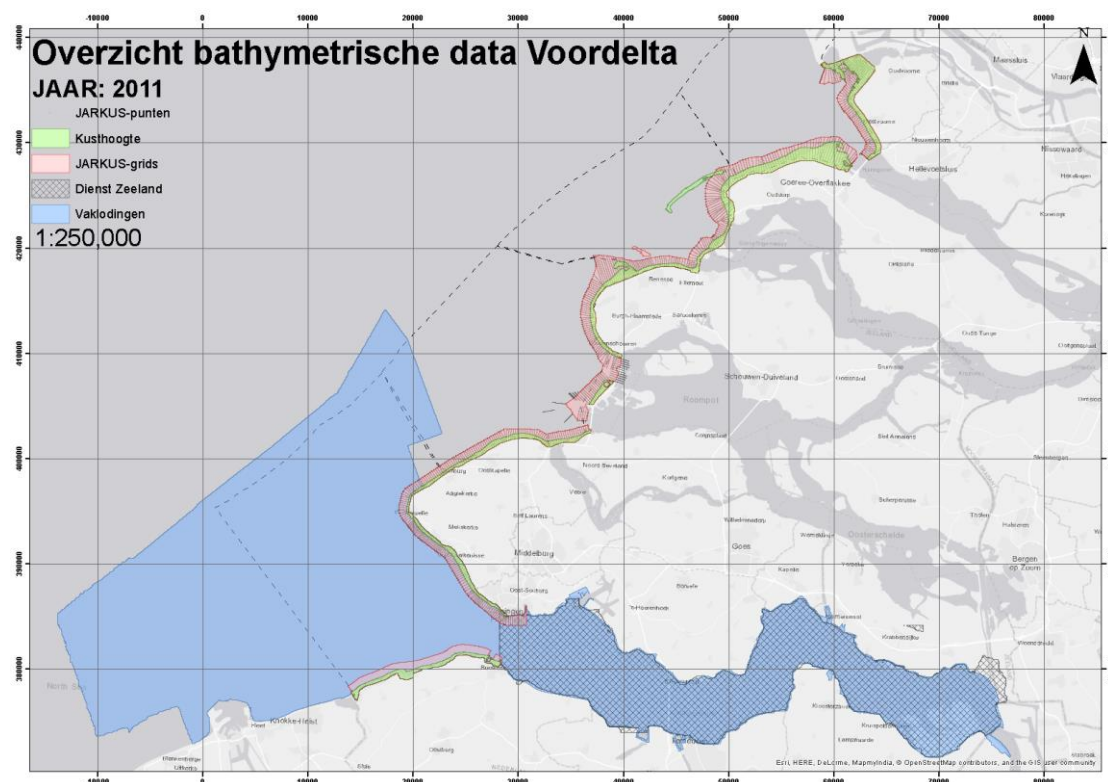
5.3 Bodemligging en sedimentbalans

In de zgn. Vaklodingen dataset is vlakdekkende data van de bodemligging in de Schelde-monding beschikbaar. De eerste opname van de bathymetrie in de Schelde-monding in de Vaklodingen data dateert uit 1964. De Vaklodingen data is beschikbaar via de Servicedesk Data van Rijkswaterstaat. Elias & Van der Spek (2015) besteden aandacht aan de nauwkeurigheid van Vaklodingen data in de Schelde-monding. In 2011 is de bodemligging in de Schelde-monding tot ver over de landsgrens bepaald, zoals weergegeven in Figuur 5.2. Het gebied rondom het Oostgat, tegen de kust van Walcheren, is meer recent ook opgenomen in de Vaklodingen data, namelijk in 2012, 2013 en 2015.

De JARKUS metingen bevatten hoogtedata langs kustprofielen. De profielmetingen worden jaarlijks opgenomen met een tussenafstand van 200 tot 250 m en hebben een lengte van 800 tot 1200 m vanaf de Rijks Strand Palen (RSP-lijn). De gebieden waarvoor JARKUS data beschikbaar is zijn weergegeven in Figuur 5.2. De JARKUS data wordt beheerd door Rijkswaterstaat (Servicedesk Data). Een overzicht van de raaien en de beschikbare data is ook opgenomen in de Deltares Kustviewer, toegankelijk via <https://publicwiki.deltares.nl/display/KV/>.

In het kader van de geulwandsuppleties in het Oostgat in 2005 en 2009 zijn bodemopnames gemaakt met multibeam instrumenten. Op basis van deze metingen werden de geulwandsuppleties gemonitord, zoals beschreven door Dekker (2012). Deze studie is ook toegelicht in Hoofdstuk 3 van dit rapport.

Ten behoeve van de scheepvaart en voor zandwinning worden baggerwerkzaamheden uitgevoerd in de vaargeul Scheur/Wielingen. De beschikbare data hierover wordt beheerd door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) van de Vlaamse Overheid. Een analyse van deze data in de periode 1985-2014 wordt beschreven door Vroom & Schrijvershof (2015).



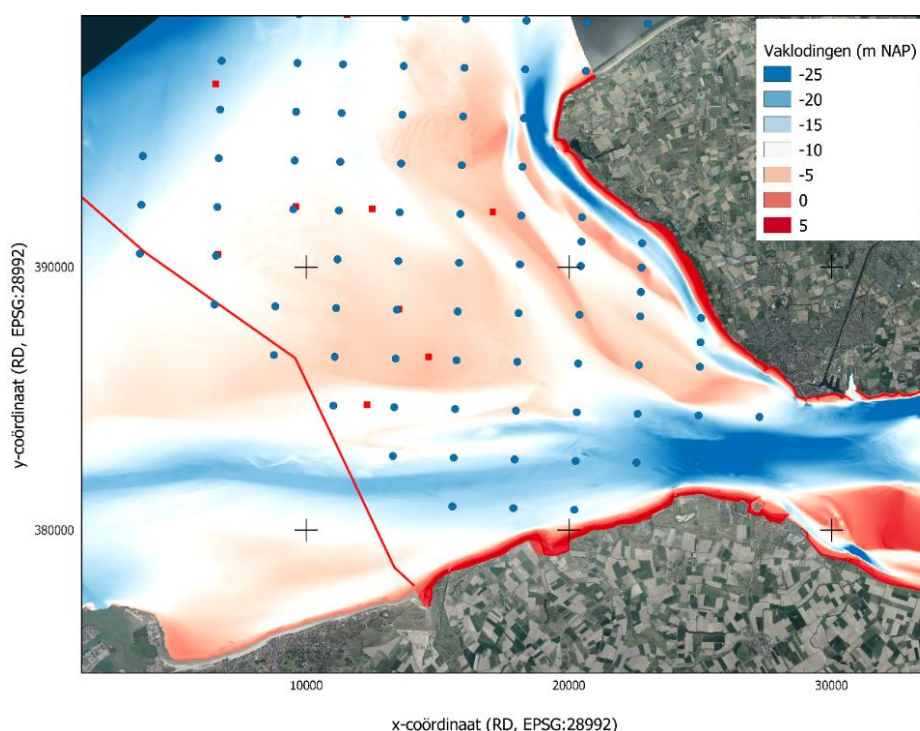
Figuur 5.2 Kaart van een aantal bronnen van bathymetrische data in de Schelde-monding. Het blauwe vlak toont de beschikbare vaklodingen data die in 2011 is ingewonnen. Meer recent is de bodemhoogte in delen van dit gebied opnieuw bepaald. In rood is het gebied aangegeven waarvoor JARKUS data wordt ingewonnen.

5.4 Ecologische monitoring

5.4.1 Bodemdieren

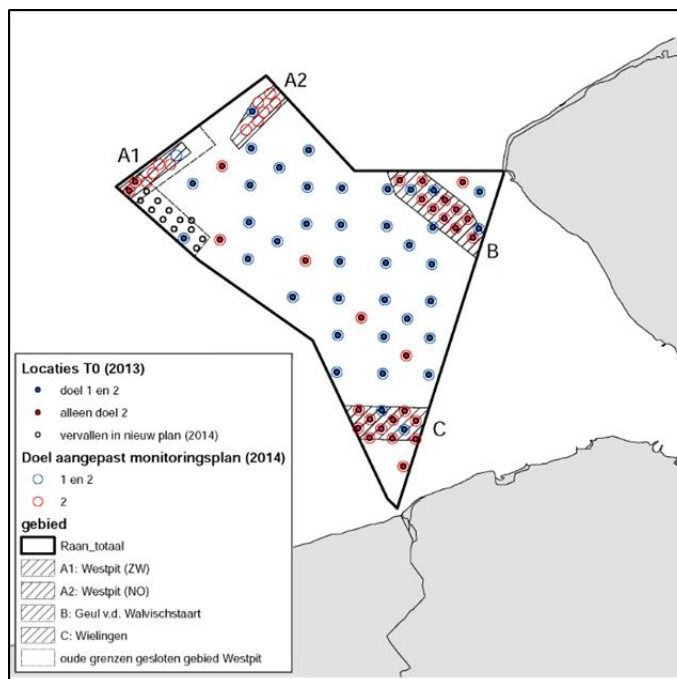
In het kader van de Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands (MWTL) worden jaarlijks boxcore monsters genomen op vaste punten op het Nederlands Continentaal Plat. Sinds 2013 zijn er ook meetpunten op de Vlake van de Raan opgenomen in het MWTL meetnet. De locaties van deze meetpunten is te zien in Figuur 5.3. De bemonstering dient voor de beschrijving van ontwikkelingen in benthos gemeenschappen, inclusief de bodemsamenstelling. De monsters worden genomen met een Reineck Boxcorer (0.078 m², minimale diepte van 15 cm). Gegevens van de MWTL metingen zijn digitaal beschikbaar via het Informatiehuis Marien (<https://www.informatiehuismarien.nl/>).

Figuur 5.3 toont ook de meetpunten die onderdeel uitmaken van het WOT-schelpdiersurvey programma. De bemonstering loopt sinds 1993 en wordt overwegend met een bodemschaaf uitgevoerd. Het doel van dit programma is het in kaart brengen van de bestanden aan commercieel interessante schelpdieren en de ontwikkelingen daarvan. Gegevens en data van de WOT-bemonstering zijn digitaal beschikbaar via het Informatiehuis Marien (<https://www.informatiehuismarien.nl/>).

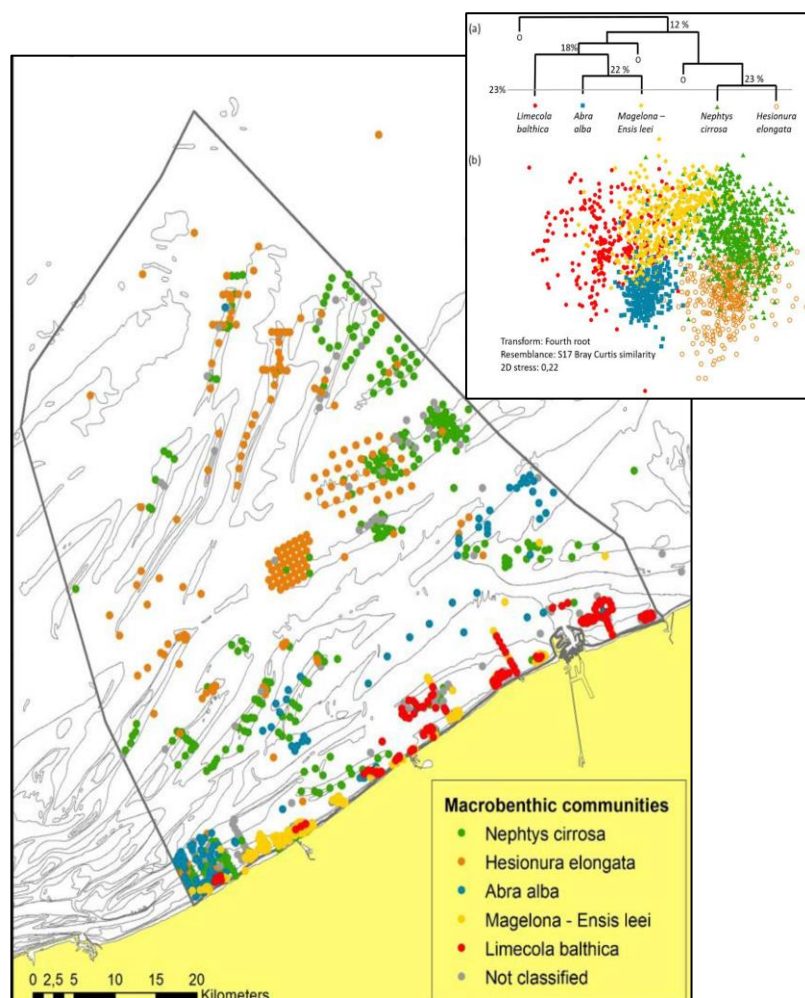


Figuur 5.3 Ecologische monitoringslocaties in de Schelde-monding. MWTL meetpunten zijn weergegeven als rode vierkanten. WOT meetpunten zijn weergegeven als blauwe stippen. De landsgrens is aangegeven met een rode lijn.

In het kader van VIBEG (Visserij In Beschermde Gebieden) wordt bemonstering uitgevoerd in voor visserij gesloten en open gebieden. Deze monitoring is onderdeel van een onderzoeksprogramma waarbij de maatregelen uit het VIBEG-akkoord worden geëvalueerd. Op basis van dit akkoord wordt visserij in de Natura 2000-gebieden binnen de 12-mijls zone gereguleerd. Het VIBEG onderzoeksprogramma maakt gebruik van de meetstations die vallen onder de reguliere WOT-bemonstering en loopt tot eind 2020. De T0 meting vond plaats in 2013. Na de T0 in 2013 zijn de VIBEG-punten voor de T1 in 2017/2018 opgenomen in de WOT als extra locaties ten behoeve van de KRM. De voor visserij gesloten gebieden zijn aangegeven in Figuur 5.4. In het Belgische deel van de Noordzee worden ook boxcore monsters genomen (zie Figuur 5.5).



Figuur 5.4 De polygonen geven de locaties van gesloten gebieden voor visserij (VIBEG) aan.

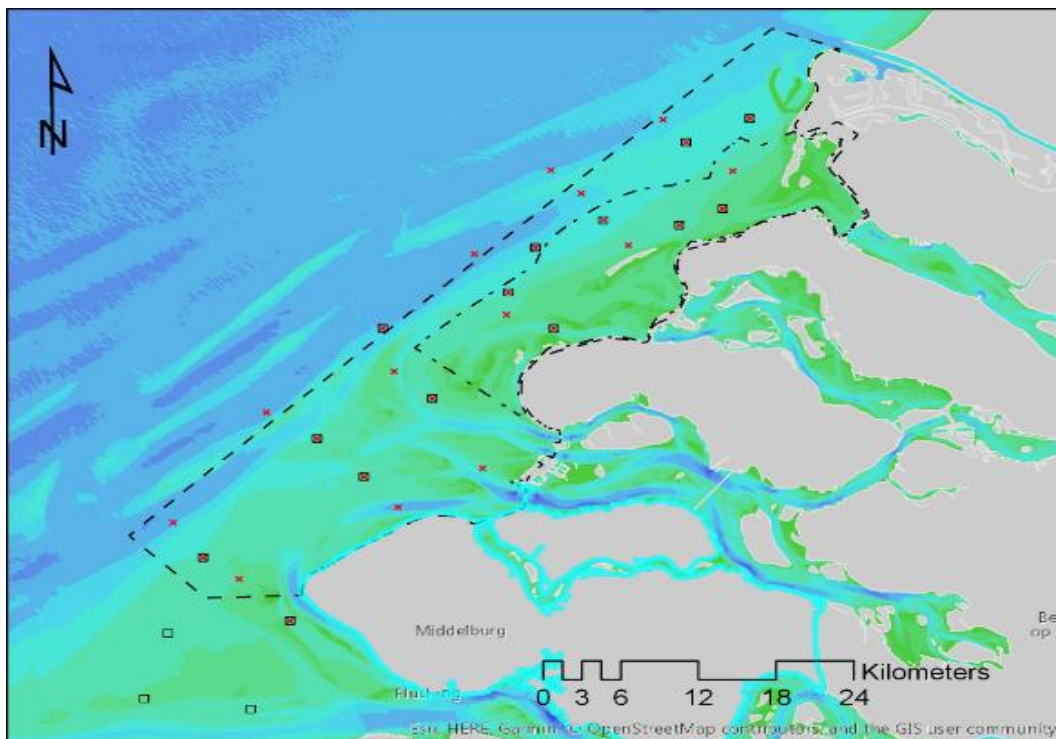


Figuur 5.5 Weergave monsterlocaties van bodemdieren inclusief de gedefinieerd bodemdiergemeenschappen op het Belgisch continentaal plat.

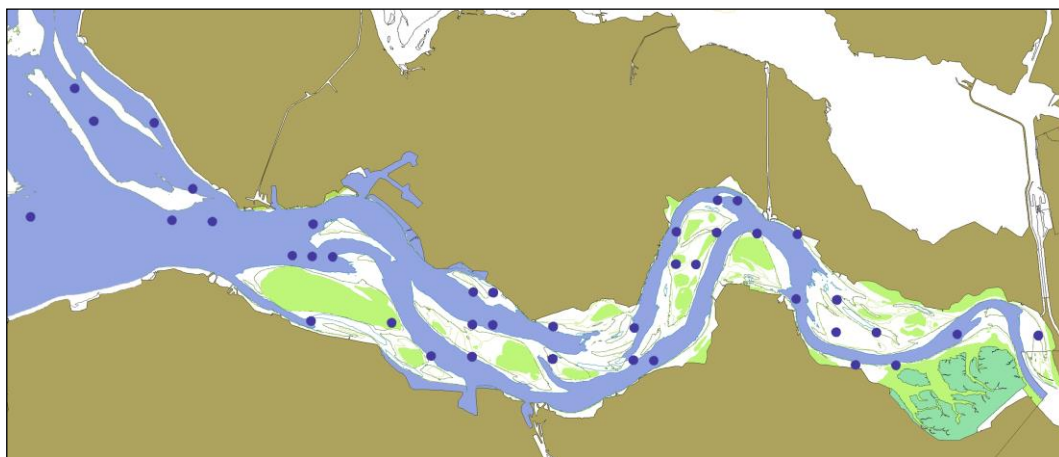
5.4.2

Vis

In de Nederlandse Demersal Fish Survey (DFS) wordt sinds 1970 bodemvis bemonsterd op een aantal stations in de Voordelta, waarbij er drie trekken op de Vlakte van de Raan liggen (Figuur 5.6). Er wordt gemonsterd met een 6 m garnalenkor met 20mm maaswijdte. In het kader van PMR-NCV zijn er nog een aantal stations toegevoegd die in de periode 2013-2017 bemonsterd zijn. Ook in de Westerschelde vindt een de Demersal Fish Survey plaats (Figuur 5.7).

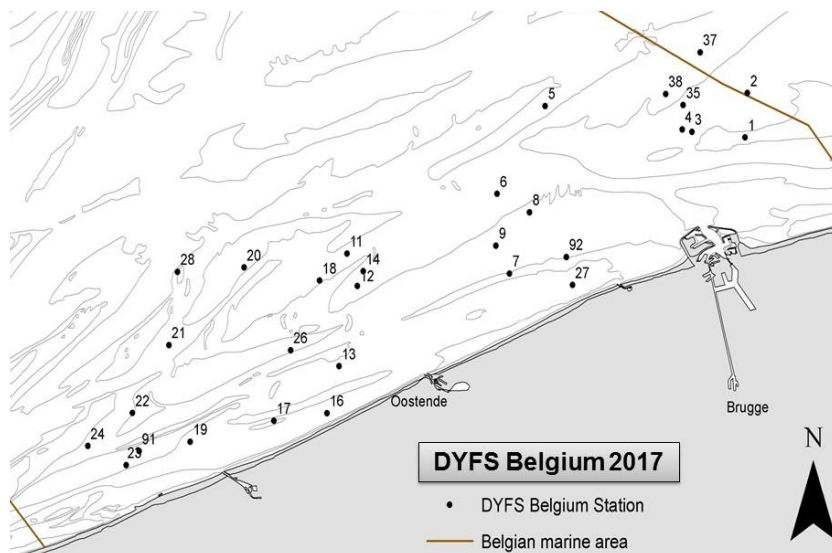


Figuur 5.6 De DFS (□, 1970-nu) en PMR stations (x, 2013-2017) binnen de tweede fase van de vismonitoring binnen PMR-NCV (Bolle, 2016).



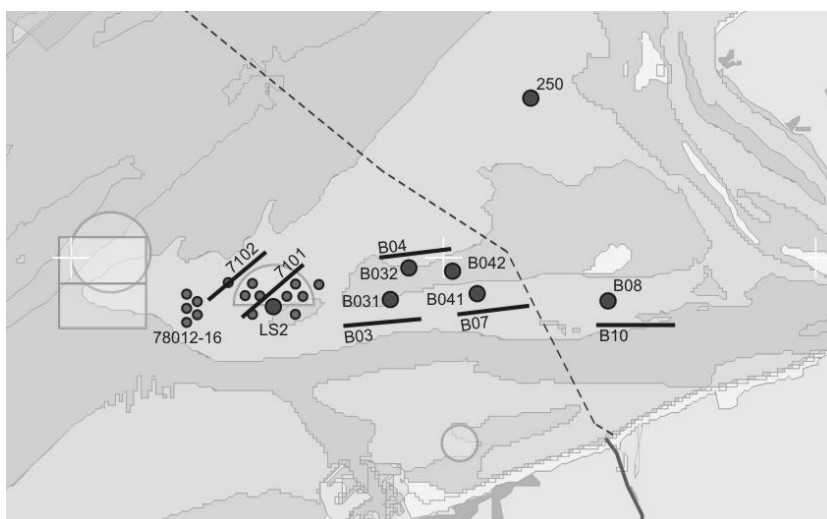
Figuur 5.7 De DFS punten die in Westerschelde sinds 1970 bemonsterd worden.

Het ILVO (Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek) bemonstert dezelfde soorten vis als Nederland langs de Belgische kust (Figuur 5.8), maar beslaat daarbij niet de Westerscheldemonding of de Vlakte van de Raan. In deze Belgische DFS survey wordt gevisst met een 8 m garnalenkor en 22 mm maaswijdte.



Figuur 5.8 Bemonsteringsschema van de Belgische kustsurvey (ICES, 2018).

Naast de uitgebreide bemonstering verspreid over het volledige BCP, worden sinds enkele decennia verscheidene locaties op en naast de 'Vlakte van de Raan' twee maal per jaar bemonsterd in het kader van de stortactiviteiten die er plaatsvinden (Figuur 5.9).

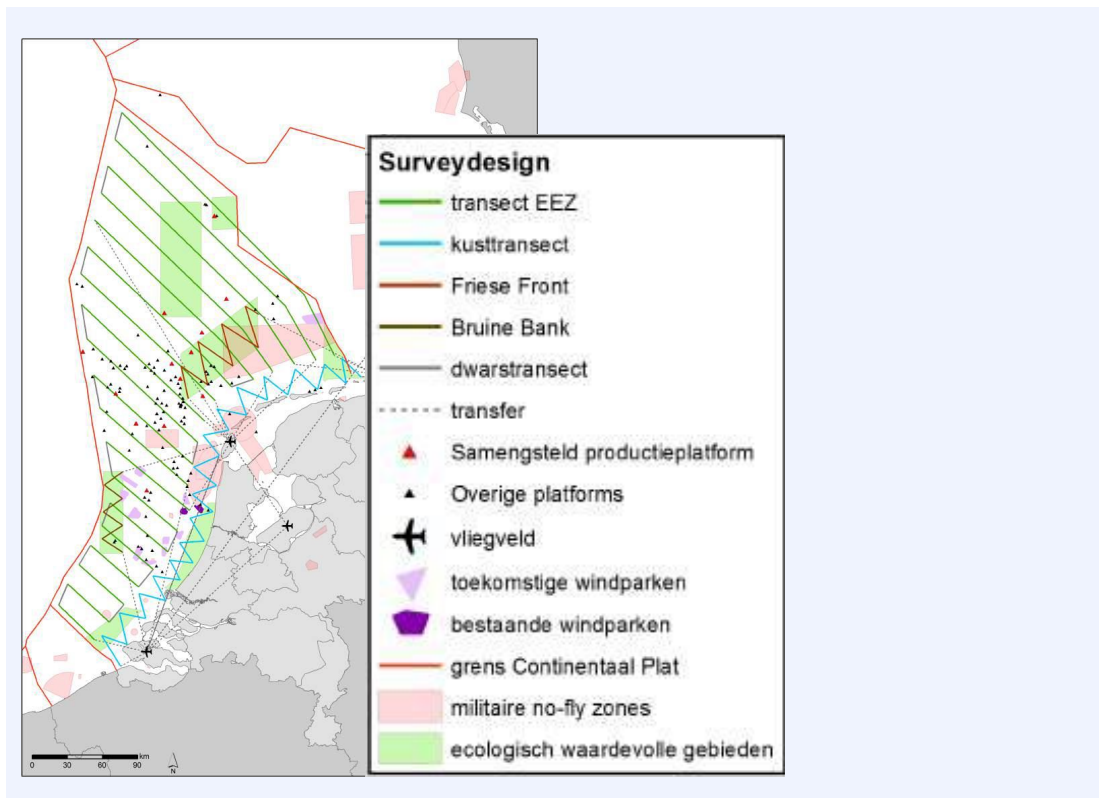


Figuur 5.9 Overzicht van de bemonsteringen op en in de nabijheid van de 'Vlakte van de Raan', bemonsterd door ILVO-Visserij gedurende de laatste decennia (Coosen et al., 2006).

5.5 Zeevogels en zeezoogdieren

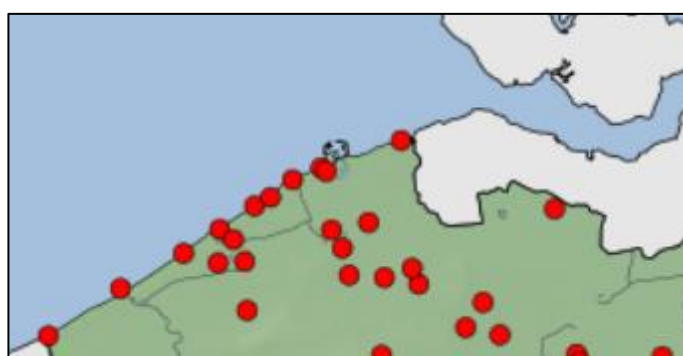
5.5.1 Vliegtuig-, boot- en landtellingen

Rijkswaterstaat verzamelt in het kader van de centrale Informatievoorziening (Ministerie van Infrastructuur en Milieu) sinds 1984 routinematig gegevens over de aantallen en verspreiding van zeevogels en zeezoogdieren op de Nederlandse Noordzee. Deze gegevensverzameling vindt plaats vanuit een vliegtuig en wordt per jaar ca 6 keer uitgevoerd (Figuur 5.10). Deze tellingen resulteren in relatieve dichtheden. Sinds 1989 is dit onderzoek onderdeel van de biologische monitoring van het toenmalige RIKZ dat uitgevoerd wordt in het kader van de Monitoring van de Waterstaatkundige Toestand des Lands (MWTL). Door een aanpassing in het monitoringontwerp zijn sinds 2014/2015 naast trendanalyses ook populatieschattingen van het hele NCP (Nederlands Continentaal Plat) mogelijk. Jaarlijks wordt over dit programma gerapporteerd (Fijn et al., 2015; Fijn et al., 2017), waarbij per soort verspreidingskaarten worden gepubliceerd.



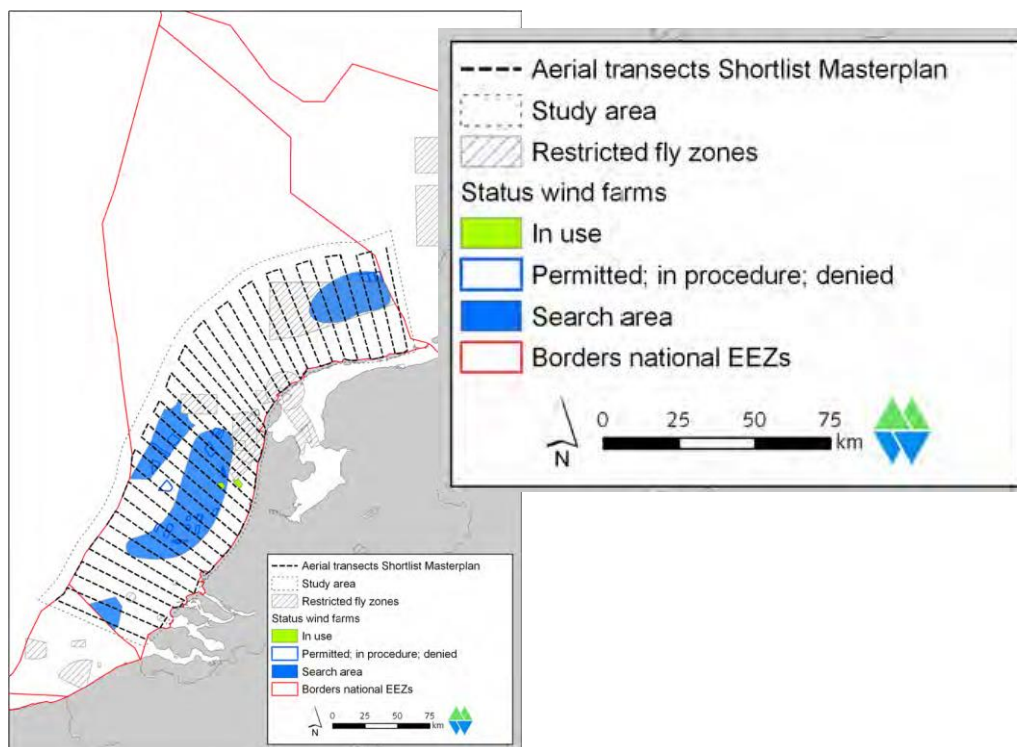
Figuur 5.10 Ligging van de monitoringsroutes op het Nederlands Continentaal Plat (groen), Bruine Bank (bruin), Friese Front (lichtbruin) en in de kustzone (blauw).

Zeevogels worden in België al vanaf de jaren zestig geteld vanaf enkele markante punten langs de Belgische kust (Figuur 5.11). Vanaf de jaren zeventig werden ook de eerste tellingen op zee georganiseerd (Joiris, 1972). Sinds het begin van de jaren negentig worden gestandaardiseerde tellingen uitgevoerd door het Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (INBO). Doordat het Vlaams Instituut voor de Zee (VLIZ) vanaf 2001 het onderzoeksschip 'Zeeleeuw' ter beschikking stelde aan mariene onderzoekers, nam het onderzoek naar zeevogels vanaf dan een hoge vlucht. De tellingen werden geïntensiveerd en er werden vaste monitoringroutes uitgestippeld, die maandelijks bevaren worden door onderzoekers van het INBO.



Figuur 5.11 Locaties zeevogel tellingen België vanaf het land.

In 2011 zijn in het kader van het Shortlist Masterplan Wind (SMPW) maandelijks boot- en vliegtuigtellingen uitgevoerd (Figuur 5.12). Beide surveys komen in de buurt van de Westerscheldemonding/Vlakte van de Raan. Tijdens deze surveys zijn alle zeevogels en zeezoogdieren geregistreerd.



Figuur 5.12 Surveyprogramma voor de vliegtuigtellingen tijdens de SMWP survey (Poot et al., 2011).

Zeehondentellingen worden maandelijks uitgevoerd. Delta project Management brengt jaarlijks rapporten uit met de resultaten van maandelijkse tellingen (vliegtuigtellingen, ev. aangevuld met tellingen van boten en vanaf de kant) in de hele delta (bijv. Arts et al., 2018). Uit Arts et al., 2019: In de periode 1987/1988 – 2003/2004 werden de vliegtuigtellingen uitgevoerd in het kader van diverse projecten. Vanaf seizoen 2004/2005 zijn de vliegtuigtellingen opgenomen in het monitoringprogramma (MWTL) van Rijkswaterstaat, met ingang van seizoen 2013/2014 is dat in samenwerking met de provincie Zeeland. Tot aan het seizoen 1994/1995 waren de tellingen nog onregelmatig, daarna werd er vrijwel maandelijks geteld. Vanaf 2014/2015 worden geen vliegtuigtellingen meer uitgevoerd in september en oktober. In november wordt alleen de Voordelta geteld vanuit het vliegtuig. In verband met de geboorte periode van grijze zeehonden worden in zowel januari als februari twee vluchten uitgevoerd. Voor het bepalen van het aantal jongen van gewone zeehond worden zowel in juni als in juli twee vluchten uitgevoerd.

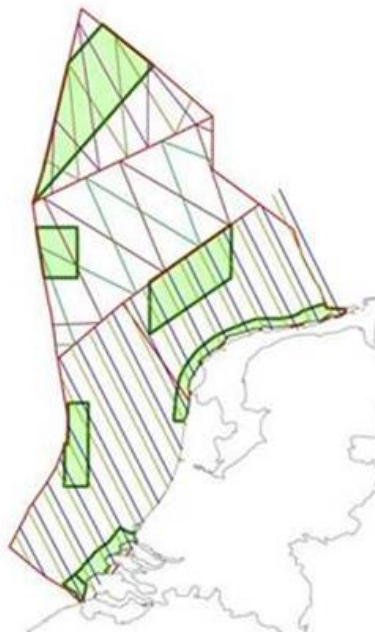
Vanaf de kust worden bruinvis-tellingen gedaan vanaf de trektelposten Westkapelle (zie <https://www.trektellen.nl/site/info/3>) en Breskens (zie <https://www.trektellen.nl/site/info/1>). Aan de hand hiervan kan wellicht een lokaal seizoenspatroon geschetst worden. Maar gezien de focus op resp zeevogels in het najaar en landtrek in het voorjaar van de waarnemers op deze posten zijn de zijn aantallen geregistreerde bruinvissen waarschijnlijk relatief laag.

In windpark Borssele wordt de akoestische activiteit van bruinvissen m.b.v. 16 CPOD's (okt 2019-jun/jul 2020, Figuur 5.10) gemeten. Dit programma levert informatie over seizoenspatroon op. Waarnemingen van bruinvissen worden ook vastgelegd op de tochten naar en van windpark Borssele (wanneer CPOD's vervangen moeten worden).



Figuur 5.13 Locatie bij windpark Borsselle waarvandaan metingen van de aanwezigheid en activiteit van bruinvissen wordt geregistreerd.

Onder de paraplu van Beleidsondersteunend Onderzoek (gefinancierd door ministerie van LNV) worden sinds 2014 elke zomer tellingen van bruinvissen uitgevoerd op het NCP (Geelhoed, 2019). Een van de transecten loopt van de westpunt Zeeuws-Vlaanderen naar het noordwesten, maar bestrijkt niet echt de monding van de Schelde (Figuur 5.14).



Figuur 5.14 Transecten van vliegtuigtellingen voor bruinvissen die sinds 2014 elke zomer worden uitgevoerd op het NCP (Geelhoed 2019).

Sinds eind jaren tachtig van de vorige eeuw vinden onregelmatige tellingen in delen van de Noordzee volgens de ESAS-methode plaats (cf. Camphuysen en Leopold, 2014). Deze tellingen resulteren in relatieve dichtheden van bruinvissen.

5.5.2 Kolonietellingen

In het kader van NEM (Netwerk Ecologische Monitoring) worden de aantallen en verspreiding van kustbroedvogels jaarlijks in opdracht van Rijkswaterstaat CIV (Centrale Informatievoorziening) in het gehele Deltagebied vastgelegd door medewerkers van DPM met hulp van beheerders en vrijwilligers. Broedsucces is, net als de jaarlijkse overleving, een sleutelfactor in groei of afname van populaties. Daarom wordt in deze populaties ook het broedsucces gemonitord. Het volgen van het broedsucces maakt geen onderdeel uit van het huidige monitoringprogramma, maar is in opdracht van verschillende opdrachtgevers in de periode 1999-2019 uitgevoerd (Lillipaly et al., 2019).

6 Discussie en conclusies: kennislacunes

6.1 Waterbeweging en morfodynamica

Op basis van de morfologie en dominante morfodynamische processen kan de Schelde-monding worden ingedeeld in vier deelsystemen (Figuur 2.7):

1. Noord: plaat-geul systeem rondom Oostgat/Sardijngeul. De geulen worden gedomineerd door het getij, terwijl voor de plaatdynamiek ook de golfwerking een belangrijke rol speelt. De kust van Walcheren is erosief en wordt op zijn plek gehouden door kustverdediging, strandsuppleties en, meer recent, geulwandsuppleties.
2. Centraal: Vlake van de Raan. Deze ligt relatief stabiel, en golven spelen hier een relatief belangrijke rol. Deze wordt doorsneden door (oude) getijgeulen, zoals Deurloo West, Geul van de Walvischstaart en Spleet.
3. Zuid: (Zeeuws-)Vlaamse kust en Appelzak. Het is niet geheel duidelijk in welke mate golven en getij van belang zijn. Er is hier een belangrijke rol weggelegd voor sedimentbeheer en menselijke ingrepen: de haven van Zeebrugge, het onderhoud van de vaargeulen en het storten van het gebaggerde sediment en kustverdediging.
4. Oost: instroming Westerschelde. Het bestaat uit de getij-gedomineerde geulen Wielingen-Honte die de samenhang tussen de Schelde-monding en de Westerschelde bepalen, zoals de netto sedimentuitwisseling.

Elk gebied heeft zijn eigen kennisvragen wat betreft de waterbeweging en de morfodynamica. De belangrijkste zijn:

- De 2005 en 2009 geulwandsuppleties in het Oostgat zijn behoorlijk stabiel. Het is niet duidelijk waarom dit het geval is, en waar het wel geërodeerde zand naar toe gaat. We hebben geen studie kunnen vinden die de morfologische ontwikkeling van de geulwandsuppleties en de onderliggende processen in zijn volledigheid onderzocht heeft.
- Het plaat-geul-systeem rondom het Oostgat-Sardijngeul is een intrigerend, dynamisch gebied met een overgang van getijdominantie in de geulen tot een aanzienlijke golfinvloed op de voorliggende banken (Bankje van Zoutelande, Elleboog). De plaat-geul interactie en de onderliggende morfologische processen zijn niet geheel gekend.
- Bij grote stormen zullen de ondieptes (Vlake van de Raan) en de eerder genoemde banken een belangrijke golfdempende werking hebben. We hebben geen studie kunnen vinden die dit specifiek onderzocht heeft.
- Er is relatief weinig studie gedaan naar waterbeweging en sedimenttransportprocessen op de Vlake van de Raan. Het is de vraag waarom de Vlake van de Raan een morfologisch stabiel gebied is, terwijl de optredende snelheden en golven groot genoeg zijn om het sediment te mobiliseren.
- Er is geen eenduidig conceptueel model van de sedimentuitwisseling tussen de Westerschelde en het mondingsgebied, en hoe deze beïnvloed wordt door zeespiegelstijging en menselijke ingrepen.
- Op basis van de lange termijn ontwikkelingen van de Westerschelde en zijn monding kunnen we als hypothese stellen dat door de verlanding en bedijking van de zijtakken de ebstroming in het westelijk deel van het estuarium dominanter werd waardoor het patroon van geulen en banken in de monding veranderde. Een samenhang tussen de ontwikkelingen in Westerschelde en monding is eerder gesuggereerd (o.a. door Van der Spek, 1997b; Brand, 2016) maar niet in detail onderbouwd. De hypothese kan getoetst worden door simulatie van het effect van de morfologische ontwikkelingen in het estuarium op de waterbeweging en morfodynamiek in de monding. De aanpassing van met name het geulpatroon in het proximale deel van de monding zal vertraagd zijn door het voorkomen van erosieresistente lagen in geringe diepte in de ondergrond.

6.2 Ecologie

De meeste beschikbare informatie betreft monitoringdata van het voorkomen van bepaalde soorten. Informatie over het ecologisch functioneren van het gebied is schaars. Er zijn bijvoorbeeld geen studies beschikbaar waarin de effecten van klimaatverandering, zeespiegelstijging of andere antropogene factoren op het ecosysteem van de Schelde-monding bestudeerd is. Daarbij zijn de meeste ecologische studies op een grote ruimteschaal uitgevoerd (groter dan de Schelde-monding). Het belang voor de ecologie van specifieke delen in de monding van de Schelde (zoals geulen en platen) is daarbij nooit in detail bekeken.

Er zijn aanwijzingen dat de monding van de Schelde qua bodemfauna een rijk gebied is. Binnen de Schelde-monding komen gebieden voor met een verschillende bodemsamenstelling en bodemmorfologie, wat waarschijnlijk leidt tot een diverse set habitats en een diversiteit aan benthische gemeenschappen. De in de Schelde-monding aanwezige soorten bodemdieren verschillen niet van de soorten die langs de gehele Nederlandse kust voorkomen.

Het gebied is rijk aan vissoorten en van belang als opgroeigebied voor jonge vissen. In de Schelde-monding komen naast kinderkamersoorten ook residente soorten voor in iets lagere dichtheden dan in de Voordelta. Daarnaast vormt het gebied de overgang tussen de Noordzee en de Schelde en is daarom ook belangrijk voor trekvissen.

De Schelde-monding wordt als voedselgebied gebruikt door verschillende zeevogels waaronder roodkeelduikers, dwergmeeuwen, kleine mantelmeeuwen, grote sterns en zwarte zee-eenden. De duikende vogels zoals de visdief en de grote stern broeden in nabijgelegen gebieden, waaronder de voorhaven van Zeebrugge en de Hooge Platen en foerageren bij de Schelde-monding. In de winter komen viseters als de roodkeelduiker en de fuut voor. Ook heeft de Schelde-monding een functie als migratiecorridor, vooral voor de dwergmeeuw, de kleine mantelmeeuw, de visdief en de grote stern.

Bruinvissen en zeehonden komen in de gehele Noordzee voor, waardoor de Schelde-monding slechts een klein onderdeel vormt van hun leefgebied. De gewone zeehond en de grijze zeehond gebruiken het hele mondingsgebied om te foerageren.

Voor alle mobiele soorten is het moeilijk om een goed beeld te krijgen van het belang van de Schelde-monding voor de populaties in de Schelde-monding en breder. Het gebied is relatief klein in verhouding tot het verspreidingsgebied van de meeste soorten, maar het lijkt qua bodemfauna wat rijker te zijn dan de rest van de monding. Het is dus mogelijk dat het gebied (in relatie tot het oppervlak) een belangrijke bijdrage levert aan de draagkracht voor sommige soorten, maar zeker is dit niet.

Voor alle beschikbare monitoringdata (benthos, vis, vogels, zeezoogdieren) geldt dat ze nader geanalyseerd kunnen worden met een specifieke focus op de Schelde-monding. Dit zou meer inzichten in het functioneren van het systeem kunnen opleveren (b.v. relaties met de morfodynamiek). Een nadere analyse valt echter buiten de scope van deze studie.

Wat betreft inzicht in het huidige ecologisch functioneren van de Schelde-monding is het op basis van de bestaande studies niet duidelijk of een suppletie (met als doel hier meer reliëf en diversiteit in habitat aan te brengen) zal leiden tot een meetbare verandering in het ecosysteem. Omdat een suppletie direct ingrijpt in het habitat en leefwijze van bodemdieren, is de verwachting dat eventuele effecten het beste meetbaar zijn aan deze diergroep, in tegenstelling tot vogels, zeezoogdieren en vissen die veel mobieler zijn. Een nadere analyse op basis van de WOT gegevens waarbij gebieden met verschillende veranderingen in abiotische condities met elkaar vergeleken worden, kan enig inzicht geven in welke veranderingen mogelijk te verwachten zijn.

De impact van een suppletie is bovendien waarschijnlijk sterk tijdsafhankelijk. Na de suppletie zal het meerdere jaren duren voordat een evenwichtsgemeenschap is ontwikkeld en het hangt sterk af van de morfologische ontwikkelingen en stabiliteit, hoe lang een eventueel effect aanhoudt.

De belangrijkste kennisvragen m.b.t. de ecologie van de Schelde-monding in relatie tot de sedimenthuishouding zijn:

Bodemdieren en vis:

- Hoe verhoudt de bodemdier- en visgemeenschap zich ten opzichte van de morfologische dynamiek (sedimentatie/erosie), hydrodynamiek en sedimentdynamiek.
- In hoeverre zijn de geulranden van belang voor vis en bodemdieren?
- Wat is het belang van de geulen voor (trek)vissen?
- Zorgt een verhoging d.m.v. een suppletie op het centrale deel van de Vlake van de Raan voor een verrijking of verarming van de bodemdier- en visgemeenschap en hoe lang blijft zo'n verhoging intact?

Vogels:

- Wat is het relatieve belang van de Schelde-monding als foerageergebied voor broedvogels van de Hooge Platen ten opzichte van overige gebieden?
- Wat maakt dit gebied aantrekkelijk als foerageergebied?

Zeezoogdieren:

- Wat is het relatieve belang van de Schelde-monding als foerageergebied voor zeehonden/bruinvissen ten opzichte van overige gebieden?
- Wat maakt dit gebied aantrekkelijk als foerageergebied?

6.3 Monitoringsdata

Aan de zuidkant van de Schelde-monding (d.w.z. langs de Vlaamse kust) zijn relatief veel meetstations aanwezig voor waterstanden en golven en worden ook permanent stroomsnelheden gemeten. Voor het centrale en noordelijke deel van de Schelde-monding is minder monitoringsdata beschikbaar. Vooral metingen van de stroomsnelheden ontbreken. Daarnaast is het meetnet niet dicht genoeg om de interactie tussen bodemligging en waterbeweging te ontrafelen, zoals b.v. de golfdempende werking van de Vlake van de Rijn tijdens stormen.

Sedimentconcentratiemetingen zijn schaars. Hoge-resolutie bodemopnames (b.v. vlakdekkende multibeam) om beddingvormen en morfologische ontwikkeling in detail in kaart te brengen, zijn niet beschikbaar. Deze zijn ten behoeve van beheer en onderhoud ook niet perse nodig, maar een dergelijke verdiepende monitoring zou wel bijdragen aan het beter begrijpen van de morfodynamica van de Schelde-monding.

De programma's waarin bodemdieren, vogels, vissen en zeezoogdieren worden gemonitord, zijn vaak te grofschalig voor gebruik op het detailniveau van de Schelde-monding. Dit geldt voor bodemfauna met name voor deelgebieden zoals het Oostgat, de Vlake van de Raan, de Paardenmarkt of de overgang tussen de monding en de Westerschelde.

Voor benthos is het mogelijk om met gerichte monitoring, gebruikmakend van de morfologische diversiteit in habitats (en veranderingen daarin) in de Schelde-monding uitspraken te doen over de te verwachten veranderingen in biodiversiteit. Met het opvolgen van de suppletie, waarbij veranderingen in benthos gekoppeld kunnen worden aan veranderingen in abiotiek, kunnen deze inzichten uitgebreid worden en kunnen kansencarten worden ontwikkeld op basis van statistische relaties tussen habitatkarakteristieken en voorkomen van soorten.

Voor mobiele soorten is het lastiger om gedegen onderzoek te doen naar de specifieke waarde van de Schelde-monding. Voor vogels en zeezoogdieren zou dit kunnen middels waarnemingen aan de manier waarop deze dieren het gebied gebruiken in relatie tot andere deelgebieden. Dit kan bijvoorbeeld met zenders of met directe waarnemingen vanaf schepen. Voor grotere trekvissoorten kan dit met behulp van akoestische zenders en een detectienetwerk. Om meer inzicht te krijgen in de foerageerfunctie van de Schelde-monding voor vogels en zeezoogdieren zou een visbemonsteringsprogramma nodig zijn waarbij zowel bodemgebonden (demersale) als schoolvormende vis in de waterkolom (pelagische vis) onderzocht worden, aangezien demersale vis vooral voor zeezoogdieren en enkele diepduikende vogels en pelagische vis vooral voor meeuwen en sterns belangrijk is.

7 Referenties

- Aarts, G., J. Cremer, R. Kirkwood, J. T. v. d. Wal, J. Matthiopoulos en S. Brasseur (2016). Spatial distribution and habitat preference of harbour seals (*Phoca vitulina*) in the Dutch North Sea. Wageningen Marine Research, rapport nr: 1566-7197. Den Helder.
- Arts, F. A., S. J. Lilipaly, M. S. J. Hoekstein, K. D. van Straalen, M. Sluijter en P. A. Wolf (2018). Watervogels en zeezoogdieren in de Zoute Delta 2016/2017. Rapport Rijkswaterstaat – Centrale Informatievoorziening. Rapport BM 18.13.
- Arts, F. A., S. J. Lilipaly, M. S. J. Hoekstein, K. D. van Straalen, M. Sluijter en P. A. Wolf (2019). Watervogels en zeezoogdieren in de Zoute Delta 2017/2018. Rapport Rijkswaterstaat – Centrale Informatievoorziening. Rapport BM 19.08.
- Baptist, M. J., van Dalfsen, J., Weber, A., Passchier, S., & van Heteren, S. (2006). The distribution of macrozoobenthos in the southern North Sea in relation to meso-scale bedforms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(3–4), 538–546.
- Baudez, L. (1989). De Scheldekaarten van Beautemps-Beaupré. In: Antwerpen - Tijdschrift van de Stad Antwerpen, Jaargang 35-1, 13 pp.
- Bolle, L. (2016). PMR vismonitoring 2015: Rapport veld- en labwerkzaamheden., rapport.
- Bos, O., Dijkman, E., & Cremer, J. (2008). Gegevens voor aanmelding van mariene Habitatrichtlijngebieden: Doggerssbank, Klaverbank, Noordzeekustzone, Vlakte van de Raan. Rapport Wageningen IMARES C081/08.
- Brand, E. (2016). The driving mechanisms behind morphological changes in the Western Scheldt mouth area over the past two centuries - a data analysis. Stageverslag Universiteit Utrecht en Flanders Hydraulic Research.
- Breine, N.T., De Backer, A., Van Colen, C., Moens, T., Hostens, K., Van Hoey, G., 2018. Structural and functional diversity of soft-bottom macrobenthic communities in the Southern North Sea. *Estuar Coast Shelf S* 214, 173-184.
- Camphuysen, C. J. en M. Leopold (2014). Atlas of seabirds in the southern North Sea. IBN Research report 94/6 / NIOZ Report 1994-8. Institute for Forestry and Nature Research, Netherlands Institute for Sea Research and Dutch Seabird Group, Texel, the Netherlands.
- 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, J. (2013). Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde. Project LTV Veiligheid en Toegankelijkheid; LTV V&T-RAPPORT K-17. Rapport 076945827:0.4 – Definitief, Arcadis.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek & Arcadis (2013a). Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde. LTV rapport G-2.
- Coosen, J., J. Mees, J. Seys en N. Fockedeij (2006). Studiedag: De Vlakte van de Raan van onder het stof gehaald. Vlaams Instituut voor de Zee (VLIZ). VLIZ SPECIAL PUBLICATION 35, Oostende, België, rapport.
- Courtens, W., E. W. M. Stienen en N. Vanermen (2006). Zeevogels en zeezoogdieren van de Vlakte van de Raan, in: Coosen, J. et al. (Ed.) Studiedag: De Vlakte van de Raan van onder het stof gehaald, Oostende, 13 oktober 2006. VLIZ Special Publication, 35: pp. 59-72, rapport.
- Craeymeersch, J., Hamerlynk, O., Hostens, K., Vanreusel, A., & Vincx, M. (1990). De ekologische ontwikkeling van de Voordelta. Deelrapport 1: De huidige ekologische situatie van de Voordelta. Rapport Delta Instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek, Yerseke & Instituut voor Dierkunde, Gent.
- Craeymeersch, J.A., Wijsman, J., 2006. Ruimtelijke verschillen en temporele fluctuaties in het voorkomen van een aantal schelpdieren in de Voordelta. Wageningen IMARES, Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies. Rapport C013/06. 27 pp.

- Craeymeersch, J.A., Leopold, M.F., van Wijk, M., 2001. Halfgeknotted strandschelp en Amerikaanse zwaardschede: een overzicht van bestaande kennis over visserij, economische betekenis, regelgeving, ecologie van de beviste soorten en effecten op het ecosysteem. RIVO Nederlands Instituut voor Visserijonderzoek, IJmuiden, p. 34.
- Craeymeersch, J., Perdon, J., Jol, J., Brummelhuis, E., & van Asch, M. (2017). PMR Monitoring natuurcompensatie Voordelta-bodem dieren. Datarapport campagne bodemschaaf 2005 - Multivariate analyse 2014-2013. Rapport IMARES Wageningen UR.
- 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.
- Dam, G. (2017). Lange-termijn sedimentbalans van de Westerschelde. Rapport 1778/U16516/D/GD, Svašek Hydraulics.
- Damveld, J. H., van der Reijden, K. J., Cheng, C., Koop, L., Haaksma, L. R., Walsh, C. A. J., ... Hulscher, S. J. M. H. (2018). Video Transects Reveal That Tidal Sand Waves Affect the Spatial Distribution of Benthic Organisms and Sand Ripples. *Geophysical Research Letters*, 45(21), 11,837-11,846.
- Dekker, L. (2012). Monitoring vooroeversuppleties Oostgat, Zeeuws Vlaanderen t/m november 2011 en Zwakke Schakels t/m maart 2012 (eindrapport). Rapport 2011-2, Rijkswaterstaat, Meetadviesdienst Zeeland.
- De Maerschalck, B., Vanlede, J., Mostaert, F. (2013). Sediment Transport Model for the Port of Zeebrugge: Analysis of the MUMM Tripod Measurements. Version 1.1. WL Rapporten, 00_067. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.
- De Maerschalck et al. (2017). Modelling Belgische Kustzone en Scheldemonding: Deelrapport 2 – Morfologische analyse scenario's Vlaamse Baaien. Versie 4.0. WL Rapporten, 15_068_2. Waterbouwkundig Laboratorium & Deltares, Antwerpen.
- Degraer, S., Verfaille, E., & Vincx, M. (2006). Het macrobenthos van het Belgische deel van de vlakte van de Raan in een ruimer perspectief. In *Vlakte van de Raan van onder het stof gehaald* (pp. 106-115).
- Degraer, S., Wittoeck, J., Appeltans, W., Cooreman, K., Deprez, T., Hillewaert, H., Vincx, M. (2006). The Macrobenthos atlas of the Belgian part of the North Sea. Belgian Science Policy.
- Degraer, S., Verfaille, E., Willems, W., Adriaens, E., Vincx, M., & Van Lancker, V. (2008). Habitat suitability modelling as a mapping tool for macrobenthic communities: An example from the Belgian part of the North Sea. *Continental Shelf Research*, 28, 369-379.
- Degraer, S., W. Courtens, J. Haelters, K. Hostens, T. Jacques, F. Kerckhof, E. Stienen & G. Van Hoey (2010). Bepalen van instandhoudingsdoelstellingen voor de beschermde soorten en habitats in het Belgische deel van de Noordzee, in het bijzonder in beschermde mariene gebieden. Eindrapport in opdracht van de Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu, Directoraat-generaal Leefmilieu. Brussel, België. 132 pp.
- Degraer, S., & Hostens, K. (2016). Assessment of the conservation value of the Vlakte van de Raan Site of Community Interests. MARECO report 02.
- Dekker, L. (2012). Monitoring vooroeversuppleties Oostgat, Zeeuws-Vlaanderen t/m november 2011 en Zwakke Schakels t/m maart 2012 (eindrapport). Rijkswaterstaat, Meetadviesdienst Zeeland.
- Dolan, M., Thorsnes, T., Leth, J., Al-Hamdani, Z., Guinan, J., Van Lancker, V., 2012. Terrain characterization from bathymetry data at various resolutions in European waters - experiences and recommendations. Geological Survey of Norway, Report no. 2012.045. 76 pp.
- Duineveld, G.C.A., Künitzer, A., Niermann, U., de Wilde, P.A.W.J., Gray, J.S. (1991). The macrobenthos of the North Sea. *Netherlands Journal of Sea Research* 28, 53-65.
- Elias et al. (in voorbereiding). Large-scale morphological changes and sediment budget 1970-2017 of the Western Scheldt Estuary and Ebb-tidal delta.
- Fijn, R. C., F. A. Arts, J. W. de Jong, M. P. Collier, B. W. R. Engels, M. Hoekstein, R.-J. Jonkvorst, S. Lilipaly, P. A. Wolf, A. Gyimesi en M. J. M. Poot (2015). Verspreiding en abundantie van zeevogels en zeezoogdieren op het Nederlands Continentaal Plat in 2014-2015. Bureau Waardenburg Rapportnr. 15-179. Bureau Waardenburg, Culemborg, rapport.

- Fijn, R. C., F. A. Arts, B. W. R. Engels, J. W. de Jong, M. P. Collier, D. Beuker, M. Hoekstein, R.-J. Jonkvorst, S. Lilipaly, D. van Straalen en P. A. Wolf (2017). Verspreiding en abundantie van zeevogels en zeezoogdieren op het Nederlands Continentaal Plat in 2016-2017. Bureau Waardenburg Rapportnr. 17-197. Bureau Waardenburg & Delta Project Management, Culemborg, rapport.
- Fijn, R. C., J. W. de Jong, F. A. Arts, D. Beuker, E.L. Bravo Rebolledo, B. W. R. Engels, M. Hoekstein, R.-J. Jonkvorst, S. Lilipaly, M. Sluijter, D. van Straalen en P. A. Wolf (2019). Verspreiding en abundantie van zeevogels en zeezoogdieren op het Nederlands Continentaal Plat in 2018-2019. Bureau Waardenburg Rapportnr. 19-258. Bureau Waardenburg & Delta Project Management, Culemborg, rapport.
- Geelhoed, S. (2019). Vliegtuigtellingen van bruinvissen in de Noordzee.
- Gerritsen, F., de Jong, H. (1983). Stabiliteit van doorstroomprofielen in de Westerschelde. Rapport WWKZ-83.V008, Rijkswaterstaat (Vlissingen).
- Gottschalk, M.K.E. (1955). Historische geografie van Westelijk Zeeuws-Vlaanderen. I. Tot de Sint-Elisabethsvloed van 1404. Sociaal-Geografische Studies, 3. Van Gorcum, Assen.
- Greenstreet, S., Robinson, L., Reiss, H., Craeymeersch, J., Callaway, R., Goffin, A., Jorgensen, L., Robertson, M., Kröncke, I., De Boois, I., Jacob, N., Lancaster, J. 2007. Species composition, diversity, biomass and production of the benthic invertebrate community of the North Sea. Fisheries Research Services, Aberdeen, UK. Collaborative Report No 10/07. 67 pp.
- Haecon (2006). Actualisatie van de zandbalans van de Zee- en Westerschelde. Rapport 1249760008/lvp.
- Holzhauser, H., Borsje, B. W., Dalfsen, J. A. Van, Wijnberg, K. M., Hulscher, S.J.M.H., Herman, P. M. J. (2020). Benthic species distribution linked to morphological features of a barred coast. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(16).
- Hordijk, D. (2002). Geulwandsuppletie Oostgat westerschelde. M.Sc. thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Hostens, K., Moulaert, I. (2006). De macro-, epi- en visfauna op de Vlakte van de Raan, in: Coosen, J. et al. (Ed.) Studiedag: De Vlakte van de Raan van onder het stof gehaald, Oostende, 13 oktober 2006. VLIZ Special Publication, 35: pp. 116-135.
- ICES (2018). Report of the Working Group on Beam Trawl Surveys (WGBEAM). ICES CM 2018/EOSG:05, rapport.
- Janssen, G. M., Kleef, H., Mulder, S., & Tydeman, P. (2008). Pilot assessment of depth related distribution of macrofauna in surf zone along Dutch coast and its implications for coastal management. *Marine Ecology*, 29(1), 186–194.
- Joiris C., (1972). Observations ornithologiques réalisées dans le sud-est de la Mer du Nord, entre juin 1971 et janvier 1972. 1. Oiseaux marins. *Aves*, 9: 85-103.
- Jones, N.S. (1950). Marine bottom communities. *Biological Reviews* 25, 283-313.
- Jongbloed, R. H., N. T. Hintzen, M. A. M. Machiels en A. S. Couperus (2014). Nadere effecten analyse staandwantvisserij - bruinvis in Natura 2000 gebied vlakte van de Raan. IMARES, rapport. Den Helder.
- Jeuken, C., Van Helvert, M., Wang, Z.B. (2002). ESTMORF berekeningen naar de invloed van ingrepen en natuurlijke forceringen op de zandhuishouding van Westerschelde en monding. Rapport Z3246, WL|Delft Hydraulics, Nederland.
- Klompmaker, E. (2013). De Scheldekaart van Rupelmonde tot aan het Zwin en het eiland Walcheren (1468) en De Scheldekaart van Rupelmonde tot aan de zee (1504/05) - Een digitale analyse. Masterscriptie, Universiteit Gent.
- Kuiper, K., Nederhoff, K., Vergouwen, S. (2016). Beheerbibliotheek Zeeuws-Vlaanderen. Rapport 1220040-002-ZKS-0002, Deltares.
- Lilipaly, S., F. A. Arts, M. Sluijter, P. A. Wolf (2018). Midwintertelling van zee-eenden in de Waddenzee en Nederlandse kustwateren in november 2017 en januari 2018. Midwintertelling van zee-eenden in de Waddenzee en Nederlandse kustwateren in november 2017 en januari 2018. Rapport RWS – Centrale Informatievoorziening. Rapport BM 18.24 DPM Rapportnr. 2018-05. Delta Project Management, Vlissingen.

- Künitzer, A., Basford, D., Craeymeersch, J.A., Dewarumez, J.M., Dörjes, J., Duineveld, G.C.A., Eleftheriou, A., Heip, C., Herman, P., Kingston, P., Niermann, U., Rachor, E., Rumohr, H., de Wilde, P.A.J., 1992. The benthic infauna of the North Sea: species distribution and assemblages. *Ices J Mar Sci* 49, 127-143.
- Markert, E., Kröncke, I., & Kubicki, A. (2015). Small scale morphodynamics of shoreface-connected ridges and their impact on benthic macrofauna. *Journal of Sea Research*, 99, 47–55.
- Mastbergen, D., Nederhoff, K., Van der Valk, B. Maarse, M. (2017). Beheerbibliotheek Walcheren. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11200538-002-ZKS-0006, Deltares.
- Ministerie van Landbouw, Natuur en Visserij. (2008). Profiel Habitatype 1110 - Permanent overstroomde zandbanken, versie 18 dec 2008.
- Ministerie van Landbouw, Natuur en Visserij. (2014). Profiel Habitatype 1110 - Permanent overstroomde zandbanken, versie sep 2014.
- Nederbragt, G., Koomans, G. (2006). Nourishment of the slope of a tidal channel. From experiment to practice. *Proceedings Coastal Dynamics Conference, Barcelona, Spain*.
- Nolte, A. et al. (2020). Technisch Advies Sedimentbehoefte Kustfundament. Ten behoeve van het beleidsadvies Kustgenese 2.0. Rapport 1220339-009-ZKS-0014, Deltares, Nederland.
- Perdon, J. Troost, K., van Zwol, J. van Asch, M. van der Pool, J. 2019. Schelpdierbestanden in de Nederlandse kustzone in 2019. Stichting Wageningen Research, Centrum voor Visserijonderzoek (CVO) CVO rapport 19.010.
- Petersen, J. (1924). A brief survey of the animal communities in Danish waters, based upon quantitative samples taken with the bottom sampler. *American Journal of Science* 7, 343-354.
- Plancke, Y., Vereecken, H., Claeys, S., Verwaest, T., & Mostaert, F. (2014). Hydro- en sedimentdynamica in het mondingsgebied van het Schelde estuarium – Deelrapport 1 – Factual data rapport frame- en puntmetingen periode augustus 2014. Waterbouwkundig Laboratorium rapport 14_083.
- Poortman, S. (2013). Effect morfologie monding Westerschelde op getij. LTV rapport G-12.
- Poot, M. J. M., R. C. Fijn, R. J. Jonkvorst, C. Heunks, M. P. Collier, J. de Jong en P. W. van Horssen (2011). Aerial surveys of seabirds in the Dutch North Sea May 2010 – April 2011. Bureau Waardenburg report no 10-235.
- Rachor, E., Nehmer, P. 2003. Erfassung und Bewertung ökologisch wertvoller Lebensräume in der Nordsee. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, p. 175.
- Rees, H.L., Eggleton, J.D., Rachor, E., Vanden Berghe, E. 2007. Structure and dynamics of the North Sea benthos. ICES Cooperative Research Report No. 288. 258 pp.
- Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Ministerie van Economische Zaken (2016) Beheerplan Natura 2000 Vlake van de Raan.
- Rijkswaterstaat (1944). Ontwikkeling regiem Wester-Schelde sedert 1800.
- Reise, K. (2002). Sediment mediated species interactions in coastal waters. *Journal of Sea Research*, 48, 127-141.
- Rijkswaterstaat (1944). Ontwikkeling regiem Wester-Schelde sedert 1800. Nota Rijkswaterstaat (toegeschreven aan Johan van Veen), 4 pp. met 8 kaartbijlagen.
- Röbke, B.R., Gawehn, M., Van der Werf, J. (2018). The morphodynamic Delft3D-Vlaamse Baaien model. Report 1210301-001-ZKS-0007, Deltares, The Netherlands.
- Röbke, B.R., Van der Wegen, M., Elmilady, H. & Taal, M. (in voorbereiding). The long-term morphological response to sea level rise and different dredging strategies in the Western Scheldt estuary. Report 1210301-009-ZKS, Deltares, The Netherlands.
- Schrijver, M. (2019). Omschrijving hoofdlijnen sedimentpilot definitief. Versie 4 dec 2019, Rijkswaterstaat Zee & Delta.
- Schrijvershof & Mastbergen (2016). Stabiliteit aanzanding bij Zoutelande. Rapport 1230043-001-ZKS-0010, Deltares.
- 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.

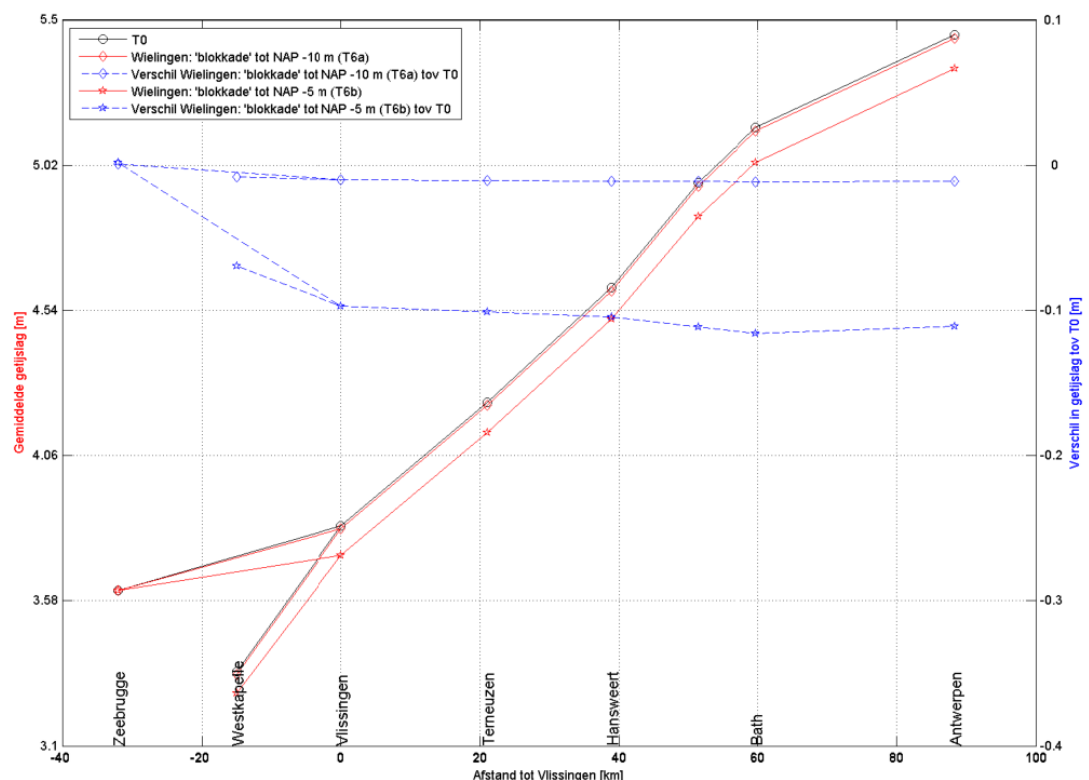
- Taal, M. et al. (2019). Kennisvragen Scheldemonding en nabije kusten. Beleid, beheer, kennis kustveiligheid Vlaanderen en Nederland. Rapport 11203725-000-ZKS-0001, Deltares, Nederland.
- Tonnon, P.K., Van der Werf, J.J. (2014). Geulopdringing Zuidwest Walcheren. Rapport 1208921-000-ZKS-0005. Deltares, Nederland.
- Troost, K., Goudswaard, P., & van Asch, M. (2014). Monitoring VIBEG voor bodemdieren Vlakte van de Raan. T0 in 2013. Rapport IMARES.
- Troost, K., Perdon, K., Jol, J., van Asch, M., & van den Ende, D. (2015). Bestanden van mesheften, halfgeknotte strandschepen en andere schelpdieren in de Nederlandse kustwateren in 2015. Rapport IMARES.
- Tulp, I., T.C. Prins, J.A.M. Craeymeersch, S. Ijff and M.T. v.d. Sluis (2018). Syntheserapport PMR NCV. Ijmuiden, Wageningen Marine Research, WMR rapport nummer C013/18; Deltares rapport nummer 1230156-000-ZKS-0004, 294 pp.
- Van Acker, G., 1957. Gottschalk (M. K. E.), Historische geografie van Westelijk Zeeuws-Vlaanderen. I; Tot de Sint-Elisabethsvloed van 1404. In: Revue belge de Philologie et d'Histoire, tome 35, fasc. 1, 125-127. https://www.persee.fr/doc/rbph_0035-0818_1957_num_35_1_2027_t1_0125_0000_1.
- Van Bemmelen, R. S. A., S. C. V. Geelhoed en M. F. Leopold (2011). Shortlist Masterplan Wind Ship-based monitoring of seabirds and cetaceans. IMARES (Report / IMARES Wageningen UR C099/11) - 90, rapport.
- Van Cauwenberghe, C. (1966). Hydrografische analyse van de Scheldemonding ten oosten van de meridiaan 3°05' tot Vlissingen. Het Ingenieursblad 35, nr. 17, 565-576.
- Van Cauwenberghe, C (2004). Zeekaarten van de Vlaamse kust en van de Westerschelde voor en na de onafhankelijkheid van België in 1830 (Deel 1). In: Koninckx, C. (red.), Wetenschap op zee. Collectanea Maritima, 7. Wetenschappelijk Comité voor Maritieme Geschiedenis, Koninklijke Academie voor Wetenschappen, Letteren en Schone Kunsten van België, Brussel, pp. 145-163.
- Van Dalfsen, J. A. (2009). Inventarisatie brandingszone. Wageningen.
- Van Dalfsen, J. A., & Oosterbaan, J. (1996). Risk analysis of coastal nourishment techniques. The effects on benthic fauna of sand extraction off the island Terschelling. The Netherlands. Report 5: Post-Extraction survey, September-October 1994. In RIACON. Haren: Rijksinstituut voor Kust en Zee.
- Van Dijk, T.A.G.P.; van Dalfsen, J.A.; Van Lancker, V.; van Overmeeren, R.A.; Van Heteren, S.; Doornenbal, P.J. (2012). Benthic habitat variations over tidal ridges, North Sea, the Netherlands, in: Harris, P. et al. (Ed.) Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat: GeoHab Atlas of seafloor geomorphic features and benthic habitats. pp. 241-249.
- Van Hooydonk, E. (2013). Strijd om de stroom. Een politieke geschiedenis van de Schelde. Tweede, gewijzigde druk. Davidfonds Uitgeverij, Leuven, 391 pp.
- Van Leeuwen, B. (2013). Basisrapport grootschalige ontwikkeling. Probleemanalyse zandwinning. Basisrapport, 1 oktober 2013 – versie 2.0 LTV V&T rapport G-10.
- Van der Slikke, M.J. (1997). Grootschalige zandbalans van de Westerscheldemonding (1969-1993), een inventarisatie van dieptegegevens (1800-1996). Rapport R97-18, IMAU, Universiteit Utrecht.
- Van der Slikke, M.J. (1999). Invloed van stormen op de zuidwest kust van Walcheren; uitwerking van de meetcampagne 1997/1998, Rapport IMAU, Utrecht.
- Van der Spek, A.J.F. (1993). Getij-simulatie Voormalige Getijdebekkens, Deel1: de Westerschelde in 1650 en 1800. Rapport 93-10, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht, Universiteit Utrecht, 47 pp.
- Van der Spek, A.J.F. (1997a). Tidal asymmetry and long-term evolution of Holocene tidal basins in The Netherlands: simulation of palaeo-tides in the Schelde estuary. Marine Geology 141, 71-90.
- Van der Spek, A.J.F. (1997b). De geologische opbouw van de ondergrond van het mondingsgebied van de Westerschelde en de rol hiervan in de morfologische ontwikkeling. Rapport NITG 97-284-B, Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Utrecht, 48 pp.
- Van der Werf, J.J. et al. (2011). Aanzanding en onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Sardijngeul. Rapport 1204421-004, Deltares.

- Van der Werf, J.J. et al. (2020). Erosion mechanism of the landward Oostgat tidal channel slope, The Netherlands. *Coastal Engineering* 193, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.104027>
- Van Enckevoort, I. (1996). Morfologisch onderzoek Westerscheldemonding; deel 2 Morfologische ontwikkeling van de Westerschelde monding sinds 1800. Rapport R 96-21, IMAU, Universiteit Utrecht.
- Van Hoey, G., Degraer, S., & Vincx, M. (2004). Macrobenthic community structure of soft-bottom sediments at the Belgian Continental Shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 59, 599-613.
- Van Ormondt, M. & De Ronde, J.G. (2009). Mogelijke effecten Geulwandsuppletie Oostgat op de drempel tussen het Oostgat en de Sardijngeul. Rapport Z4582.70, Deltares.
- Van Veen, J. (1950). Eb- en vloed-schaar systemen in de Nederlandse getijdewateren. *Tijdschrift Kon. Nederlands Aardrijkskundig Genootschap* 67, 303-325.
- Van Weerdenburg, R., Holzhauer, H. (2019). Gebiedsbeschrijving Westerscheldemonding en overzicht databeschikbaarheid. Deltares rapport 1203725-000-ZKS-0010.
- 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 Wegen en Waterbouwkunde, 's-Gravenhage.
- Vlam, A.W. (1940). Bijdragen tot de kennis van de veranderingen in den mond van de Westerschelde van het begin der 16e eeuw tot omstreeks 1800. Rapport Rijkswaterstaat Studiedienst Benedenrivieren, 's Gravenhage, 10 pp. (nov 1940).
- Vroom, J., & Schrijvershof, R. (2015). Overzicht van menselijke ingrepen in de Westerschelde en haar mondingsgebied in de periode 1985-2014. Deltares memo 1210301-001-ZKS-0005.
- Vroom, J. Van Maren, B. Van der Werf, J., Van Rooijen, A. (2016). Zand-slib modellering voor het mondingsgebied van het Schelde-estuarium. Rapport 1210301-002-ZKS-0002, Deltares, Nederland.
- Wang, Z.B. (1997). Morfologische interactie Westerschelde estuarium en het mondingsgebied. ASIMTA-Westerschelde, een gedragsgeoriënteerde modellering. Rapport Z2253, Waterloopkundig Laboratorium.
- Wang, Z.B., Van Helvert, M. (2001). ESTMORF, a model for long-term morphological development of estuaries and tidal lagoons. Overall review of the development of the model. Report Z3105, WL|Delft Hydraulics, The Netherlands.
- Wijnhoven, S., Duineveld, G., Lavaleye, M., Craeymeersch, J., Troost, K., & van Asch, M. (2013). Kaderrichtlijn Marien indicatoren Noordzee: naar een uitgebalanceerde selectie van indicator soorten ter evaluatie van habitats en gebieden en scenario's hoe die te monitoren. Rapport NIOZ, Yerseke.
- Ysebaert, T., Herman, P., Meire, P., Craeymeersch, J., Verbeek, H., Heip, C. (2003). Large-scale patterns in estuaries: estuarine macrobenthic communities in the Schelde estuary, NW Europe. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57, 335-355.
- Zuurdeeg, J. (1974). De Westerschelde, zeearm en scheepvaart. *Zeeuws Tijdschrift* 24-4, 1-17.

A Effect van grootschalige ingrepen in de Schelde-monding

Er is door Poortman (2013) met het FINEL model van het Schelde-estuarium gerekend aan het effect van ingrepen in de monding op de grootschalige waterbeweging.

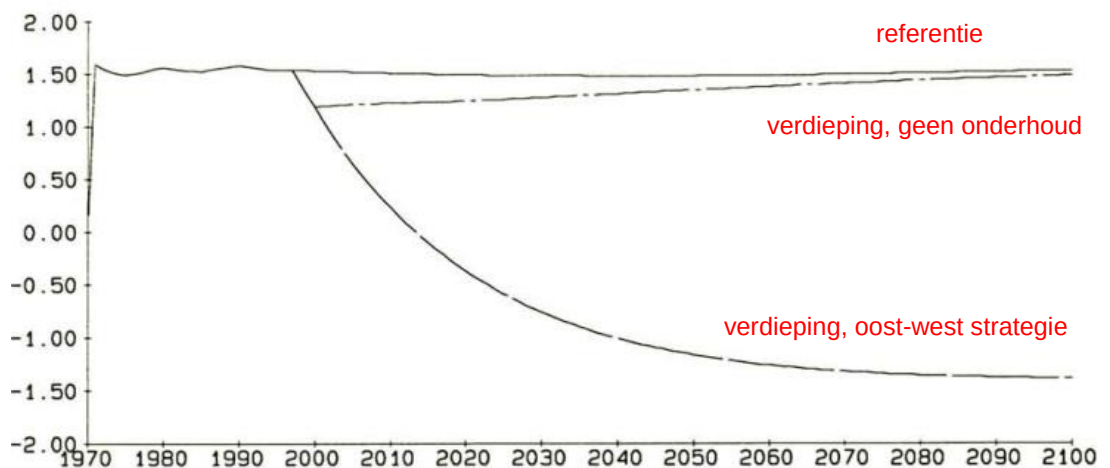
Er wordt geconcludeerd dat de Wielingen vooral belangrijk voor de instroom van de Westerschelde, terwijl de uitstroming vooral bepaald wordt door de Vlake van de Raan en het Oostgat. Dit betekent dat een verondieping van de Wielingen zorgt voor een verlaging van de getijslag in de Westerschelde, terwijl een verondieping van de Vlake van de Raan/het Oostgat juist zorgt voor een verhoging van de getijslag. De modelresultaten wijzen erop dat er grote zandige ingrepen in monding nodig zijn om significante verandering van de getijslag te krijgen (~100 miljoen m³ voor ~10 cm), zie Figuur A.7.1.



Figuur A.7.1 Berekend effect van ingrepen in de Wielingen op de getijslag. Het gaat hierbij om lokale verondiepingen van ca. 30 miljoen m³ (scenario T6a) en 120 miljoen m³ (scenario T6b). (figuur afkomstig uit Poortman, 2013)

B Effect van sedimentbeheer Westerschelde op de sedimentuitwisseling met de monding

Volgens de ASIMTA berekeningen van Wang (1997) zorgt een verdieping in de Westerschelde van 9 miljoen m³ initieel voor een afname van de import, waarna het systeem langzaam naar een situatie gaat die niet veel verschilt van de referentiesom (Figuur B.1). Een verdieping gevolgd door een oost-west onderhoudsstrategie zorgt dat de import omslaat naar een export van uiteindelijk ruim 1 miljoen m³/jaar. De “onderdiepte” in het westen zorgt voor hogere snelheden en sedimentconcentraties (dan in de buurvakken) waardoor het netto dispersieve sedimenttransport negatief wordt (het westelijke gedeelte van de Westerschelde uit).



Figuur B.1 Sedimentimport naar de Westerschelde [miljoen m³/jaar] berekend met ASIMTA. De bovenste lijn is de referentiesom. De middelste lijn toont het effect van een verdieping, uitgevoerd in de periode 1997-2000. De onderste lijn toont het effect van de verdieping en het onderhoud, waarbij het sediment van het oosten naar het westen van de Westerschelde wordt gebracht. (figuur afkomstig uit Wang, 1997)

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl