

Morfologische ontwikkeling van het zuidelijke deel van de Vlake van de Raan, Schelde-monding



Morfologische ontwikkeling van het zuidelijke deel van de Vlake van de Raan, Schelde-monding

Auteur(s)

Jebbe van der Werf
Roy van Weerdenburg
Ad van der Spek



Deze rapportage is mede tot stand gekomen door IMMENSE (Implementing Measures for Sustainable Estuaries), onderdeel van het Noordzeeprogramma van het Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling van de Europese Unie.

Morfologische ontwikkeling van het zuidelijke deel van de Vlake van de Raan, Schelde-monding

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Zee en Delta
Contactpersoon	Marco Schrijver
Referenties	-
Trefwoorden	Schelde-monding; Vlake van de Raan; morfologische ontwikkeling; Delft3D modellering; pilotsuppletie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	27-07-2021
Projectnummer	11206823-000
Document ID	11206823-000-ZKS-0010
Pagina's	52
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Jebbe van der Werf	
	Roy van Weerdenburg	
	Ad van der Spek	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Jebbe van der Werf	Zheng Bing Wang	Bob Hoogendoorn b/a: Myra van der Meulen	
	Roy van Weerdenburg	Edwin Elias		
	Ad van der Spek			

Samenvatting

Rijkswaterstaat is voornemens om een pilotsuppletie in de monding van het Schelde-estuarium aan te leggen. Het gebied langs de zuidelijke rand van de Vlake van de Raan, ten noorden van de getijgeul Wielingen, is de voorkeurszone.

De doelstelling van dit rapport is het beschrijven en verklaren van de morfologische ontwikkeling van het zuidelijk gedeelte van de Vlake van de Raan.

Hiertoe zijn bodemdata geanalyseerd en geïnterpreteerd, en is er een overzicht van menselijke ingrepen gemaakt. Daarnaast is onderzocht in welke mate de opbouw van de ondergrond de morfologische ontwikkeling bepaalt, en wat de invloed van de grootschalige/lange-termijn ontwikkeling is. Tot slot is een Delft3D morfologisch model ingezet om de onderliggende hydrodynamische en zandtransportprocessen beter te begrijpen.

Vanaf 1800 ontwikkelt zich in het interessegebied, samenhangend met de langjarige morfologische ontwikkelingen in het estuarium, een grote ebgeul die een reorganisatie van de geulen en zandbanken in gang zet. Tegen het einde van de 19^e eeuw neemt deze geul in omvang af; tegelijkertijd ontwikkelt zich de noordelijk gelegen Geul van de Walvischstaart. Rond 1930 is de ebgeul afgesloten door ondieptes; de restgeul heet nu Spleet. Hierna is de situatie min of meer stabiel en vinden er geen dergelijke, grootschalige veranderingen plaats.

De belangrijkste morfologische ontwikkeling in het zuidelijke gedeelte van de Vlake van de Raan in de periode 1964-2020 is het ontstaan van de ebschaar tussen de Wielingen en de noordelijk gelegen getijgeul Spleet. Deze ebschaar is, anders dan gebruikelijk is voor een ebschaar, relatief recht van vorm en stabiel qua ligging. Dit is zeer waarschijnlijk voor een deel gekoppeld aan de moeilijk-erodeerbare lagen aan het bodemoppervlak die ook de noordelijke uitbreiding de laatste jaren tot een halt lijken te brengen. Als hypothese stellen we dat de ebschaar niet zozeer ontstaan is door het insnijden door de ebstroming, maar door het opbouwen van een zuidelijk gelegen bank in de vloedrichting.

Het directe effect van menselijke ingrepen, zoals baggeren en storten, op deze morfologische ontwikkeling is naar verwachting beperkt. Er is mogelijk wel sprake van een meer indirect effect via het dieper worden van de Wielingen en het ontstaan van een nieuwe geul aan de westzijde van het interessegebied.

De morfodynamiek van het zuidelijk gedeelte van de Vlake van de Raan is complex en nog niet volledig begrepen. Het is daarom een interessant gebied voor de pilotsuppletie die kennisontwikkeling als hoofddoelstelling heeft. De in dit rapport gegeven aanbevelingen, met name met betrekking tot de monitoring en modellering, kunnen gebruikt worden voor het vormgeven van het kennisprogramma rondom de pilotsuppletie in de Schelde-monding.

Summary

Rijkswaterstaat aims to construct a pilot nourishment in the mouth of the Scheldt estuary. The area on the southern edge of the Vlake van de Raan, north of the Wielingen tidal channel, is the preferential nourishment zone.

This report aims to describe and explain the morphological development of the southern part of the Vlake van de Raan.

In order to do so, bathymetric data were analyzed and interpreted, and an overview of human interventions was made. Furthermore, it was studied to what extent the subsurface controls the morphological development, and what the influence of the long-term/large-scale development is. Finally, a Delft3D morphological model was used to better understand the underlying hydrodynamic and sand transport processes.

From 1800 onwards a large ebb channel develops in the area of interest, together with long-term morphological developments in the estuary. This ebb channel initiates a re-organization of channels and sand banks. The dimensions of this ebb channel decrease by the end of the 19th century. At the same time the northerly channel Geul van de Walvischstaart develops. Around 1930 the ebb channel is closed off by shoals; the remaining channel is now called Spleet. Hereafter the morphology is more or less stable, and such large-scale developments do not take place.

The most important morphological development in the period 1964-2020 at the southern part of the Vlake van de Raan is the generation of an ebb chute (channel) in between the Wielingen and the northerly channel Spleet. This ebb chute is, in contrast to many other ebb chutes, relatively straight and stable over time. This is most likely related to erosion-resistant layers at the bed surface that also recently seem to stop the extension of the ebb chute to the north. We hypothesize that the ebb chute was not generated by the incision due to the ebb current, but by the development of a southerly sand bank in the flood direction.

Human interventions, like dredging and dumping, are expected to have a limited effect on this morphological development. There is possibly a more indirect effect through the deepening of the Wielingen and the development of a new channel on the west side of the area of interest.

The morphodynamics at the southern part of the Vlake van de Raan are complex and not yet fully understood. Hence, it is an interesting area for a pilot nourishment that has knowledge development as its main objective. This report's recommendations, in particular with respect to monitoring and modeling, can be used to design the research program around the pilot nourishment in the mouth of the Scheldt estuary.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Summary	5
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doelstelling	8
1.3	Aanpak	8
1.4	Leeswijzer	8
2	Morfologische ontwikkeling	10
2.1	Huidige morfologie	10
2.2	Morfologische ontwikkeling van 1964 tot 2020	11
2.3	Ondergrond	16
2.4	Lange-termijn morfologische ontwikkeling	17
2.4.1	Schelde-monding	17
2.4.2	Samenhang lange-termijn ontwikkelingen monding en Westerschelde	19
2.4.3	Vlakte van de Raan - zuid	21
3	Menselijke ingrepen	23
3.1	Inleiding	23
3.2	Uitbreiding van de haven van Zeebrugge	23
3.3	Verdiepingen	24
3.4	Vaargeul onderhoud: baggeren en storten	24
3.5	Koppeling met morfologische ontwikkelingen	26
4	Modellering van de morfodynamica en onderliggende processen	28
4.1	Inleiding	28
4.2	Opzet morfodynamisch model	28
4.3	Validatie morfodynamisch model	30
4.4	Transportprocessen	34
4.4.1	Netto zandtransport	34
4.4.2	Zandtransportprocessen	36
5	Discussie	42
5.1	De rol van de ondergrond	42
5.2	Lange-termijn ontwikkelingen	42
5.3	Invloed van menselijke ingrepen	42
5.4	Zandtransporten	43

5.5	Ontwikkeling van de ebschaar	43
6	Conclusies en aanbevelingen	45
6.1	Conclusies	45
6.2	Aanbevelingen	45
7	Referenties	47
A	Effect van moeilijk-erodeerbare lagen op de berekende morfologische ontwikkeling	49
B	Pieksnelheden gedurende spring-doodtij cyclus	50

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Rijkswaterstaat is voornemens om een pilotsuppletie in de monding van het Schelde-estuarium aan te leggen om te onderzoeken in welke mate suppleties in dit gebied bij een toenemende zeespiegelstijging kunnen bijdragen aan de instandhouding van het kustfundament en de veiligheid van de kust en het achterland, rekening houdend met bestaande natuurwaarden en andere gebruiksfuncties.

Uit de studie van der Werf et al. (2021) volgde dat de zone langs de zuidelijke rand van de Vlake van de Raan, ten noorden van de getijgeul Wielingen, het beste scoort op de criteria i) bijdrage aan kennisdoelstelling, ii) effect op gebruiksfuncties en iii) uitvoerbaarheid. Een suppletie in deze zone is goed aan te leggen en te monitoren, het effect op de hoofdfuncties (veiligheid, toegankelijkheid en natuurlijkheid) is naar verwachting beperkt, en de potentiële bijdrage aan de kennisdoelstellingen is groot.

Een combinatie van golven en (getij)stroming bepaalt de netto sedimenttransporten en de morfologische ontwikkeling in deze zone. Echter, het is niet goed duidelijk wat de netto zandtransporten en de morfologische ontwikkeling in dit gebied zijn, welke onderliggende processen deze bepalen en wat de rol is van harde lagen in de bodem.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit rapport is het beschrijven en verklaren van de processen verantwoordelijk voor de morfologische ontwikkeling van het zuidelijk gedeelte van de Vlake van Raan.

Een beter begrip van de morfologische ontwikkeling en de onderliggende processen draagt bij aan het ontwerp van de pilotsuppletie, de kennisvragen en de benodigde monitoring en modellering om deze kennisvragen te beantwoorden.

1.3 Aanpak

Om deze doelstelling te bereiken, zijn de Rijkswaterstaat Vaklodingen data uit 1964 t/m 2020 geanalyseerd. De periode tussen twee opvolgende datasets varieert tussen de 2 en 6 jaar. Niet elke meting beslaat de gehele monding van het Schelde-estuarium.

Er is een overzicht van menselijke ingrepen in het gebied gemaakt om te bepalen welke rol met name baggeren en storten mogelijk hebben gespeeld in de morfologische ontwikkeling. Daarnaast is onderzocht in welke mate de opbouw van de ondergrond (i.e. moeilijk-erodeerbare lagen) de morfologische ontwikkeling bepaalt, en wat de invloed van de grootschalige/lange-termijn ontwikkeling is. Hierbij is ook de koppeling met de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde meegenomen. Ook is een Delft3D morfologisch model ingezet om de onderliggende hydrodynamische en zandtransportprocessen beter te begrijpen.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd. In Hoofdstuk 2 wordt de morfologische ontwikkeling van de Vlake van de Raan – zuid beschreven. Het betreft de huidige morfologie, de ontwikkeling tussen 1964-2020, de ondergrond en de lange-termijn ontwikkeling. Een overzicht van menselijke ingrepen wordt gegeven in Hoofdstuk 3, alsook een koppeling met de opgetreden

morfologische ontwikkelingen. Het gaat hierbij om de uitbreiding van de haven van Zeebrugge, vaargeulverdiepingen en vaargeulonderhoud (baggeren en storten). In Hoofdstuk 4 wordt de Delft3D modellering van de morfodynamica en onderliggende processen behandeld. De resultaten worden bediscussieerd in Hoofdstuk 5 en het rapport sluit af met conclusies en aanbevelingen.

2 Morfologische ontwikkeling

2.1 Huidige morfologie

De voorkeurszone voor de proefsuppletie Vlake van de Raan – Zuid (VvdR-Zuid) wordt afgebakend door de Nederlands-Belgische landsgrens in het westen, het deel van de VvdR ondieper dan NAP-5 m in het noorden, het begin van de ebschaar en de Geul van de Walvischstaart in het oosten en de Wielingen geul in het zuiden (Figure 2-1).

Aan de zuidkant van de Vlake van de Raan in de Schelde-monding loopt de geul genaamd Wielingen (#1 in Figure 2-1). Vanaf de grens met België heet deze geul Scheur (#2), met de aftakking Pas van het Zand (#3) richting de haven van Zeebrugge. De Wielingen is ongeveer 15 tot 20 m diep. De breedte, bij een dieptecontour van 15 m, varieert tussen ca. 1 km in het westen tot 2 km in het oosten. Juist ten oosten van de VvdR-Zuid takt de Geul van de Walvischstaart (#4) van de Wielingen af naar het noordwesten. De geul Spleet (#5) is in het westen aangesloten op de Scheur en eindigt in het oosten in een ondieper gebied die Spleet scheidt van de Geul van de Walvischstaart. De diepte van Spleet varieert ongeveer tussen de NAP-12 en -8 m. Tussen de Spleet en de Wielingen ligt een ebschaar (#6), in de zin dat deze aan de landwaartse kant open is en een ondiepte heeft aan de zeewaartse kant. Bij de aansluiting met de Wielingen in het oosten is deze meer dan 15 m diep. Tussen de Spleet, deze ebschaar en de Wielingen liggen twee relatief ondiepe banken met een diepte van circa NAP-7 tot -10 m die in het westen bij elkaar komen. Direct ten noorden van VvdR-Zuid ligt het ondiepste gedeelte van de VvdR (#7) met een diepte van ca. NAP-4 m. Ten zuiden van de Wielingen ligt de ondiepte Paardenmarkt (#8).

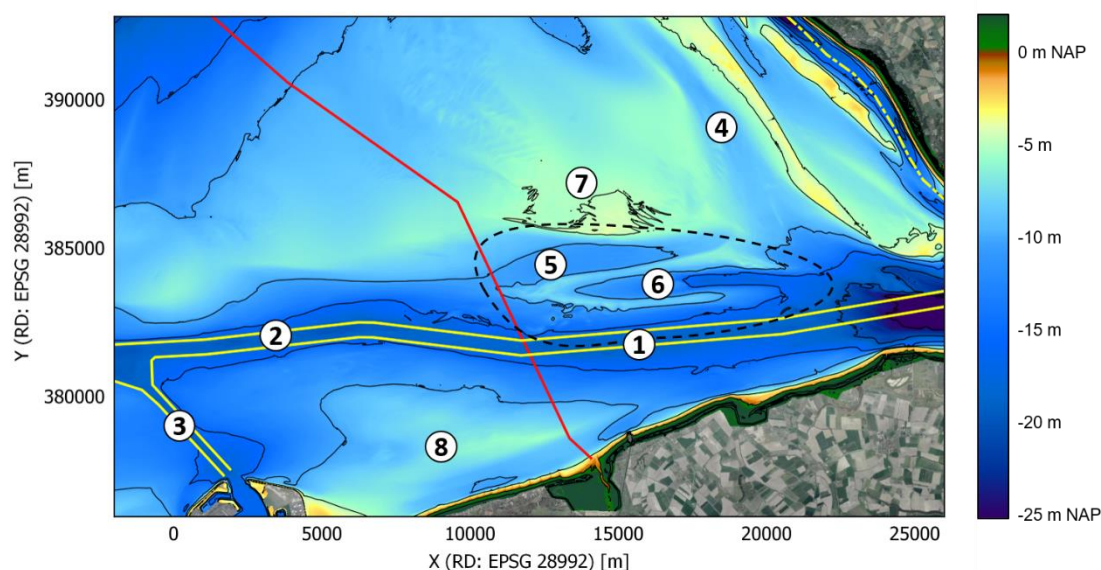


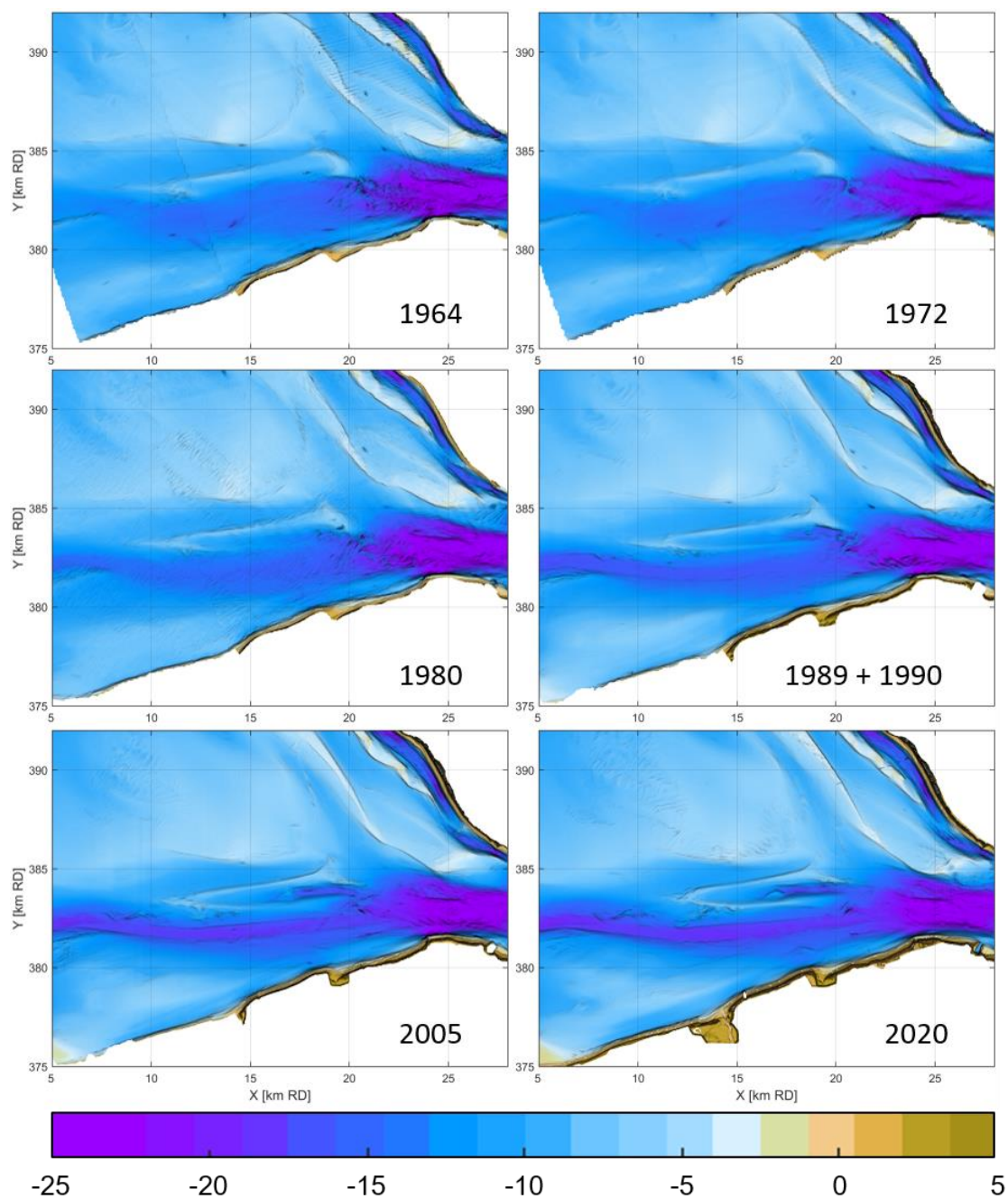
Figure 2-1 De belangrijkste geulen en platen in de omgeving van de voorkeurszone van de proefsuppletie (gestippelde zwarte lijn) weergegeven in de bodemligging van 2020. De rode lijn is de grens tussen Nederland en België en vaargeulen zijn weergegeven met gele lijnen. 1 = Wielingen, 2 = Scheur, 3 = Pas van het Zand, 4 = Geul van de Walvischstaart, 5 = Spleet, 6 = ebschaar, 7 = Vlake van de Raan, 8 = Paardenmarkt.

2.2 Morfologische ontwikkeling van 1964 tot 2020

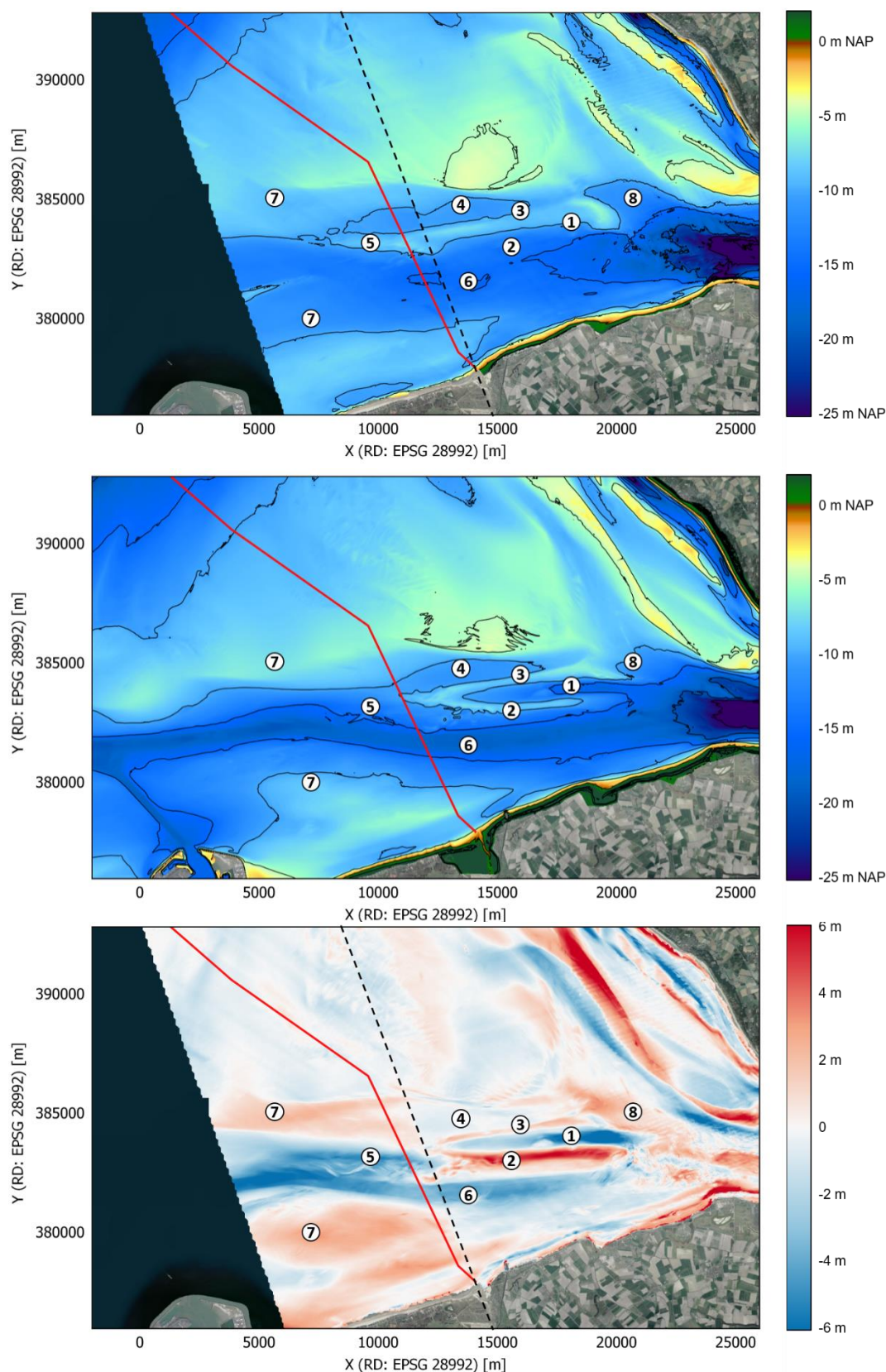
De morfologische ontwikkeling van de gehele Schelde-monding staat beschreven in Van der Werf et al. (2020), en referenties hierin.

De Vaklodingen data van de bodemligging in de Schelde-monding tussen 1964 en 2020 tonen de morfologische ontwikkeling van het interessegebied (Figuur 2-2). De veranderingen in bodemhoogte zijn te zien in Figuur 2-3. De belangrijkste ontwikkelingen zijn (zie Figuur 2-3):

1. Het ontstaan van de ebschaar tussen de Spleet en de Wielingen. De locatie waar nu de ebschaar ligt, was voorheen nog onderdeel van de (brede) Wielingen.
2. De ontwikkeling van een bank die de ebschaar en de Wielingen scheidt. Deze rug heeft zich vanuit het westen richting het oosten opgebouwd. De westzijde van de bank was al aanwezig in de bodemopname van 1964. Dat is de Bol van Knokke; die ligt daar zelfs al in 1800 en verplaatst inderdaad niet (zie ook paragraaf 2.4).
3. Een versmalling en verhoging van de ondiepte ten noorden van deze ebschaar.
4. De ligging van de Spleet is erg stabiel, er heeft in de loop van jaren alleen een kleine (~1 m) verdieping plaatsgevonden .
5. De Spleet is in de huidige bodemligging aan de westkant verbonden met de Scheur, doordat de tussenliggende ondiepte geërodeerd is.
6. De geulen van de Wielingen en de Scheur zijn verdiept.
7. Ten noorden en ten zuiden (Paardenmarkt) van de Scheur heeft sedimentatie plaatsgevonden.
8. Ten noordoosten van het begin van de ebschaar vond sedimentatie plaats. Dit is op de scheiding tussen de ebschaar en de Geul van de Walvischstaart.

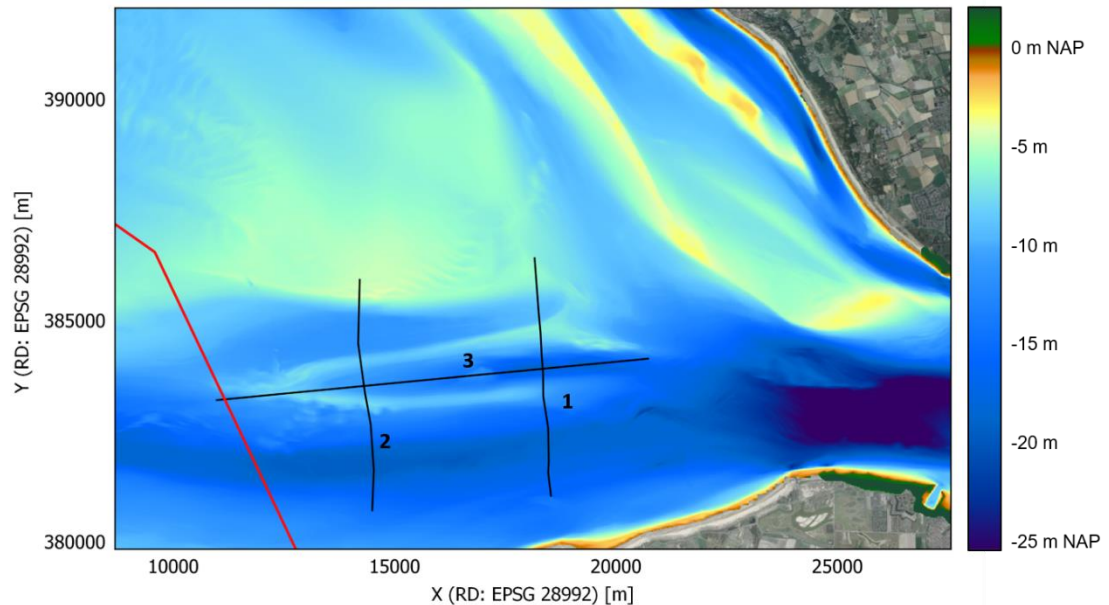


Figuur 2-2 Bodemligging [m NAP] in de Schelde-monding rond de zuidkant van de Vlake van de Raan op zes momenten tussen 1964 en 2020 op basis van Vaklodingen data.



Figuur 2-3 De bodemligging in 1964 (boven), in 2020 (midden) en de verandering in bodemhoogte tussen 1964 en 2020 (onder). Door een discontinuïteit in de bodemdata van 1964 van verschillende kaartbladen (zie Figuur 2-2) is er langs de zwarte stippellijn een discontinuïteit in de bodemverandering te zien. De rode lijn is de grens tussen Nederland en België. De nummers geven de belangrijkste ontwikkelingen aan, zoals beschreven in de tekst.

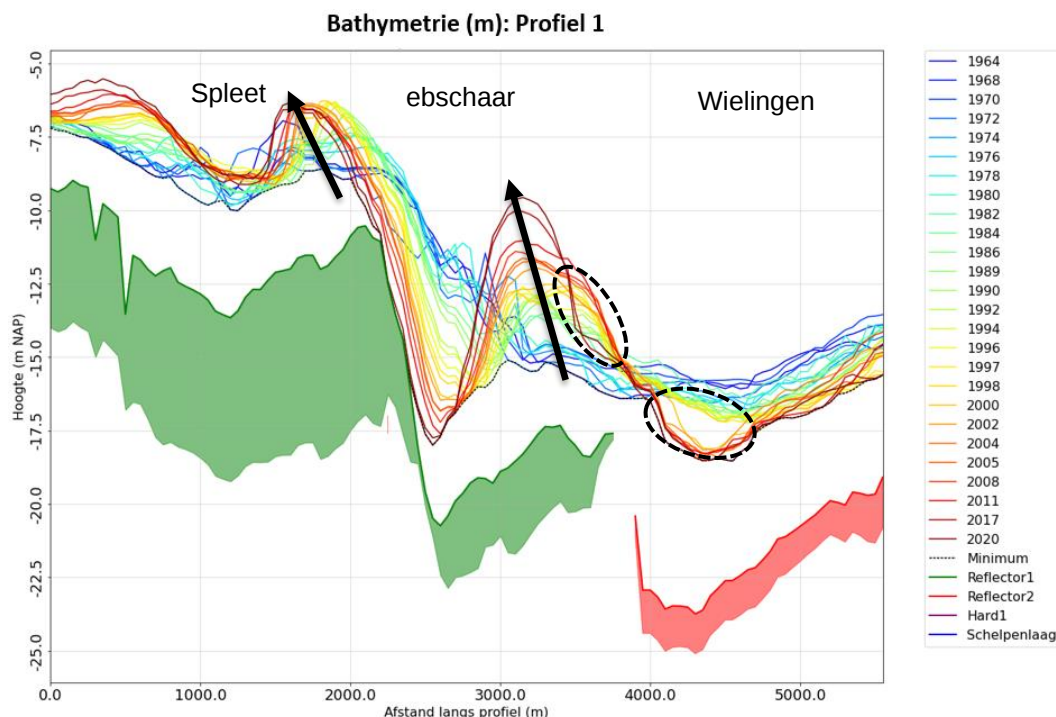
De morfologische ontwikkeling is in meer detail bekeken langs een aantal profielen die in het interessegebied getrokken zijn (zie voor de ligging Figuur 2-4). Deze figuren bevatten naast de bodemligging tussen 1964 en 2020 ook de omhullende lijn van de minimale bodemligging, en informatie over de ondergrond. De opbouw van de ondergrond en de interactie met de morfologische ontwikkeling worden besproken in paragraaf 2.3.



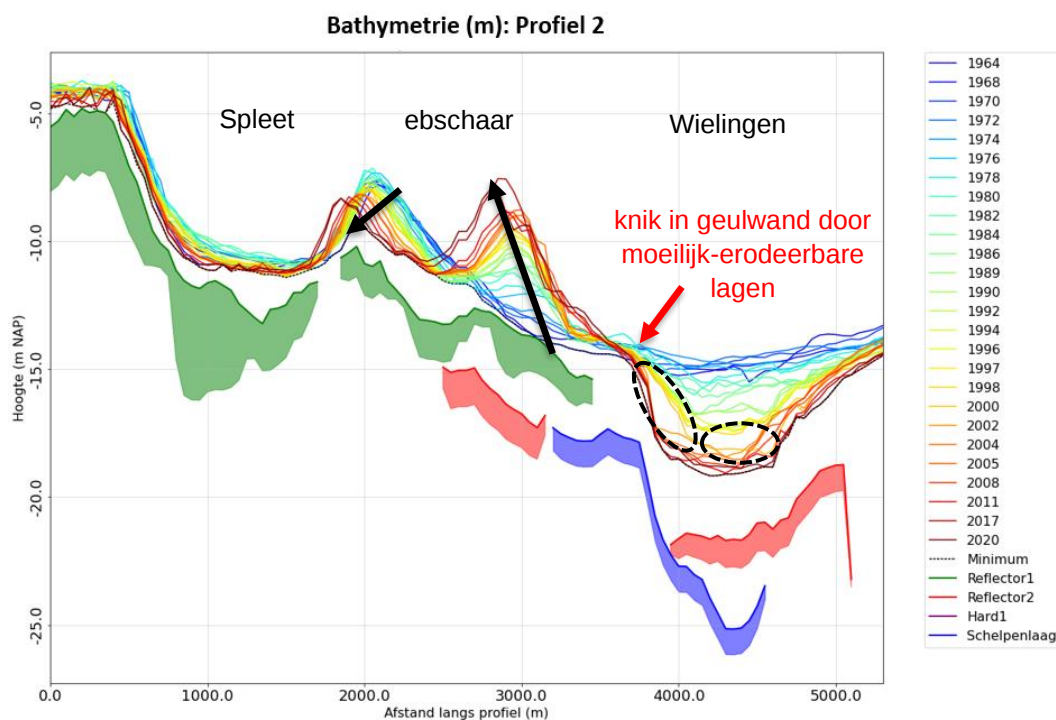
Figuur 2-4 Ligging van de profielen waar langs de morfologische ontwikkeling is gevisualiseerd. De kleurenschaal toont de bodemligging in 2020.

In deze figuren zijn de volgende morfologische ontwikkelingen zichtbaar:

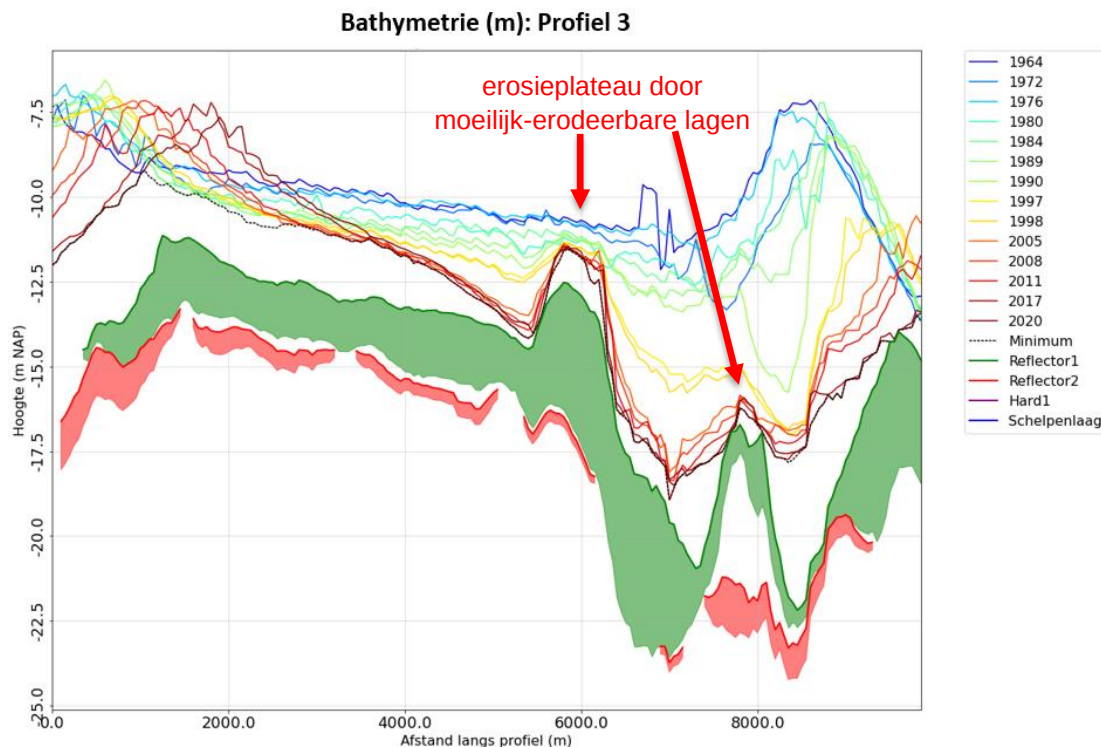
- Profiel 1 (Figuur 2-5). Deze doorsnijdt het diepste deel van de ebschaar. In 1964 is de Wielingen veel breder en ondieper dan in 2020. Vanaf ongeveer 1980 is de ebschaar aanwezig. Hierna vindt een continue verdieping en verplaatsing van deze ebschaar in noordelijke richting plaats. Dit gaat gepaard met de ontwikkeling, groei en noordelijke verplaatsing van ruggen die de ebschaar scheiden van de Wielingen in het zuiden en de Spleet in het noorden. De Wielingen is langs dit profiel een aantal meters dieper geworden. De abrupte overgang tussen de bodems in 1998 en 2000 is waarschijnlijk gekoppeld aan een aangelegde verdieping (zie paragraaf 3.3). Ook de verdieping van de noordelijk geulrand tussen 2011 en 2017 is het resultaat van baggerwerkzaamheden. De noordelijke rand van de Spleet ondervindt sedimentatie, en het midden van de Spleet is door de jaren heen ondieper geworden.
- Profiel 2 (Figuur 2-6). Deze doorsnijdt de uitstroom van de ebschaar op de achterliggende ondiepte. De morfologische ontwikkeling is vergelijkbaar met profiel 1. Het verschil met profiel 1 is dat de Spleet hier wat breder en dieper (~1 m) is geworden, en dat de rug tussen de Spleet en de ebschaar lager is geworden. De Spleet is hier dieper dan langs profiel 1, terwijl de ebschaar juist aanzienlijk ondieper ligt. De noordelijk wand van de Spleet en de noordelijk gelegen Vlake van de Raan zijn tamelijk stabiel.
- Profiel 3 (Figuur 2-7). Dit profiel loopt parallel aan de ebschaar. Hieruit blijkt de sterke erosie in het oosten die geleidelijk afneemt in westelijke richting, gekoppeld aan de ontwikkeling van de ebschaar. Aan de westkant van het profiel vindt achtereenvolgens erosie en sedimentatie plaats, waarschijnlijk gekoppeld aan het verplaatsen van deze ondiepte in oostelijke richting. Ongeveer in het midden van het profiel bevindt zich een plateau dat ontstaan is door erosie en de lokale aanwezigheid van moeilijk-erodeerbare lagen zie verder paragraaf 2.3.



Figuur 2-5 Morfologische ontwikkeling langs profiel 1. Het profiel loopt ongeveer van het noorden ($x = 0$ m) naar het zuiden. Minimum = omhullende lijn van de laagst opgetreden bodemligging. Reflectoren 1 en 2 zijn kleilagen, vermoedelijk in de Naaldwijk en/of Eem Formatie. Reflector 'hard 1' is een harde kleilaag uit het Tertiair die niet in het interessegebied voorkomt. De pijlen geven de ontwikkeling van de ruggen aan weerszijden van de ebschaar weer, en de ovalen veranderingen vermoedelijk door baggerwerkzaamheden.



Figuur 2-6 Morfologische ontwikkeling langs profiel 2. Het profiel loopt ongeveer van het noorden ($x = 0$ m) naar het zuiden. Minimum = omhullende lijn van de laagst opgetreden bodemligging. Reflectoren 1 en 2 zijn kleilagen, vermoedelijk in de Naaldwijk en/of Eem Formatie. Reflector 'hard 1' is een harde kleilaag uit het Tertiair die niet in het interessegebied voorkomt. De pijlen geven de ontwikkeling van de ruggen aan weerszijden van de ebschaar weer, en de ovalen veranderingen vermoedelijk door baggerwerkzaamheden.



Figuur 2-7 Morfologische ontwikkeling langs profiel 3. Het profiel loopt ongeveer van het westen ($x = 0$ m) naar het oosten. Minimum = omhullende lijn van de laagst opgetreden bodemligging. Reflectoren 1 en 2 zijn kleilagen, vermoedelijk in de Naaldwijk en/of Eem Formatie. Reflector 'hard 1' is een harde kleilaag uit het Tertiair die niet in het interessegebied voorkomt.

2.3 Ondergrond

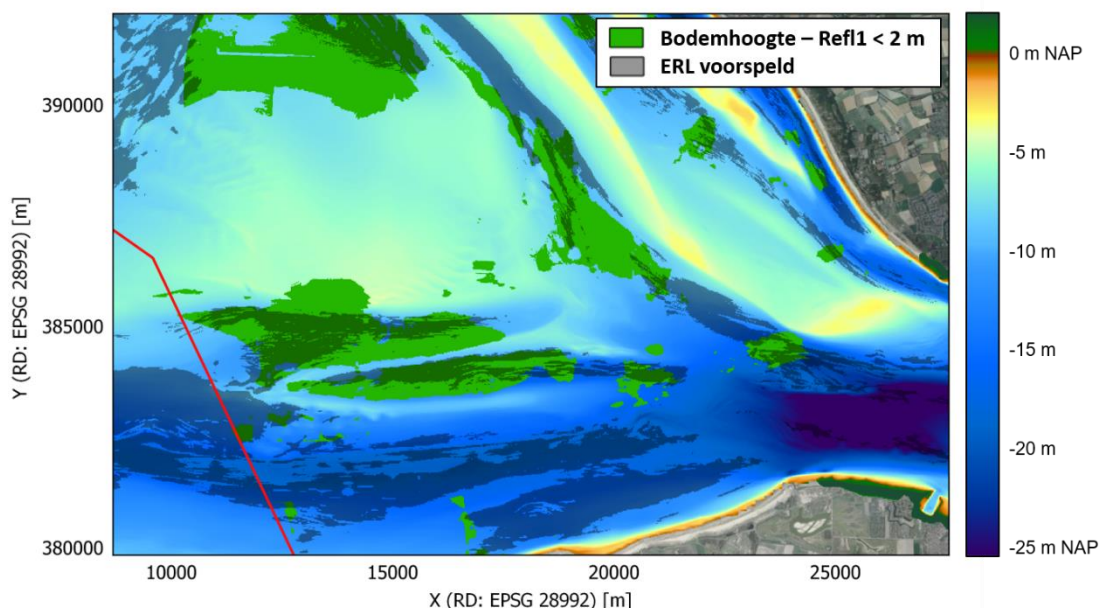
Van der Vegt et al. (2021) hebben aan de hand van seismiek, boringen en eerdere geologische modellen de moeilijk-erodeerbare ondergrondlagen in de Schelde-monding gekarteerd (Figuur 2-8). De reflectoren 1 en 2 zijn kleilagen, vermoedelijk in de Naaldwijk en/of Eem Formatie, terwijl reflector 'hard 1' een harde kleilaag is uit het Tertiair (ook wel bekend als Boomse Klei). Deze laag is verder naar het oosten, bij Vlissingen, te vinden. Reflector 1 komt in een groot gedeelte van het gebied VvdR-Zuid binnen 2 m van de bodem voor. Het voorkomen van deze laag correspondeert goed met de locaties waar een erosie-resistente laag wordt voorspeld op basis van de morfologie en de morfologische ontwikkeling ("ERL voorspeld", zie Figuur 2-8).

Overigens varieert de samenstelling van de kleilaag van plaats tot plaats waardoor het effect op de morfodynamiek niet overal gelijk is. De grenzen van erosiebestendige lagen zijn meestal graduueel. Een zandig pakket gaat lateraal geleidelijk over in een afwisseling van zand- en kleilagen en vervolgens in een overwegend kleiige afzetting. De erosiebestendigheid van de afzettingen neemt van zand naar klei toe. Dit zal tot uiting komen in de snelheid waarmee de verschillende afzettingen opgeruimd worden en dus in het morfodynamisch gedrag van met name geulen.

Uit de profielen blijkt de invloed van de ondergrond op de morfologische ontwikkeling:

- Profiel 2 (Figuur 2-5). Het vertragen van laterale migratie van de ebschaar na het in contact komen van de geulwand met de kleilaag.
- Profiel 4 (Figuur 2-6). De Spleet heeft in 1964 een U-vormig dwarsprofiel omdat de geul niet kan insnijden in de ondergrond. In de daaropvolgende jaren blijft de geul stabiel, ondanks het noordwaarts verplaatsen van bank tussen de geul en de ebschaar. De diepte neemt maximaal met 1 m toe.

- Profiel 4 (Figuur 2-6). Het vormen van een 'knik' in het profiel van de geulwand van de Wielingen bij ca. $x = 3500$ m.
- Profiel 7 (Figuur 2-7). Het ontstaan van een plateau in de ebschaar rondom $x = 6000$ m en $x = 8000$ m bij verdieping van het oostelijk deel van de geul.



Figuur 2-8 Bodemligging van de Schelde-monding in 2020 met hierin aangegeven locaties waar een moeilijk-erodeerbare kleilaag (reflector1) binnen 2 m van de bodem ligt (groene vlakken) en locaties waar op basis van morfologie en morfologische ontwikkeling een erosie-resistente laag voorspeld wordt (donkergrijze vlakken; "ERL voorspeld").

2.4 Lange-termijn morfologische ontwikkeling

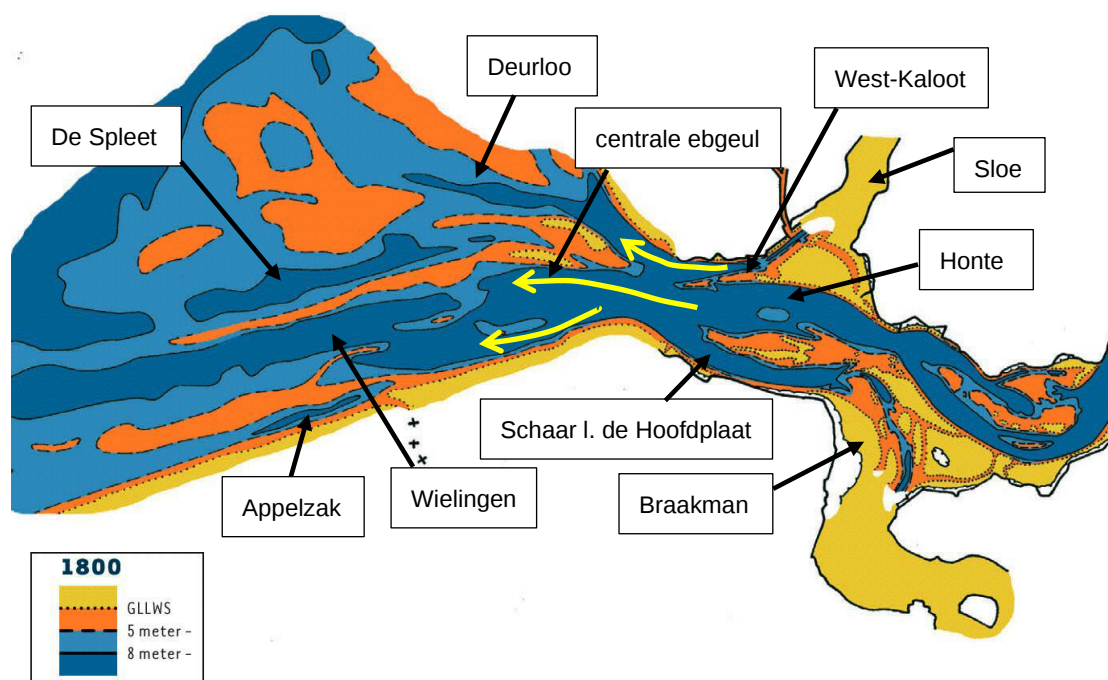
2.4.1 Schelde-monding

De eerste bruikbare morfologische kaart van de Schelde-monding dateert van rond 1800 (Figuur 2-9). Deze kaart is gebaseerd op nauwkeurige lodingen van zowel geulen als platen en toont het patroon van eb- en vloedscharen met daartussen ondiepe banken. Vanuit het zeegat, ter hoogte van de lijn Vlissingen-Breskens, lopen twee ebgeulen zeewaarts, een grote centrale ebgeul en een geul langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen. Vanuit Het Sloe loopt een derde ebgeul direct onder de kust van Walcheren bij Vlissingen. Deze geul wordt door de ondiepe plaat West-Kaloot vrijwel geheel gescheiden van de centrale ebgeul en splitst verder naar het noordwesten in de geulen Deurloo en Oostgat. Dit betekent dat het noordelijk deel van het mondingsgebied gekoppeld is aan Het Sloe en het zuidelijk deel aan de geulen Honte en Schaar langs de Hoofdplaat in het estuarium.

In het zuidelijke deel van de monding lopen er drie vloedgeulen richting het zeegat, de Wielingen, de Spleet ten noorden daarvan en de Appelzak langs de Vlaamse kust. De vloedgeulen worden van elkaar gescheiden door langgerekte aaneengesloten zandbanken. Daar waar eb- en vloedgeulen elkaar ontmoeten ontstaat een typische interactie waarbij de geulen elkaar vermijden en drempels vormen. Er is geen sprake van één doorlopende geul richting het zeegat tussen Vlissingen en Breskens.

Na 1800 breiden de geulen zich verder uit, de ebgeulen zeewaarts, de vloedgeulen landwaarts (Figuur 2-10, Figuur 2-11). De interactie van de eb- en vloedgeulen bepaalt in belangrijke mate de ontwikkeling van de monding. De centrale ebgeul breidt zich uit naar het westen, waardoor

De Spleet en de bank Walvischstaart naar het noorden worden gedwongen en de Wielingen naar het zuiden (situatie 1842 en 1865, Figuur 2-10). De tussenliggende ondiepe banken schuiven mee. De ebgeul onder de kust van Walcheren verliest zijn (unieke) connectie met Het Sloe door het verdwijnen van de uitloper van de plaat Kaloot, waardoor er een verbinding ontstaat met de Honte. Door de vorming en uitgroei van de Nolleplaat vanaf de oever van Vlissingen, wordt deze geul afgesloten met een drempel (situatie 1865, 1907-08).

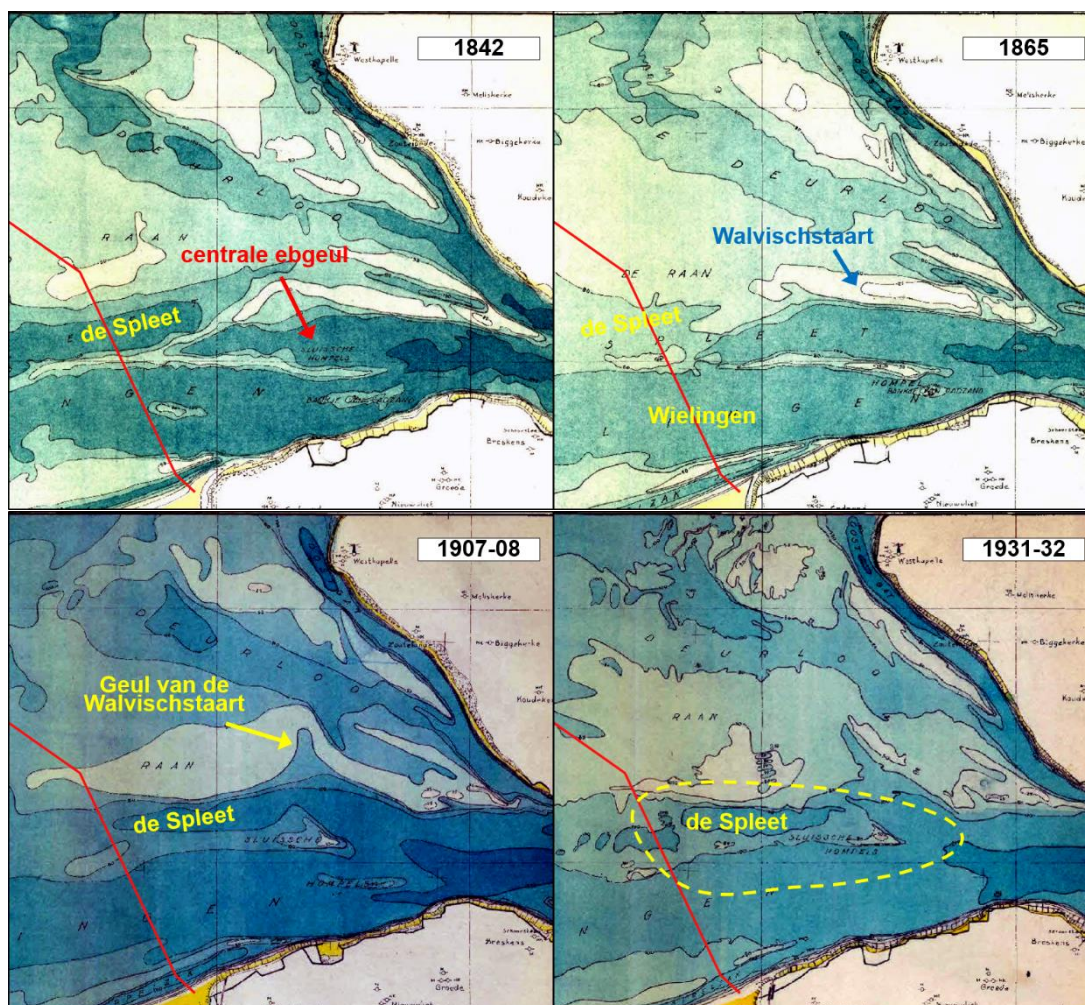


Figuur 2-9 Het westelijk deel van de Westerschelde en de monding in ca. 1800. De dieptelijnen GLLWS, -5m en -8m zijn weergegeven. De gele gebieden vallen droog bij laag laagwater, de oranje gebieden zijn ondiepe banken. De geulen dieper dan 8 m zijn met donkerblauw aangegeven. De gele pijlen geven de ebscharen op de overgang van estuarium naar monding aan. (Bron bathymetrie: Peters, 2013).

In 1865 blijkt De Spleet flink ondieper en loopt dood op de ondiepte van de Raan (Figuur 2.10). De langgerekte zandbank tussen de Wielingen en De Spleet is dan doorsneden door de uitbreidende centrale ebgeul en een nieuwe ebschaar tussen de Bollen van Heijst en Knokke. Deze ebschaar zal de drempel tussen de bollen steeds dieper uitschuren en neemt het zeewaartse deel van De Spleet over. Eind 19^e eeuw wordt deze geul Het Scheur genoemd. De naam Spleet wordt vanaf dat moment alleen nog gebruikt voor het oostelijk deel dat verbonden is met de dan afgenomen centrale ebgeul. Rond 1900 lijkt de Wielingen een ebgedomineerde geul geworden te zijn die daarna alleen maar breder en dieper wordt. Hetzelfde geldt voor Het Scheur. Vanuit de afnemende centrale ebgeul vormt zich een nieuwe geul door de bank Walvischstaart naar het noorden: de Geul van de Walvischstaart. De vorming van de Geul van de Walvischstaart lijkt een reactie op het afsluiten van de geul voor Vlissingen door het vastgroeien van de Nolleplaat aan de Walvischstaart/Elleboog (Figuur 2-10; 1865, 1907-08).

Rond 1930 is de Wielingen een brede, diepe geul waaruit de ondiepe zandbanken vrijwel verdwenen zijn. Het Scheur is eveneens een diepe geul zonder uitgesproken eb- of vloedsekschaarkarakter geworden (Figuur 2-10, Figuur 2-11). 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 raakt De Spleet aan zijn landwaartse zijde afgesloten door uitbreiding van de Sluissche Hompels en verondiept aanzienlijk. De drempel tussen

Wielingen en Het Scheur wordt tussen de Bol van Heijst en de Bol van Knokke weggebaggerd, waardoor Het Scheur onderdeel van de vaarweg naar Vlissingen wordt.

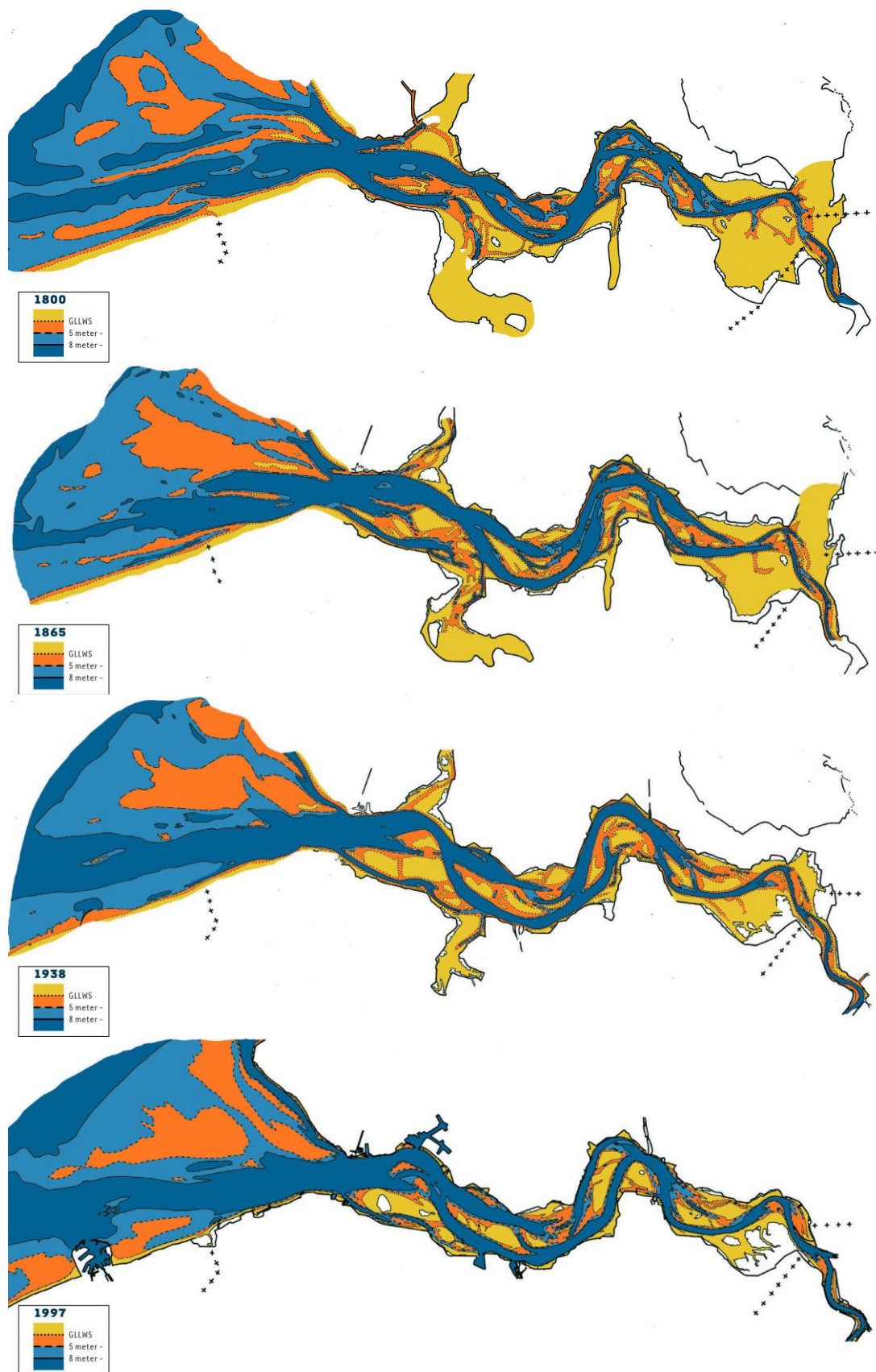


Figuur 2-10 De ontwikkeling van geulen en platen in het oostelijk deel van de Westerscheldemonding tussen 1842 en 1931-1932. De afgebeelde kaarten zijn van 1842, 1865, 1907-1908 en 1931-1932. Zie tekst voor beschrijving van de veranderingen. De locatie van het interessegebied is aangegeven in de kaart van 1931-32. De rode lijn is de grens tussen Nederland en België (bron bathymetrie: Rijkswaterstaat, zonder jaar).

2.4.2 Samenhang lange-termijn ontwikkelingen monding en Westerschelde

Zoals al geconstateerd werd in het 'kennisoverzicht morfologie en ecologie' (Van der Werf et al., 2020b; zie paragraaf 2.2.5 en 2.2.6 aldaar) hangen de langjarige ontwikkelingen in de Schelde-monding samen met de langjarige morfologische ontwikkelingen in het estuarium.

De belangrijkste lange-termijn ontwikkeling in de Westerschelde vanaf de 17^e eeuw is de verlandings van zijtakken als Sloe en Braakman. Opslibbing van schorren tot boven gemiddeld hoogwater maakt bedijking en daarmee terugwinning van het in eerdere eeuwen verloren land mogelijk. Het effect van de verlandings van de zijtakken op de waterbeweging en morfodynamiek van het estuarium en de monding is eerder onderzocht (zie Van der Spek, 1997a en 1997b, Brand, 2016 en Nnafie et al., 2018, 2019) maar een integrale analyse heeft nog niet plaatsgevonden en een definitief antwoord ontbreekt nog.



Figuur 2-11 Morfologie van de Westerschelde en zijn mondingsgebied in de jaren 1800, 1865, 1938 en 1997. De dieptelijnen GLLWS, -5m en -8m zijn weergegeven. De gele gebieden vallen droog bij laag laagwater, de oranje gebieden zijn ondiepe banken. De geulen dieper dan 8 m zijn met donkerblauw aangegeven. (Bron: Peters, 2013).

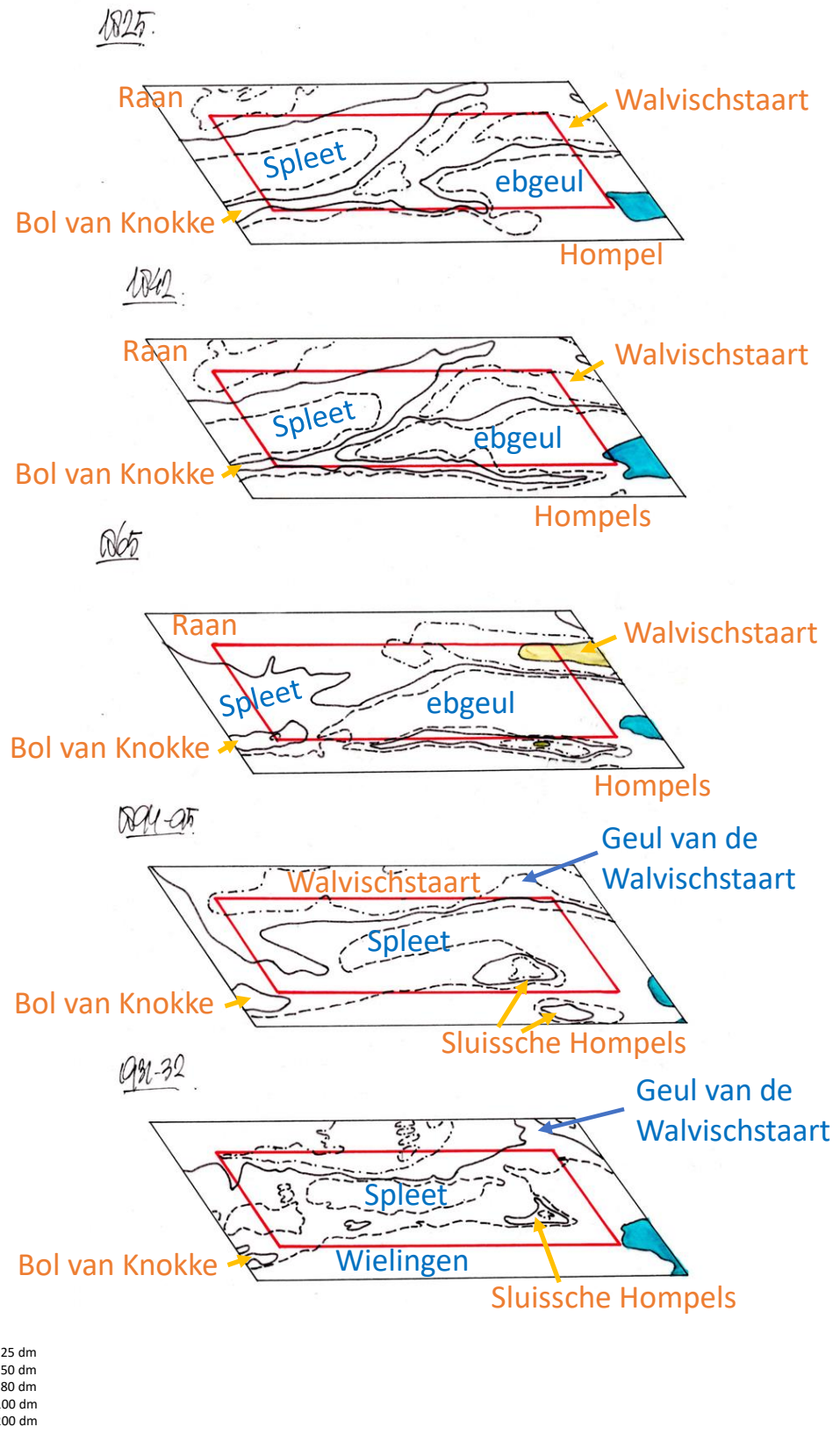
Rond 1800 is de situatie in het westelijk deel van de Westerschelde als volgt (Figuur 2-9, Figuur 2-11): tussen Vlissingen en Breskens liggen drie vloedgeulen: een geul die langs Vlissingen rechtstreeks naar het Sloe loopt en door de plaat West-Kaloet vrijwel geheel afgescheiden is van de rest van de monding, de schaar Vaarwater langs de Hoofdplaat onder de kust van Zeeuws-Vlaanderen en een centrale vloedgeul die eindigt in de platen bij Ellewoutsdijk. De ebgeul Pas van Terneuzen komt zijdelings hierin uit. Het Vaarwater langs de Hoofdplaat loopt naar de Braakman en wordt van andere geulen gescheiden door een uitgestrekt bankengebied. Met het afnemen van het debiet van het Vaarwater langs de Hoofdplaat ten gevolge van de verlanding van de Braakman, neemt dit bankengebied in omvang af waardoor de Pas van Terneuzen kan uitbochten en stroomafwaarts migreren. Ook de Honte gaat verder uitbochten naar het noorden, waarbij de bank Kaloet opgeruimd wordt en het Sloe zijn eigen geul naar de monding verliest. Het belang van de Honte als geul in het zeegat neemt hierdoor toe. Door de uitbochting van de Honte is de ebstroom in deze geul meer zuidelijk gericht. Dit lijkt de oorzaak te zijn van het ontstaan en ontwikkelen van de centrale ebgeul in het oostelijk deel van de monding die de heroriëntatie van geulen en banken ingang zet.

2.4.3 Vlake van de Raan - zuid

De hierboven beschreven ontwikkelingen sinds 1800 zien we ook in het de voorkeurszone Vlake van de Raan – zuid terug. De Raan, de ondiepe zuidelijke rand van de Vlake van de Raan, vormt de noordelijke grens van dit gebied. De Wielingen ligt pal ten zuiden van het gebied. Zandbanken omgeven het gebied, de Walvischstaart in het noordoosten, de Sluissche Hompels in het zuidoosten en de Bol van Knokke in het zuidwesten. Het uitbreiden van de centrale ebgeul en de gevolgen daarvan voor De Spleet spelen zich binnen de grenzen van het gebied af.

In 1825 is de situatie als volgt (Figuur 2-12): De Spleet bevindt zich in het noordwestelijk deel van het gebied, de centrale ebgeul in het oostelijk deel. De geulen worden gescheiden door een langgerekte zandbank die de Bol van Knokke verbindt met de Walvischstaart. In de daaropvolgende decennia breidt de centrale ebgeul naar het westen uit en schuift eveneens naar het noorden op. De drempel tussen de geulen verschuift hierdoor naar het westen en verdiept. Met de noordelijke verplaatsing van de centrale ebgeul schuiven de Sluissche Hompels aan de zuidkant het gebied in.

Aan het einde van de 19^e eeuw (opname 1894-1895), ontstaat de Geul van de Walvischstaart bij de noordoosthoek van het gebied. Met de uitbreiding van de Geul van de Walvischstaart in de volgende decennia neemt de centrale ebgeul in betekenis af, de Geul van de Walvischstaart lijkt zich te ontwikkelen ten koste van de centrale ebgeul. Tegelijk met de afname van de centrale ebgeul schuiven de Sluissche Hompels naar het noorden (waardoor de zuidrand van het gebied in de Wielingen komt te liggen) en breiden verder naar het noorden uit waardoor ze de centrale ebgeul afsluiten. De restgeul, met drempels aan weerszijden wordt nu De Spleet genoemd. Tussen ca. 1930 en 1964 verandert de situatie in het gebied niet veel meer. De zandbank in het zuidelijke deel wordt wat ondieper.



Figuur 2-12 Morfologische ontwikkeling van de geulen en zandbanken in het voorkeurszone voor de pilotsuppletie, Vlakte van de Raan - zuid (rood kader) en directe omgeving in de Westerscheldemonding tussen 1825 en 1931-32. Weergegeven zijn de dieptelijnen van -25 dm, -50 dm, -80 dm, -100 dm en -200 dm, allen t.o.v. NAP. De locatie van de voorkeurszone is aangegeven in Figuur 2.10. Dieptelijnen overgenomen uit Rijkswaterstaat (zonder jaar).

3 Menselijke ingrepen

3.1 Inleiding

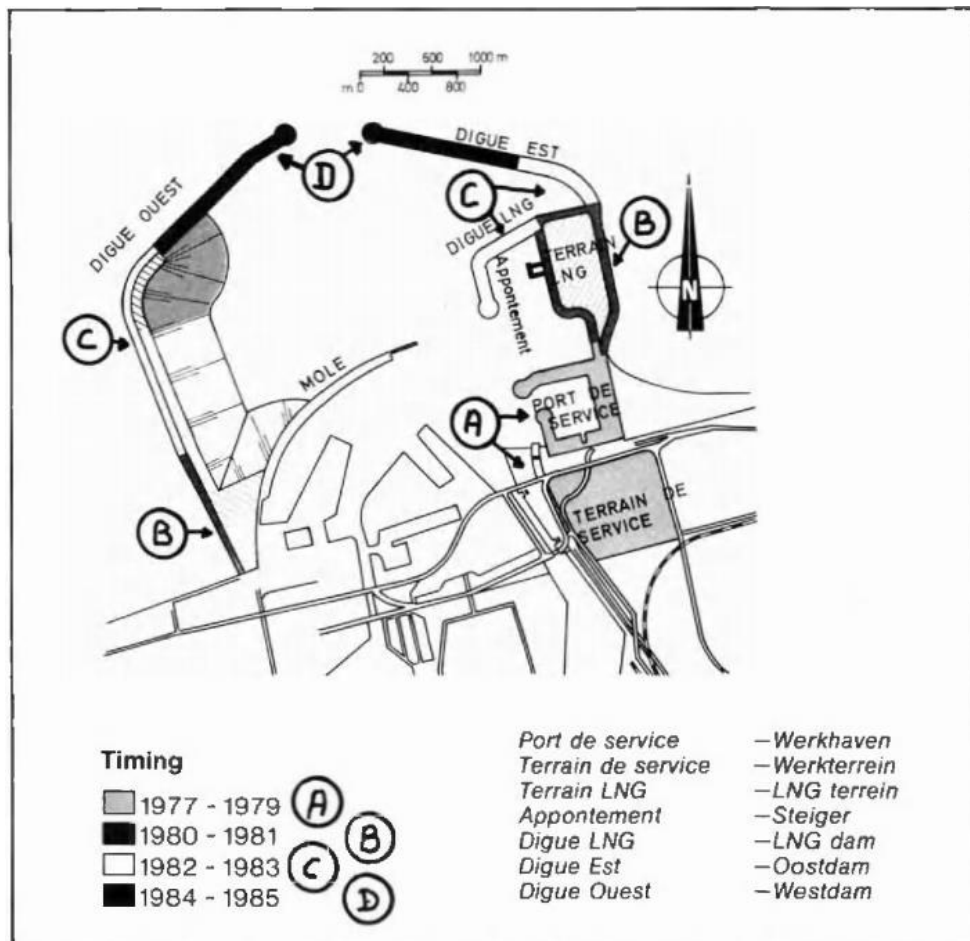
Al eeuwen vinden er menselijk ingrepen in de Schelde-monding plaats. Vooral sinds circa 1970 hebben er vele ingrepen plaatsgevonden om de scheepvaart naar Zeebrugge en door de Westerschelde naar Antwerpen te bevorderen. In de omgeving van het interessegebied VvdR–Zuid gaat het dan met name om:

1. Uitbreiding van de haven van Zeebrugge.
2. Verdiepingen van de vaargeulen.
3. Onderhoud van deze vaargeulen, en het storten van de baggerspecie.

Deze worden hieronder kort besproken. In paragraaf 3.5 worden deze gerelateerd aan de eerder beschreven morfologische ontwikkelingen.

3.2 Uitbreiding van de haven van Zeebrugge

Tussen 1977 en 1985 is de haven van Zeebrugge aanzienlijk uitgebreid in zeewaartse richting (Figuur 3-1). Door de aanleg van de nieuwe dokken en dammen steekt de haven ongeveer 2 km verder in zee. Hierna is de configuratie niet wezenlijk meer veranderd.



Figuur 3-1 Ontwerp algemeen liggingplan van de nieuwe buitenhaven van Zeebrugge. Figuur afkomstig uit Excavator (1985).

3.3 Verdiepingen

Veranderingen in streefdieptes duiden op een verdieping. Tabel 3.1 geeft de streefdieptes tussen 1984 en 2014 voor de vaargeulen in het Scheur ten oosten van de Pas het Zand en de Wielingen op basis van Vroom & Schrijvershof (2014). Hierbij zijn de verschillende referentievlakken omgerekend naar NAP: GLLWS (Gemiddeld Laag LaagWater bij Springtij) = 2,45 m onder NAP en LAT (*Lowest Astronomical Tide*) = 2,56 m onder NAP voor deze zone. Voor een aantal periodes is geen streefdiepte bekend, of werd geen diepte onderhouden.

Tabel 3.1 Streefdieptes in de vaargeulen Scheur en Wielingen op basis van de getallen gerapporteerd in Vroom & Schrijvershof (2014).

Periode	Streefdiepte Scheur [m NAP]	Streefdiepte Wielingen [m NAP]
1984-1988	Niet onderhouden	Niet bekend
1988-1999	-16,2	Niet bekend
1999-2000	-17,7	-17,5
2000-2005	-17,7	-17,5
2005-heden	-18,0	-17,5

De streefdieptes in het Scheur zijn eind jaren 1990 met 1,5 m verhoogd, waarna deze nauwelijks aangepast zijn. De streefdieptes in de Wielingen van voor 1999 zijn niet bekend; daarna zijn deze niet veranderd.

In 2018 is aan de noordkant van de vaargeul in de Wielingen een 180 m brede verdieping, met een diepte van LAT-15,5 m oftewel ca. NAP-18,1, aangebracht ten behoeve van scheepvaart richting Sloehaven; de zogeheten maatwerkgeul. Het sediment, ca. 0,6 M m³, is teruggestort in een stroomopwaarts gelegen diep deel van de Wielingen.

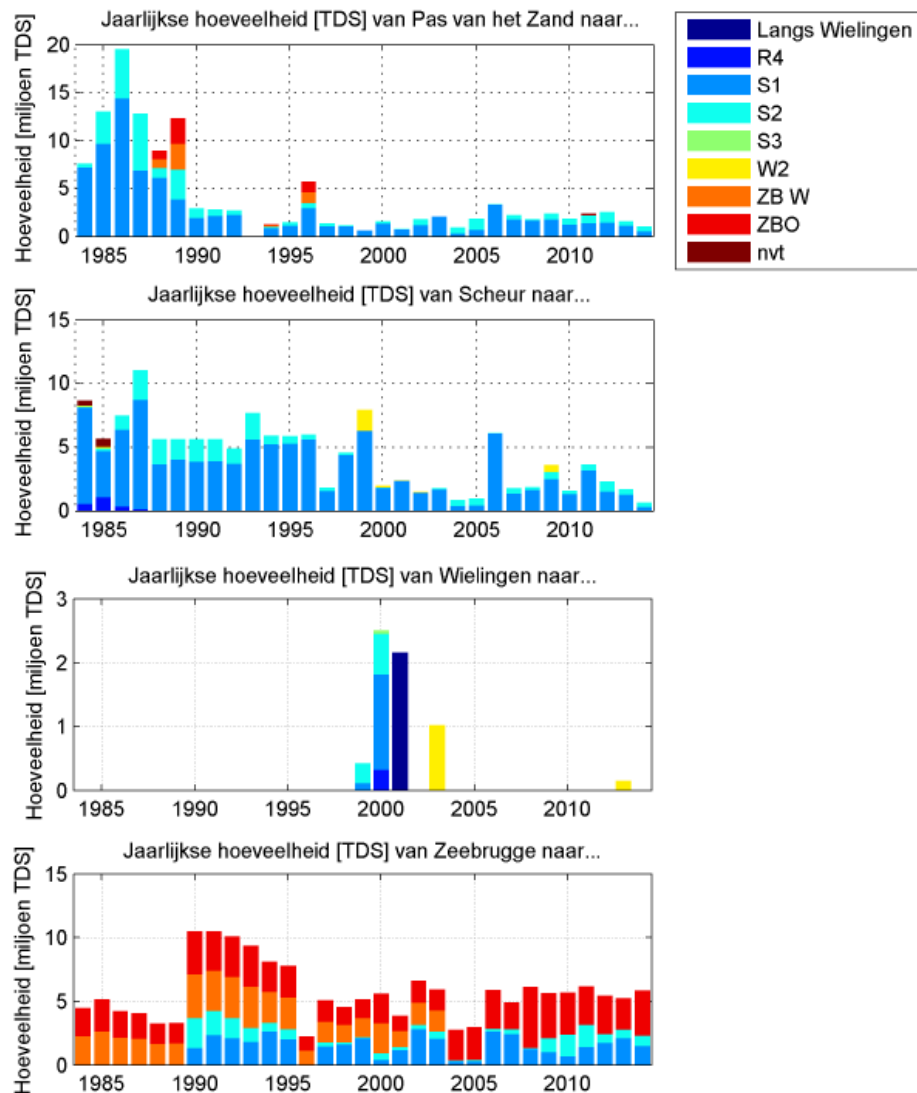
3.4 Vaargeul onderhoud: baggeren en storten

Het is belangrijk te realiseren dat de vaargeul een gedeelte van de getijgeul betreft. Enkel dit ~500 m brede gedeelte van de Scheur en Wielingen (zie Figure 2-1) wordt op diepte gehouden.

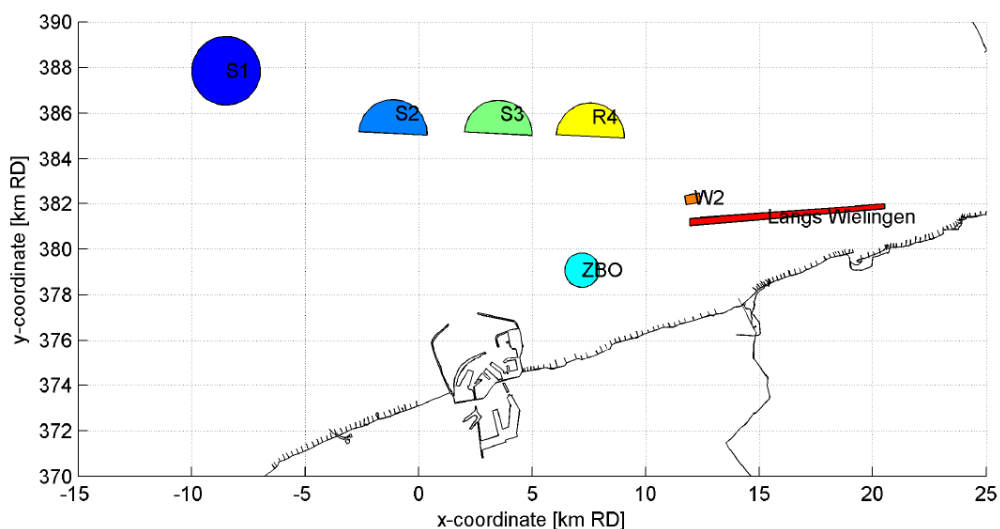
Figuur 3-2 toont de hoeveelheden gebaggerd sediment voor de Pas van het Zand, het Scheur, de Wielingen en de haven van Zeebrugge voor de periode 1984-2014. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de stortlocaties (zie Figuur 3-3). De baggerhoeveelheden zijn uitgedrukt in TDS (Ton Droge Stof). Vroom & Schrijvershof (2014) hanteerden een factor 0,94 om beunkuubs in TDS om te rekenen, i.e. 1 m³ = 0,94 TDS. Dit correspondeert met een natte bulkdichtheid van 1600 kg/m³ en een porositeit van 0,65 passend bij de overgang van zandhoudende naar slibrijke baggerspecie.

Uit deze figuur blijkt dat er in de Wielingen relatief weinig en infrequent gebaggerd is. Er is gemiddeld 0,2 miljoen TDS/jaar gebaggerd, waarvan het grootste deel in 2000 en 2001. Dit is een orde van grootte kleiner dan de baggerhoeveelheden in de andere vaargeulen: Scheur 4,3 miljoen TDS/jaar, Pas van het Zand 4,0 miljoen TDS/jaar en Zeebrugge 5,7 miljoen TDS/jaar. In de Wielingen is in 2016 45 k m³ gebaggerd. Hierna niet meer, ook niet in de maatwerkgeul.

Het grootste gedeelte van de specie is gestort in stortvak S1 (7,5 miljoen TDS/jaar) ten noordwesten van de haven van Zeebrugge. Daarnaast zijn er aanzienlijke hoeveelheden sediment gestort bij locatie ZBO, ook wel Paardenmarkt genoemd, (2,6 miljoen TDS/jaar) en stortvak S2 (2,3 miljoen TDS/jaar). De stortvakken in de buurt van VvdR-Zuid (W2 en "Langs Wielingen"), zijn voornamelijk gebruikt voor het storten van specie uit de Wielingen: 1,8 miljoen TDS in 2000, 2,2 miljoen TDS in 2001 en 1,0 miljoen TDS in 2003.

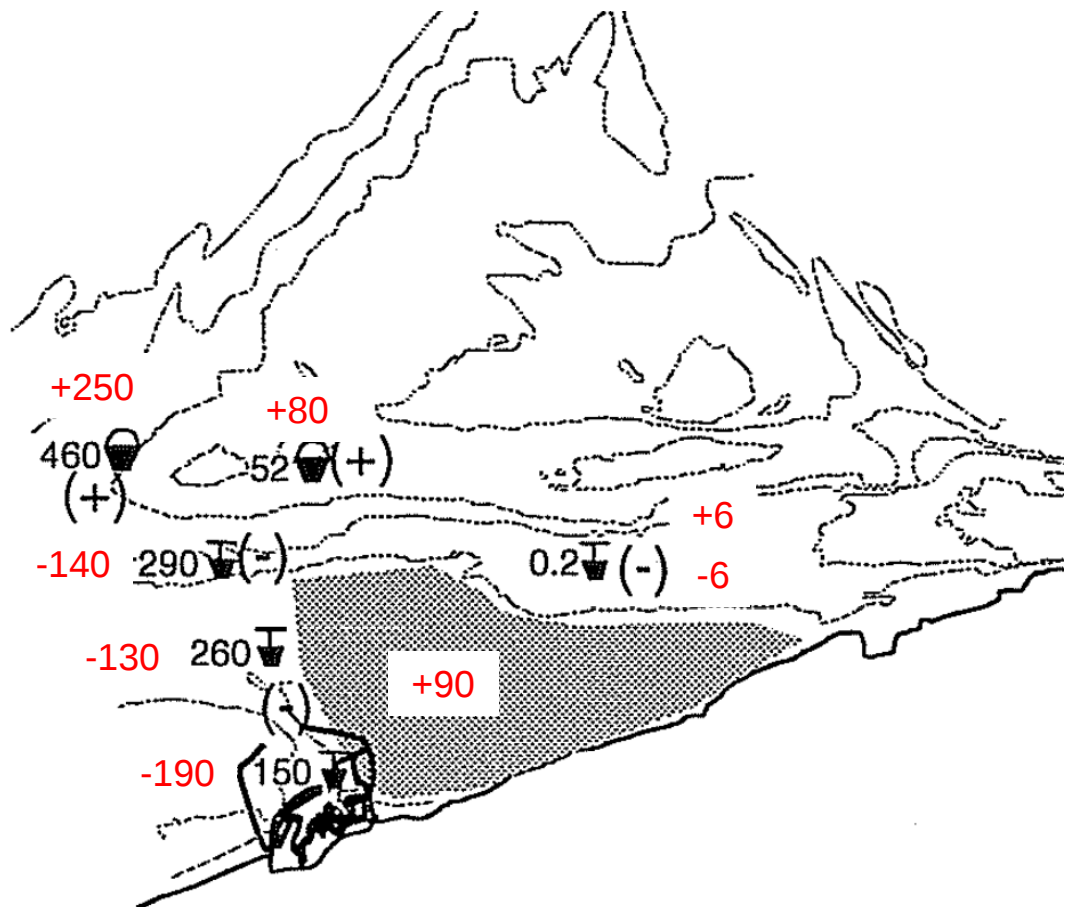


Figuur 3-2 Gebaggerde hoeveelheden sediment uitgesplitst naar stortlocatie (zie Figuur 3-3) in ton droge stof (TDS). Figuur afkomstig uit Vroom & Schrijvershof (2014).



Figuur 3-3 Stortlocaties voor baggerspecie uit de vaargeulen in de Schelde-monding. Figuur afkomstig uit Vroom & Schrijvershof (2014). De ligging van stortvak ZBW is niet bekend.

Deze ruimtelijke verdeling van bagger- en stortspecie is niet wezenlijk anders dan beschreven door Van der Slikke (1999) voor de periode 1960 t/m 1996 (Figuur 3-4). Het rode getal ten noordwesten van de haven van Zeebrugge betreft stortingen in stortvak S1 gedurende de periode 1984-2014, en het rode getal ten noorden van de haven van Zeebrugge de som van stortingen in S2, S3 en R4. De grootste hoeveelheden werden gebaggerd in het Scheur, de Pas van het Zand en de haven van Zeebrugge; ten noordwesten van Zeebrugge werd het meeste sediment gestort.



Figuur 3-4 Totale bagger- (minteken) en storthoeveelheden (plusteken) over de periode 1960 t/m 1996 in [miljoen m³]. Figuur afkomstig uit Van der Slikke (1999). De rode getallen zijn gebaseerd op stortgegevens voor de periode 1984-2014. De stortingen rondom de Wielingen vonden zowel ten noorden (stortvak W2) als ten zuiden ervan plaats (stortvak Langs Wielingen).

3.5 Koppeling met morfologische ontwikkelingen

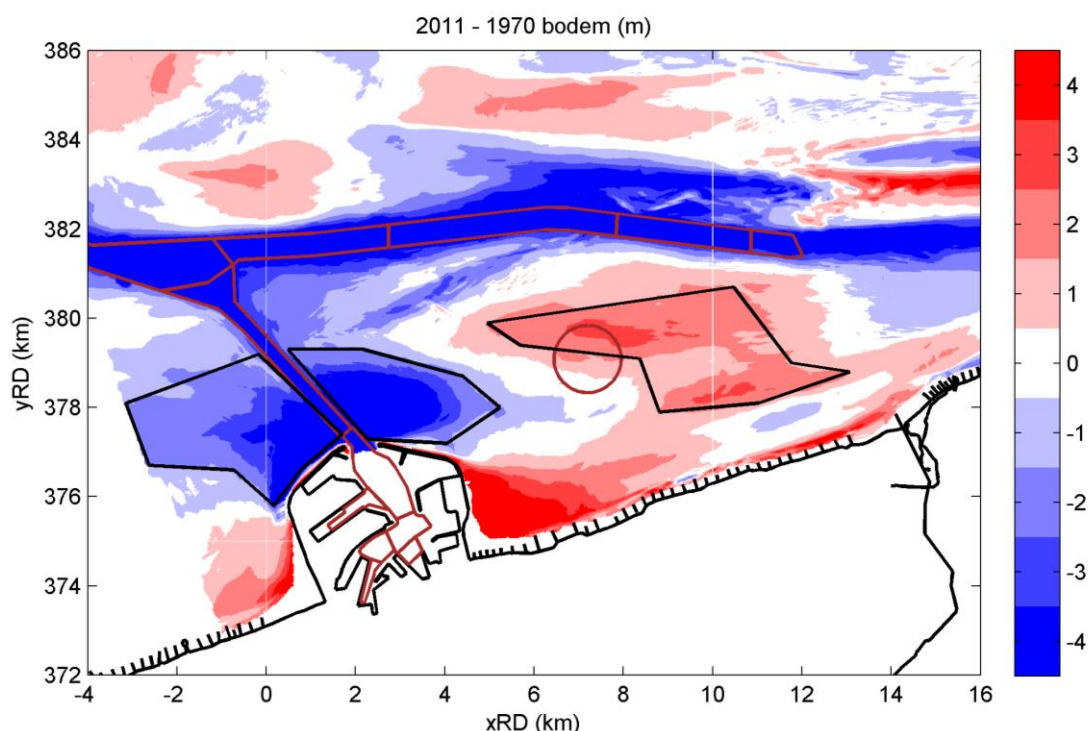
De bagger- en stortvolumes in het gebied Vlakte van de Raan - zuid zijn relatief klein. Het baggeren vindt vooral plaats in de vaargeulen Scheur en Pas van het Zand, niet zozeer in de Wielingen zelf. Het grootste gedeelte van dit sediment wordt gestort in de stortvakken ten noorden c.q. noordwesten van Zeebrugge (met name vakken S1 en S2, zie Figuur 3-3 en Figuur 3-4) op 10-20 km afstand van het gebied VvdR-Zuid of bij de Paardenmarkt aan de andere kant van de Wielingen. Deze stortingen hebben geleid tot een verhoging van de bodem in de nabijheid van de stortlocaties (zie Figuur 2-3 en Figuur 3-5).

Desondanks zijn de verbreding en de verdieping van de Wielingen duidelijk terug te zien in de morfologische ontwikkelingen (zie Figuur 2-5, Figuur 2-6 en Figuur 3-5). Dit betreft zowel een abrupte overgang in diepte van jaar tot jaar door menselijke ingrepen ter plekke, en een meer geleidelijke lang-termijn termijn verdieping. Deze laatste is op een meer indirecte manier

gekoppeld aan menselijk ingrepen. De Scheur is namelijk wel op grootschalige wijze gebaggerd, wat er mede voor gezorgd heeft dat de Wielingen dieper is geworden. Een smal deel van de Scheur en Wielingen is op diepte gebracht en wordt onderhouden ten behoeve van de scheepvaart. Dit heeft ervoor gezorgd dat ook de oevers van de geul dieper zijn komen te liggen door onder andere hellingseffecten (zie ook Van der Slikke, 1999).

De stortingen in het stortvak ten noorden van de Wielingen (w2) zijn met in totaal 4 miljoen m³ in periode 1984-2014 klein in vergelijking met de opgetreden sedimentatie (zie Figuur 2-3). En bovendien werd het leeuwendeel van dit volume gestort in 1999 en 2003, terwijl de sedimentatie van in dit gebied al veel langer optrad.

De zeewaartse uitbreiding van de haven van Zeebrugge, gereed gekomen in 1985, heeft vooral geleid tot de uitschuring direct ten noorden van de havendammen en sedimentatie in de "oksels" van de haven, en mogelijk sedimentatie van de Paardenmarkt versterkt (Figuur 3-5; zie ook De Maerschalck et al., 2017)



Figuur 3-5 Verschilbodemp Paardenmarkt en omgeving, 2011-1970. Bruine polygonen: vaarpassen en stortvak Zeebrugge-Oost. Figuur afkomstig uit De Maerschalck et al. (2017).

De haven van Zeebrugge ligt te ver weg (~10-15 km) en wordt gescheiden van de VvdR-Zuid door de Wielingen om een sterk effect te hebben op het interessegebied. Dit is in lijn met de conclusie van der Slikke (1999): 'de gevolgen van de uitbreiding van de haven van Zeebrugge zijn lokaal en strekken zich in oostelijke richting uit tot ongeveer aan de Nederlandse grens'.

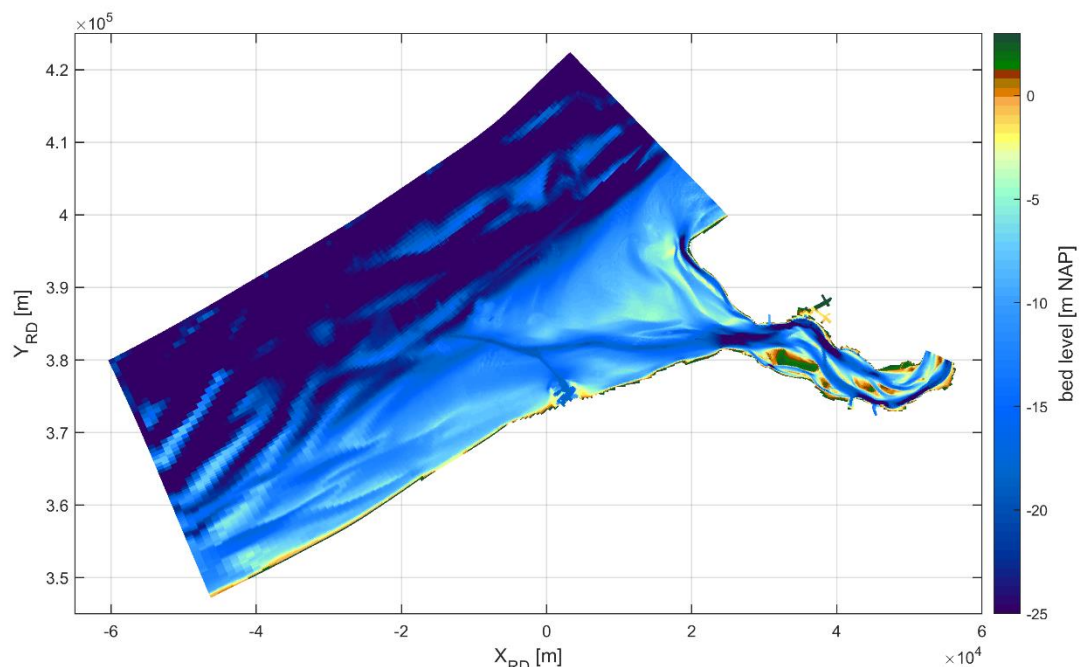
4 Modelling van de morfodynamica en onderliggende processen

4.1 Inleiding

In een eerdere studie is een diepte-gemiddeld (2DH) model van de Schelde-monding opgezet om sedimenttransportpatronen te analyseren (Van Weerdenburg & Van der Werf, 2021). In dit hoofdstuk worden de modelaanpassingen beschreven om het geschikt te maken voor morfodynamische modelsimulaties (paragraaf 4.2). Vervolgens wordt de berekende morfologische ontwikkeling vergeleken met de gemeten ontwikkeling (paragraaf 4.3). In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk wordt het model gebruikt om de zandtransportprocessen die ten grondslag liggen aan de (berekende) morfologische ontwikkeling aan de zuidkant van de Vlake van de Raan beter te begrijpen.

4.2 Opzet morfodynamisch model

Het modeldomein bevat een ongeveer 40 km brede kuststrook langs de kust van België, Zeeuws-Vlaanderen en Walcheren en de Westerschelde tot de Plaat van Ossenis (zie Figuur 4-1; Van Weerdenburg & Van der Werf, 2021). De modelresolutie in het interessegebied (VvdR-Zuid) is ongeveer 120 m. Voor de initiële bodemligging in het model zijn lodingen uit 2017 gebruikt. Daarnaast is voor de validatie van het morfodynamische model een modelbodem op basis van de bodemligging in 2011 toegepast. Hydrodynamische randvoorwaarden op de randen van het modeldomein zijn afgeleid uit het DCSMv6-ZUNOV4 model met Kalmanfiltering (Zijl et al., 2015). Als randvoorwaarden voor zand wordt een evenwichtstransport opgelegd. Dat wil zeggen dat de hoeveelheid zand die op de modelrand het domein in of uit gaat gelijk is aan de transportcapaciteit op de rand, zodat de bodemhoogte op de modelrand niet verandert.



Figuur 4-1 Modeldomein van het Delft3D model dat in deze studie wordt toegepast. De kleurenschaal toont de initiële bodemligging in het model, gebaseerd op Vaklodgingen uit 2017.

Als simulatieperiode voor transportberekeningen is de maand maart 2014 gekozen. Het berekende zandtransport in deze maand is representatief voor het jaargemiddelde zandtransport in het interessegebied (Van Weerdenburg & Van der Werf, 2021). De simulatieperiode is langer dan bij het berekenen van de sedimenttransportpatronen in Van Weerdenburg & Van der Werf (2021); toen werd een representatieve periode van twee M2 getijperiodes doorgerekend (5 maart 23:50 – 7 maart 00:40).

De belangrijkste instellingen voor het berekenen van sedimenttransport en morfologische ontwikkeling met het Delft3D model zijn opgenomen in Tabel 4.1. Deze instellingen zijn grotendeels gebaseerd op eerdere toepassingen van dit model (Vroom et al., 2016; Van Weerdenburg & Van der Werf, 2021). Door het gebruik van een morfologische acceleratiefactor (MorFac) wordt de morfologische ontwikkeling in modelsimulaties versneld. Er wordt een MorFac van 48 gebruikt (Tabel 4.1). Hierdoor is de morfologische verandering die in de simulatieperiode van een maand wordt berekend representatief voor de morfologische ontwikkeling in vier jaar (simulatieperiode * MorFac = 1 maand * 48 = 4 jaar).

De morfodynamische ontwikkeling wordt berekend met de zogenaamde *mormerge* aanpak. Hierbij worden acht modelsimulaties parallel uitgevoerd. Elke modelsimulatie bevat een andere golfconditie (acht verschillende in totaal). De berekende bodemverandering in de acht simulaties wordt na elke tijdstap gemiddeld op basis van de kans van voorkomen van de golfcondities. Vervolgens wordt de gemiddelde bodemverandering toegepast in elk van de berekeningen, waarna de bodemverandering op de volgende tijdstap bepaald wordt. De randvoorwaarden voor de acht golfcondities zijn gebaseerd op de gemeten golven bij Schouwenbank en de gemeten windsnelheid en -richting bij Vlissingen in 2014 (Tabel 4.2).

In het interessegebied aan de zuidkant van de Vlake van de Raan zijn erosieresistente lagen aanwezig in de ondergrond (zie Figuur 2-8; Van der Vegt et al., 2021). Als deze lagen door erosie van het zandpakket dagzomen (d.w.z. aan het oppervlak komen), dan zal de bodemverandering vertragen of stoppen. De erosieresistente lagen zijn in de morfodynamische modellering opgenomen als een beperkte dikte van het zandpakket dat beschikbaar is voor erosie. Op plekken waar de erosieresistente lagen dagzomen is geen zand beschikbaar voor erosie. De minimale bodemdikte is dan bereikt. Merk op dat erosieresistente lagen de erosie in het model dus niet afremmen maar stoppen. Waar de eerste erosieresistente laag bijvoorbeeld 6 m onder de huidige bodemligging ligt is een zandpakket van 6 m dik beschikbaar voor erosie.

Tabel 4.1 Instellingen voor sedimenttransport en morfologische ontwikkeling in het Delft3D model.

Modelinstelling	Waarde
Transportvergelijking	Van Rijn (2007)
Morfologische schaafactor (MorFac)	48
Vermenigvuldigingsfactor voor suspensief transport (Sus)	0.5
Vermenigvuldigingsfactor voor bodemtransport (Bed)	0.5
Factor voor golf-gerelateerd suspensief transport (SusW)	0.3
Factor voor golf-gerelateerd bodemtransport (BedW)	0.3
Factor voor bodemhelling in stroomrichting op bodemtransport (AlfaBs)	1
Factor voor bodemhelling in dwarsrichting op bodemtransport (AlfaBn)	10
Mediane korrelgrootte D50 (SedDia)	0,20 mm

Tabel 4.2 Acht golfcondities die in verschillende modelsimulaties als randvoorwaarden worden opgelegd, op basis van gemeten golfcondities bij Schouwenbank en windcondities bij Vlissingen in 2014.

Conditie	Golfhoogte [m]	Golfrichting [°N]	Golfperiode [s]	Windsnelheid [m/s]	Windrichting [°N]	Weegfactor [%]
1	0,64	354	6,2	0,9	41	33,7
2	0,73	107	3,6	5,9	121	3,0
3	0,69	244	4,5	3,7	202	20,6
4	1,53	342	6,6	2,9	338	12,6
5	1,31	113	4,7	7,6	117	1,2
6	1,66	242	6,0	7,9	210	25,1
7	3,38	331	8,2	8,1	332	0,9
8	2,90	252	7,3	12,4	236	3,1

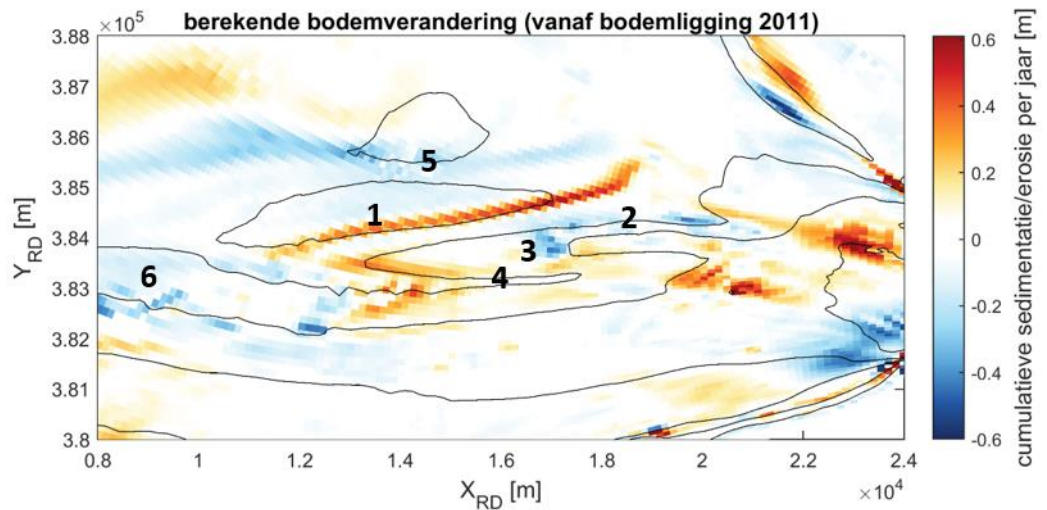
4.3 Validatie morfodynamisch model

Ter validatie van het morfodynamische model wordt de berekende bodemverandering (Figuur 4-2) vergeleken met de bodemverandering op basis van bodemopnames in 2011 en 2017 (Figuur 4-3). Met het model is vier jaar morfologische ontwikkeling berekend met de initiële bodemligging op basis van een bodemopname van 2011. De berekende en de gemeten bodemverandering zijn omgerekend naar gemiddelde veranderingen in bodemhoogte per jaar.

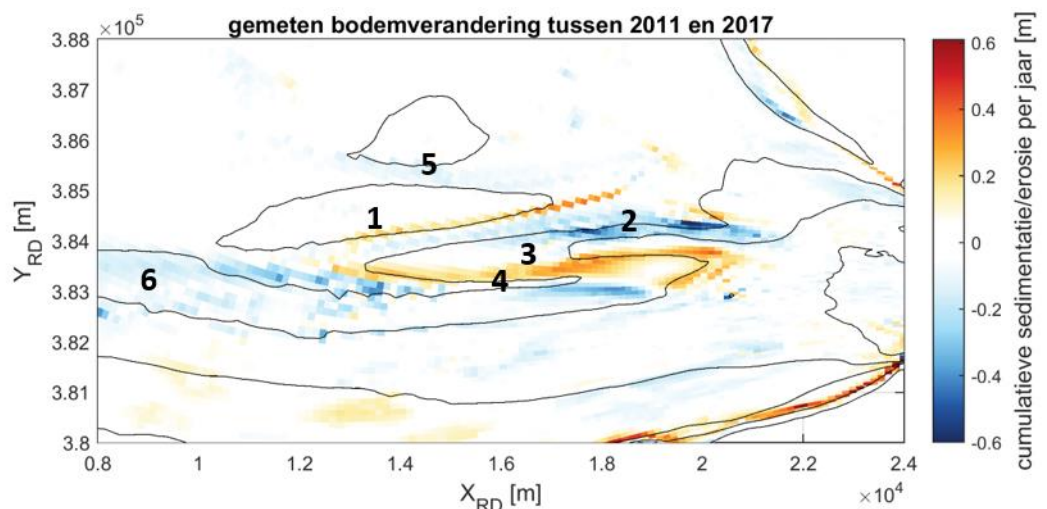
Een aantal van de belangrijke patronen van erosie- en sedimentatie wordt redelijk goed gereproduceerd door het model. Andere patronen in de gemeten bodemverandering zijn minder goed terug te zien in de berekende bodemverandering, en vice versa.

- De sedimentatie aan de zuidkant van Spleet (#1 in Figuur 4-2 en Figuur 4-3) is duidelijk zichtbaar in zowel de data als in de modelresultaten. In de modelresultaten is de sedimentatie groter.
- Iets verder naar het zuiden, aan de noordkant van de ebschaar (#2) is door de noordwaartse migratie van de ondiepe rug erosie te zien in de gemeten bodemverandering. Door het model wordt ook erosie berekend, maar de erosie is een stuk kleiner dan gemeten.
- Op een centraal punt in de ebschaar (#3) wordt erosie berekend door het model. Volgens de metingen is de bodemligging hier stabiel. Hier liggen harde lagen vlak onder de bodem (zie Figuur 2-8; Van der Vegt et al., 2021). Volgens het beschikbare zandpakket in het model dagzomen deze harde lagen nog (net) niet. Als dat wel zo zou zijn, verklaart dat het verschil tussen de gemeten bodemverandering en de modelresultaten.
- Aan de zuidelijke kant van de ebschaar (#4) treedt vooral sedimentatie op, dit wordt goed gereproduceerd door het model. De erosie die iets verder naar het zuiden optreedt, wordt maar in een deel van deze strook door het model gereproduceerd.
- Ten noordwesten van het interessegebied worden door het model bodemveranderingen berekend die in de data niet zijn terug te zien, met uitzondering van lichte erosie langs de 5 m dieptecontour (#5).
- De erosie aan de noordkant van Scheur – Wielingen ten westen van het interessegebied (#6) is in de modelresultaten vergelijkbaar met de data.
- Ten oosten van het interessegebied, richting de keel van de Westerscheldemonding, wordt door het model veel sedimentatie en erosie berekend, terwijl hier nauwelijks veranderingen te zien zijn in de gemeten bodems. Het betreft erosie aan de zuidkant (Zeeuws-Vlaamse kust) en sedimentatie in het centrale deel van de keel. Het is bekend dat harde lagen aanwezig zijn in de ondergrond waar volgens de modelresultaten

erosie optreedt, echter liggen die volgens de geologische data nog niet aan de oppervlakte. Als dat wel het geval zou zijn dan zouden harde lagen de berekende erosie beperken, wat de modelresultaten meer in lijn brengt met de gemeten bodemverandering.

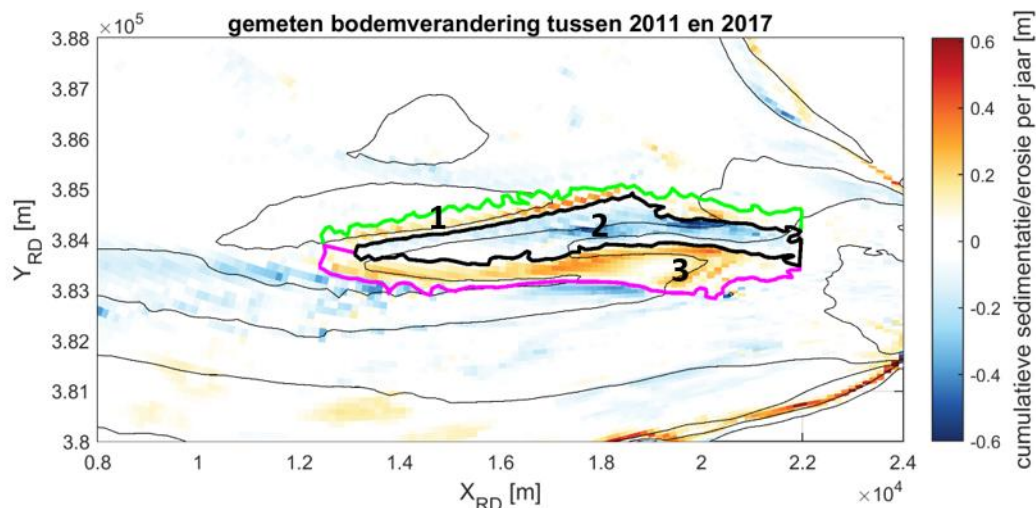


Figuur 4-2 Berekende bodemverandering per jaar vanaf de initiële bodemligging zoals in 2011. Dieptecontouren tonen de initiële bodemligging (met een interval van 5 m NAP).



Figuur 4-3 Gemiddelde gemeten bodemverandering per jaar tussen 2011 en 2017.

Voor een kwantitatieve vergelijking tussen de berekende en de gemeten erosie en sedimentatie is de volumeverandering in drie vakken bepaald, welke zijn bepaald op basis van overgangen tussen erosie en sedimentatie in de gemeten bodemveranderingen (Figuur 4-4). De volumeveranderingen in metingen en in berekeningen zijn opgenomen in Tabel 4.3. De gemeten sedimentatie aan de zuidkant van de Spleet (Vak 1) wordt in modelberekeningen met ongeveer een factor 2 overschat. De erosie aan de noordkant van de ebschaar (vak 2) wordt met ongeveer een factor 2 tot 3 onderschat. Daarbij geldt dat de grootste erosie in de modelberekening plaatsvindt op een plek waar volgens de data geen erosie plaatsvindt. De toename van het volume in vak 3 in de modelresultaten is vergelijkbaar met de gemeten toename, al is de sedimentatie in modelresultaten minder gelijkmatig verdeeld over het vak.



Figuur 4-4 Ligging van drie vakken waarbinnen sedimentatie of erosie optreedt in de gemeten bodemverandering tussen 2011 en 2017.

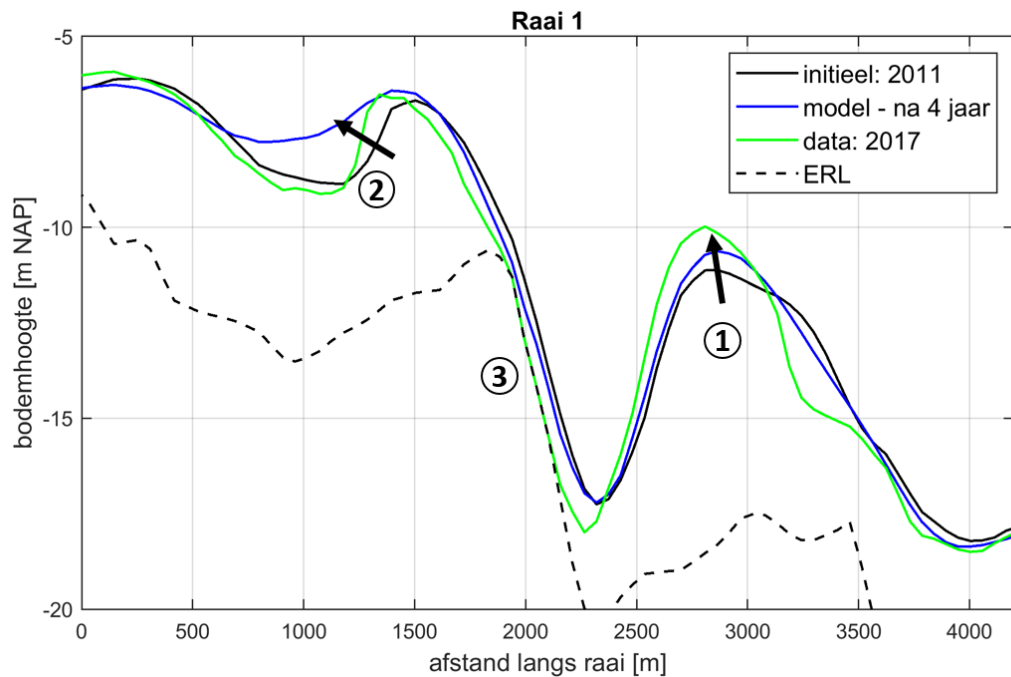
Tabel 4.3 Gemeten en berekende volumeverandering door sedimentatie (positieve getallen) en erosie in drie vakken in het interessegebied (zie Figuur 4-4).

Vak	Gemeten volumeverandering 2011- 2017	Berekende volumeverandering 2011-2015
	[miljoen m ³ /jaar]	[miljoen m ³ /jaar]
1	+0,3	+0,6
2	-0,8	-0,3
3	+0,8	+0,7

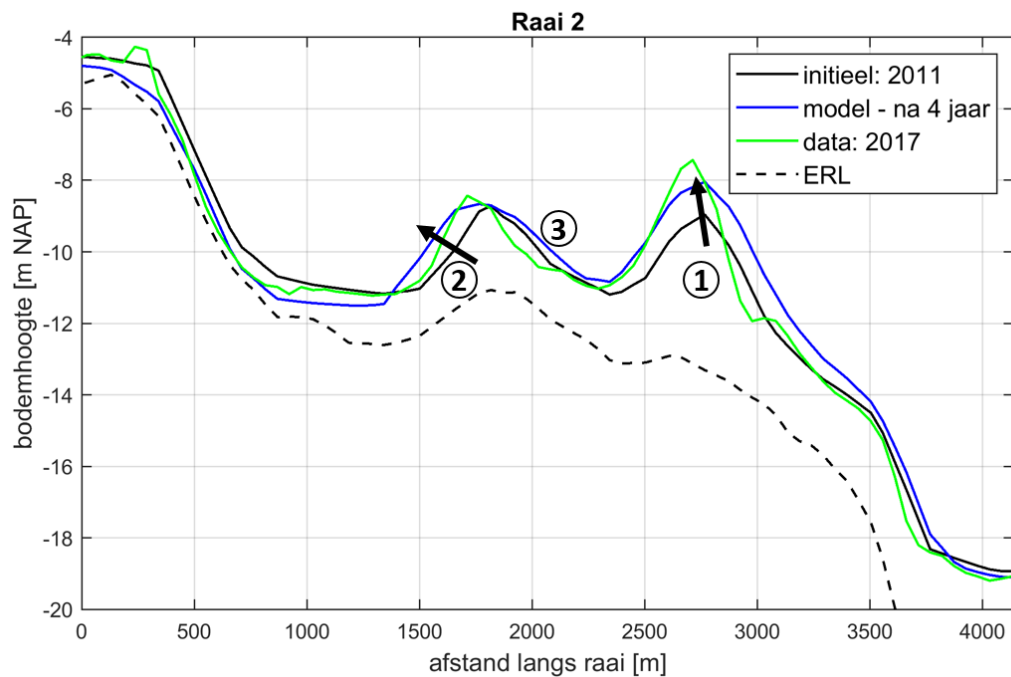
De sedimentatie- en erosie patronen rond de ebschaar worden voor een groot deel veroorzaakt door (1) de ontwikkeling van een ondiepe bank ten zuiden van de ebschaar en (2) het noordwaarts verplaatsen van de bank tussen de ebschaar en de Spleet (zie Hoofdstuk 2). De berekende en de gemeten bodemverandering langs raai 1, 2 en 3 (zie Figuur 2-4) is weergegeven in Figuur 4-5, Figuur 4-6 en Figuur 4-7. De berekende verandering treedt op in vier jaar, terwijl de gemeten verandering is opgetreden in een periode van 6 jaar.

De ophoging van de ondiepe bank ten zuiden van de ebschaar treedt in het model ook op (#1 in Figuur 4-5 en Figuur 4-6). In raai 2 is de berekende ophoging groter dan in raai 1. Net als in de gemeten bodemverandering breidt de bank ten noorden van de ebschaar zich in de modelresultaten uit richting het noorden (#2). De erosie van die bank aan de zuidkant (ofwel aan de noordkant van de ebschaar, #3) is klein in raai 2 en wordt niet door het model gereproduceerd in raai 1. Het model berekent erosie van het harde-lagen plateau in raai 3 voordat deze geremd wordt, anders dan in de metingen (Figuur 4-7). Waarschijnlijk wordt in werkelijkheid op een eerder moment de moeilijk-erodeerbare laag aangesneden.

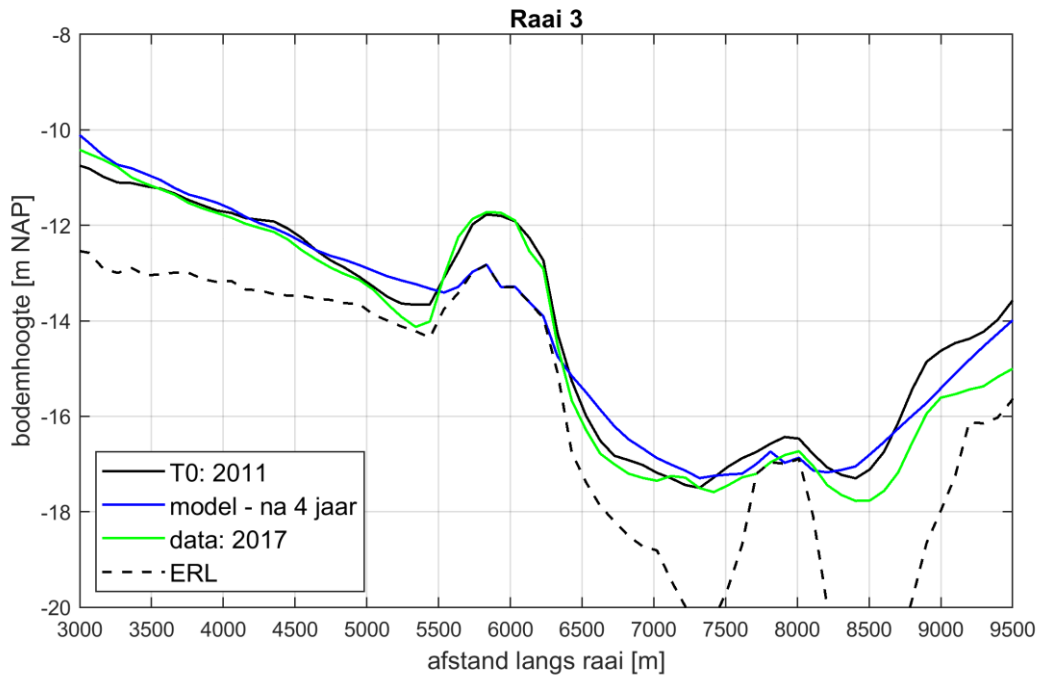
Er is ook een morfodynamische berekening uitgevoerd zonder harde lagen in het model. In dat geval is de erosie in het hele model domein ongelimiteerd. Op de tijdschaal van enkele jaren hebben de harde lagen alleen een lokaal effect, doordat zij erosie lokaal beperken (zie Bijlage A).



Figuur 4-5 Berekende en gemeten ontwikkeling van de bodemligging langs raai 1 (zie Figuur 2-4 voor de ligging) vanaf de initiële bodemligging in 2011. De berekende verandering treedt op in een simulatieperiode van 4 jaar en de gemeten verandering treedt op tussen 2011 en 2017 (6 jaar). De gestippelde zwarte lijn toont de erosieresistente onderlaag in de modelbodem.



Figuur 4-6 Berekende en gemeten ontwikkeling van de bodemligging langs raai 2 (zie Figuur 2-4 voor de ligging) vanaf de initiële bodemligging in 2011. De berekende verandering treedt op in een simulatieperiode van 4 jaar en de gemeten verandering treedt op tussen 2011 en 2017 (6 jaar). De gestippelde zwarte lijn toont de erosieresistente onderlaag in de modelbodem.



Figuur 4-7 Berekende en gemeten ontwikkeling van de bodemligging langs raai 3 (zie Figuur 2-4 voor de ligging) vanaf de initiële bodemligging in 2011. De berekende verandering treedt op in een simulatieperiode van 4 jaar en de gemeten verandering treedt op tussen 2011 en 2017 (6 jaar). De gestippelde zwarte lijn toont de erosieresistente onderlaag in de modelbodem.

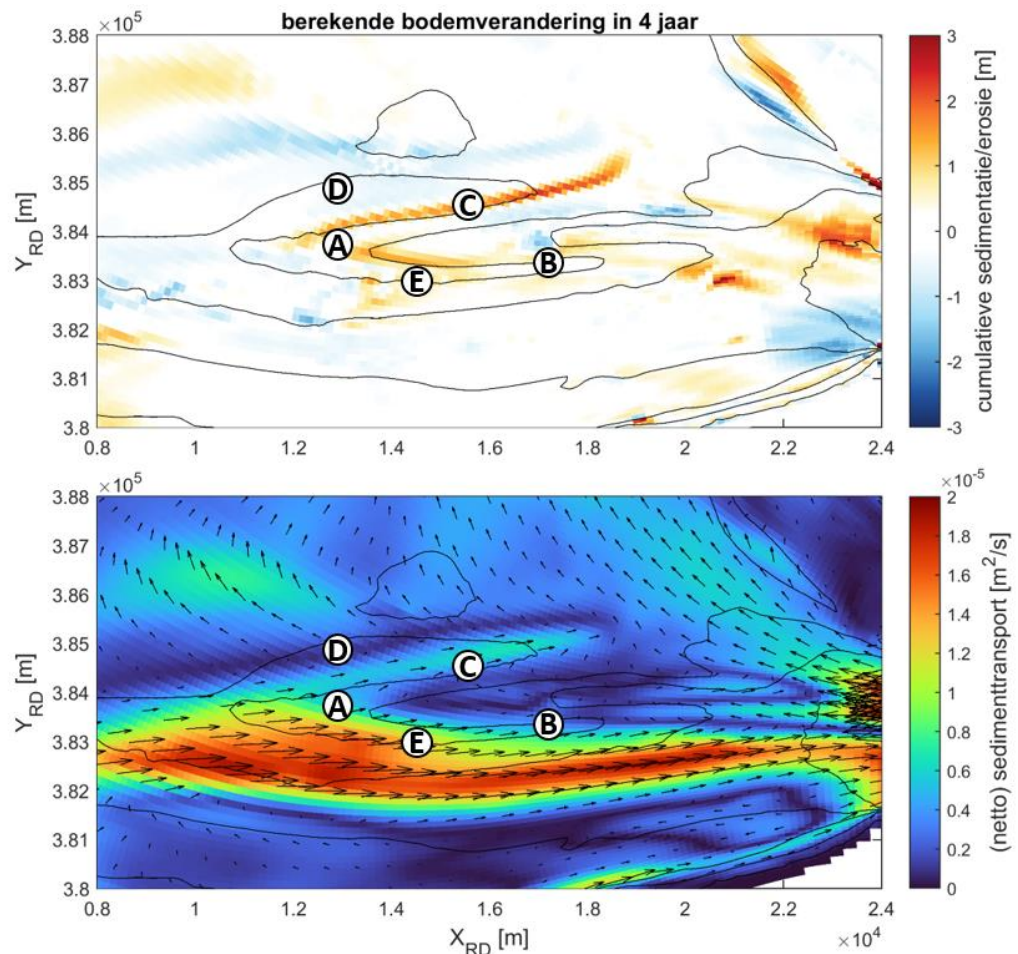
4.4 Transportprocessen

4.4.1 Netto zandtransport

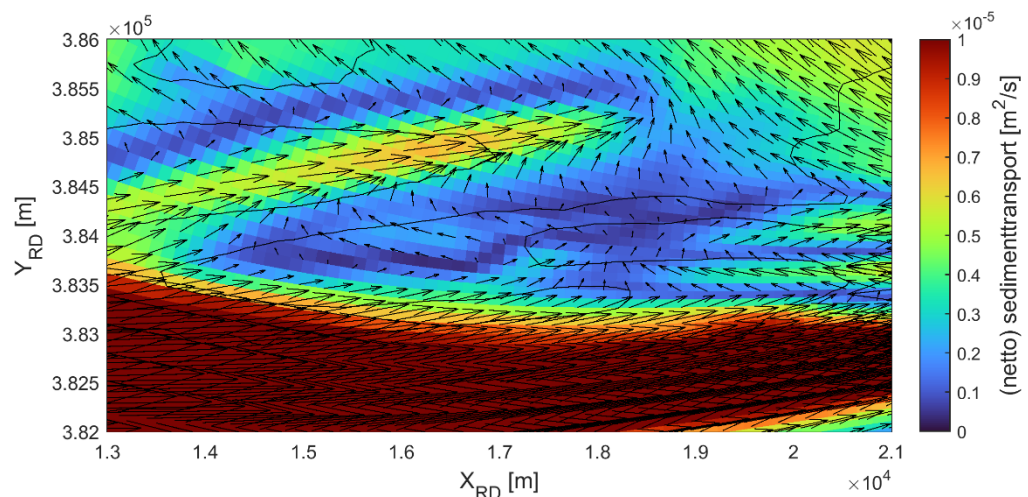
Figuur 4-8 laat de berekende morfologische ontwikkeling na 4 jaar en de bijbehorende netto zandtransporten zien. De volgende observaties kunnen worden gemaakt:

- In een groot deel van het interessegebied zijn de (berekende) netto zandtransporten vloedgedomineerd. Dit gaat over in ebgedomineerde transporten in de Geul van de Walvischstaart. In delen van de ebschaar is het (berekende) netto transport klein en ebgedomineerd, dit is te zien door op de ebschaar in te zoomen (Figuur 4-9).
- Er zijn grote ruimtelijke verschillen. De grootste netto transporten treden op langs de noordrand van de Wielingen. Hiermee vergeleken zijn de transporten in Spleet en in de ebschaar klein.
- De convergentie/divergentie van het zandtransportvectorveld bepaalt de morfologische ontwikkeling:
 - Ten westen van de ebschaar (A in Figuur 4-8) neemt de grootte van het vloeddominante netto zandtransport af in de vloedrichting (d.w.z. richting het oosten). Dit zorgt voor sedimentatie: er komt in dit gebied meer sediment binnen dan eruit getransporteerd wordt.
 - In de ebschaar zelf zijn de berekende netto zandtransporten en dus ook de morfologische veranderingen klein. Uitzondering hierop is de erosie van het ondiepe plateau en de verplaatsing van dit geërodeerde sediment in vloedrichting (B) door een plotselinge toename en afname van het zandtransport in de vloedrichting.
 - De sedimentatie van de rug tussen de ebschaar en Spleet (C) is voornamelijk het gevolg van het samenkomen van netto zandtransporten door de geul en vanaf de rug. Vanuit de rand van de ebschaar stroomt sediment in noord/noordoostelijke richting naar deze rug toe.

- De netto zandtransporten en dus ook de morfologische veranderingen in het noordelijke deel van de Spleet zijn klein (D).
- De sedimentatie van de rug ten zuiden van de ebschaar (E) is gecorreleerd aan de kleine noordelijke component van de netto zandtransporten die afneemt in noordelijke richting. De sedimentatie is een gevolg van het vloeddominante transport in de Wielingen.



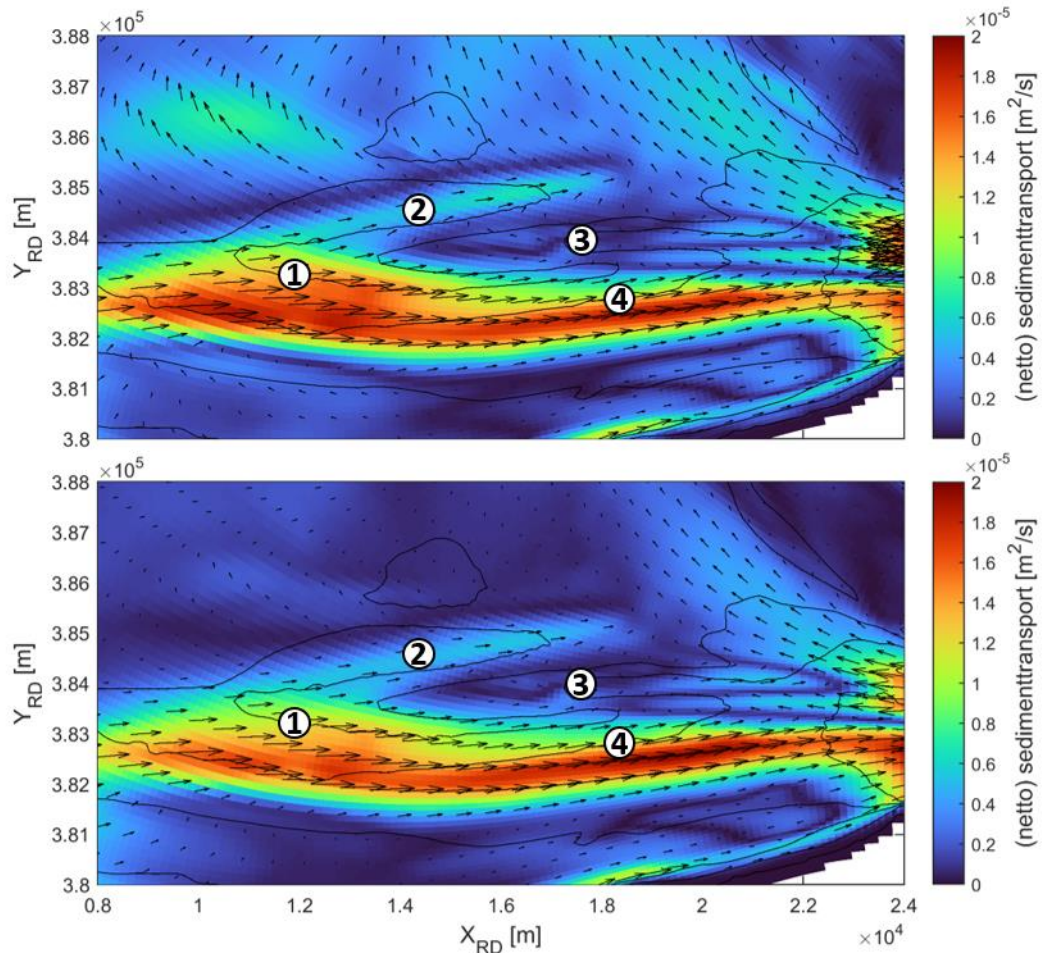
Figuur 4-8 Berekende bodemverandering na 4 jaar (boven) en de bijbehorende netto zandtransporten (onder).



Figuur 4-9 Berekende netto zandtransporten, ingezoomd op de ebschaar ten opzichte van Figuur 4-8. De kleurschaal toont de grootte van het netto transport, de pijlen tonen de grootte en de richting.

4.4.2 Zandtransportprocessen

Met uitzondering van het relatief ondiepe noordwestelijke gedeelte van het interessegebied wordt het netto zandtransport grotendeels bepaald door het getij (Figuur 4-10; zie ook Van Weerdenburg & Van der Werf, 2021). Golven vergroten het netto transport ook in een aantal getijgedomineerde gebieden, zoals in de Wielingen ten zuiden van de Spleet (#1 in Figuur 4-10) en in de Spleet (#2). Golven zorgen namelijk voor een toename van de bodemschuifspanning en als zodanig voor meer opwoeling van sediment. Dit zorgt voor een kleine toename van het zandtransport tijdens zowel eb- als vloed, en een groter netto transport. De richting van het netto zandtransport wordt hier nauwelijks beïnvloed door golven. In de ebschaar (#3) en in de Wielingen ten zuiden van de ebschaar (#4) hebben golven bijna geen effect op de grootte van het netto zandtransport.



Figuur 4-10 Berekende netto zandtransporten in modelsimulatie met (boven) en zonder (onder) golven. De kleurenschaal toont de grootte van het netto transport, de pijlen tonen de grootte en de richting.

Er zijn 3 belangrijke getij-gedreven zandtransport mechanismen (zie Van der Werf et al., 2020a):

1. Netto zandtransport door de netto (residuele) stroomsnelheid.
2. Netto zandtransport gekoppeld aan de opwoeling van sediment door tijdsvarianties in stroomsnelheid (eb- en vloed), meegenomen door de netto stroomsnelheid.
3. Netto zandtransport door tijdsvarianties in stroomsnelheid (getij-asymmetrie)

Het belang van elk van de mechanismen hangt met name af van de grootte en de richting van de netto stroomsnelheid en de getij-asymmetrie.

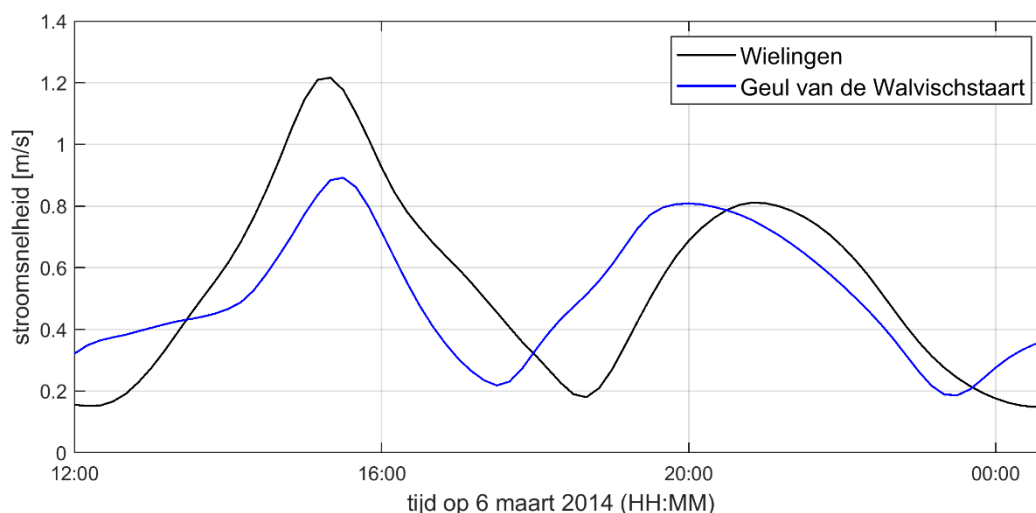
Figuur 4-12 toont stroombeelden tijdens vier karakteristieke momenten in een getijperiode die representatief is voor tijdsgemiddelde condities in termen van zandtransport (zie Van Weerdenburg & Van der Werf, 2021):

- 1) piek vloedsnelheid in de Wielingen (linksboven; 6 maart 2014 om 15.00 uur),
- 2) vloed-eb kentering in de Wielingen (rechtsboven; 6 maart 2014 om 18.00 uur)
- 3) piek ebsnelheid in de Wielingen (linksonder; 6 maart 2014 om 21.00 uur),
- 4) eb-vloed kentering in de Wielingen (rechtsonder; 7 maart 2014 om 01.00 uur)

Uit Figuur 4-12 blijkt dat de piek vloedsnelheden in het interessegebied over het algemeen groter zijn dan de piek ebsnelheden:

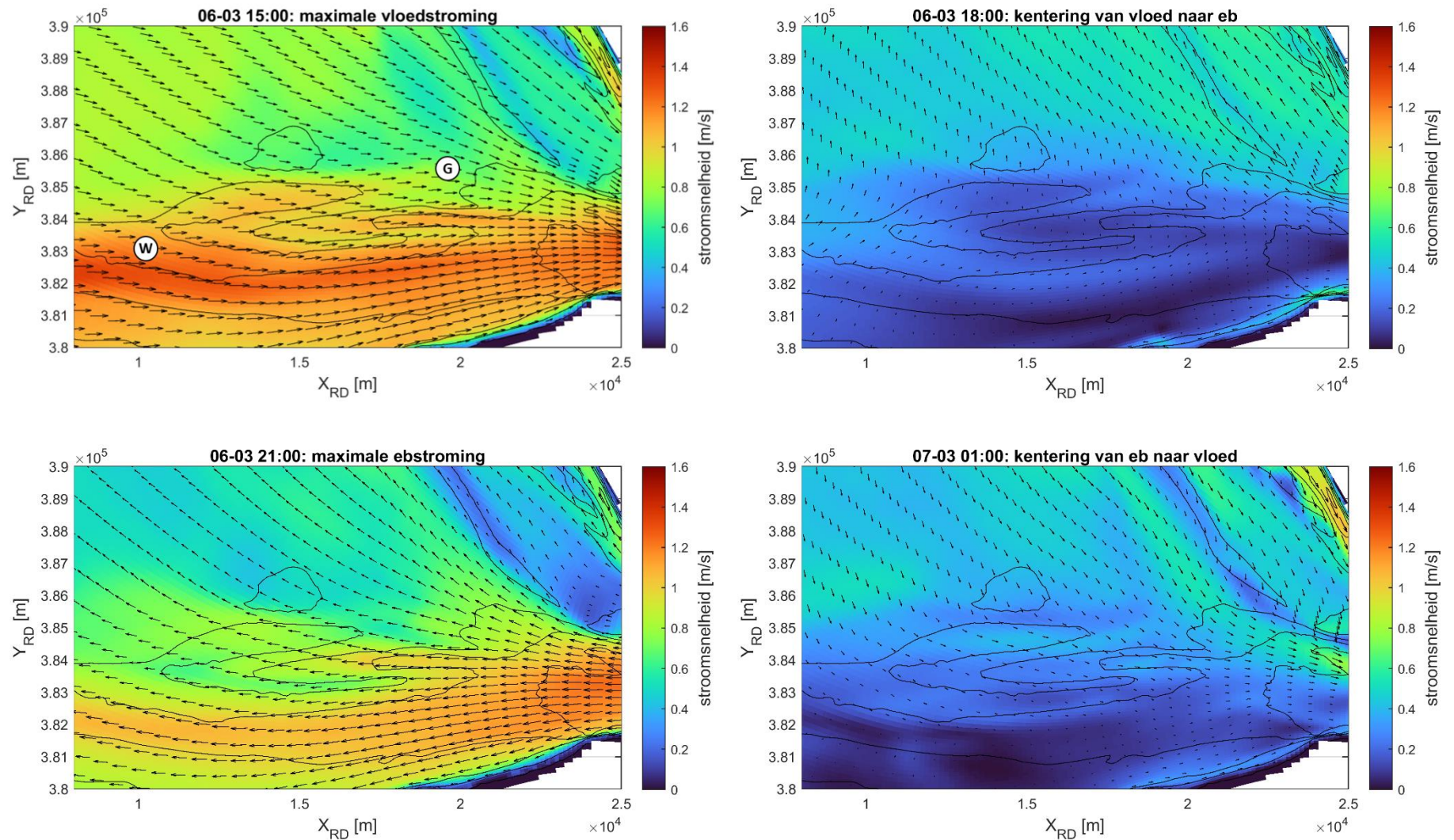
- In de Wielingen treden de hoogste piek vloedsnelheden op (~1,3 m/s); deze nemen toe in de richting van de Westerschelde. Hetzelfde ruimtelijk verloop geldt voor de piek ebsnelheden met een waarde van ~1,1 m/s in het interessegebied.
- De piek vloedsnelheden in de ebschaar nemen toe van ~1,0 m/s in het westen naar ~1,2 m/s in het oosten. Bij eb zijn de pieksnelheden 0,9-1,0 m/s.
- In de Spleet zijn de piek vloedsnelheden ongeveer 1,0 m/s, en de piek ebsnelheden 0,7-0,8 m/s. De ruggen kennen vergelijkbare piek vloed- en ebsnelheden.

De grote piek vloedsnelheden in de Wielingen zijn ook terug te zien in de tijdseries van de stroomsnelheid in Figuur 4-11. Ter vergelijking is ook een tijdserie opgenomen van de stroomsnelheid op een punt in de Geul van de Walvischstaart, waar de snelheid tijdens vloed maar iets groter is dan de snelheid tijdens eb.



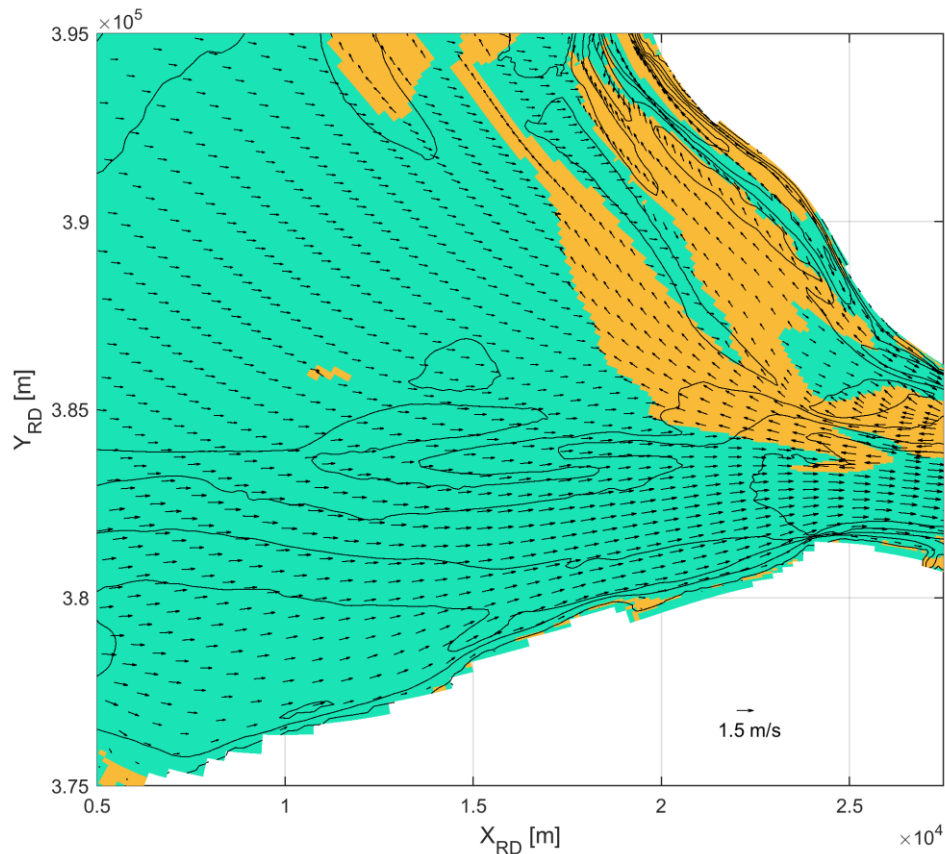
Figuur 4-11 Tijdseries van de berekende stroomsnelheden op twee punten in een modelberekening met golven gedurende een representatieve getijperiode. De getijperiode start bij kentering van eb naar vloed. De locaties van de twee punten zijn aangegeven in Figuur 4-12: W = Wielingen, G = Geul van de Walvischstaart.

De stromingskenteringen in de ondiepere gebieden ten noorden van de Wielingen treden eerder op dan in de diepe Wielingen geul, als gevolg van traagheidseffecten. Tijdens deze momenten van lage snelheid is goed zichtbaar dat in deze gebieden, en dan met name op de Vlake van de Raan, de snelheid ook een (veelal relatief kleine) noord-zuid component heeft, dwars op de oriëntatie van de geulen. De stroming valt hier dus niet stil bij kentering tussen eb en vloed, zoals dat wel het geval is in (diepe) geulen.



Figuur 4-12 Berekende stroomsnelheden in een modelberekening met golven tijdens 4 fases van het getij: bij maximale vloedstroming in de Wielingen (linksboven), bij kentering van vloed naar eb in de Wielingen (rechtsboven), bij maximale ebstroming in de Wielingen (linksonder) en bij kentering van eb naar vloed in de Wielingen (rechtsonder). Tijdseries op locaties G en W worden getoond in Figuur 4-11.

Het beeld van grotere pieksnelheden in het interessegebied VvdR-Zuid tijdens vloed in de representatieve getijperiode (van 5 maart 23:50 tot 7 maart 00:40) wordt bevestigd in Figuur 4-13. Richting de Geul van de Walvischstaart treden de maximale pieksnelheden op tijdens eb. In een deel van het interessegebied is het afhankelijk van de gekozen getijperiode in de spring-doodtij cyclus of de pieksnelheden groter zijn tijdens eb of tijdens vloed. Dit is verder toegelicht in Bijlage B. Een weergave van de pieksnelheden zoals in Figuur 4-13 is daarmee gevoelig voor de gekozen getijperiode.

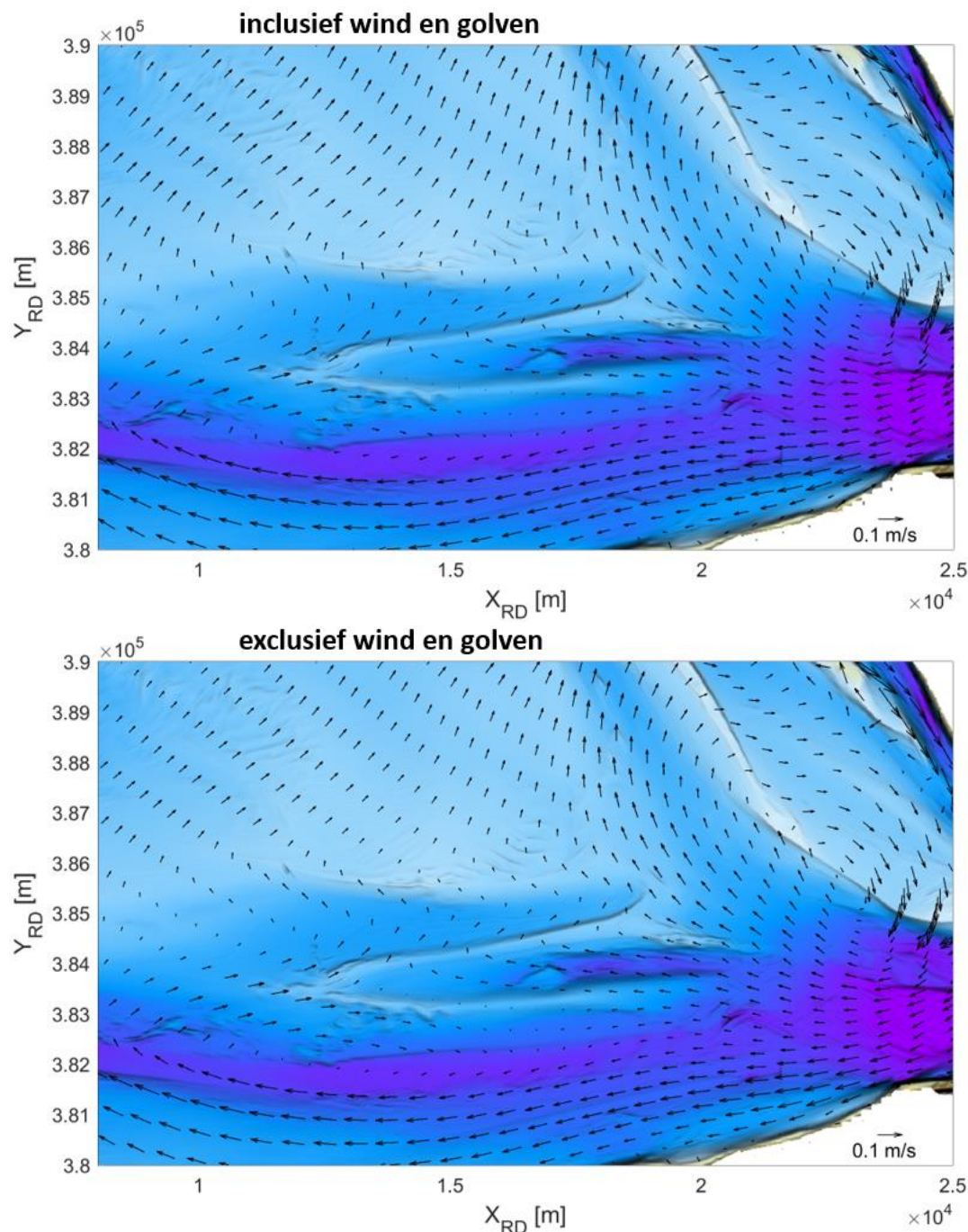


Figuur 4-13 Berekende piek vloed- en ebsnelheden gedurende een representatieve getijperiode. De pijlen tonen de grootste berekende snelheidsvector en de kleur geeft aan of die maximale snelheidsvector in eb- of in vloedrichting staat. De groene gebieden zijn vloeddominant; de bruine gebieden ebdominant in termen van pieksnelheden.

Op basis van de getijgemiddelde (residuele) snelheden is een groot deel van het interessegebied ebdominant (Figuur 4-14). De grootste residuele snelheden treden op aan de zuidkant van de Wielingen. Hier lopen de snelheden op tot ~0,12 m/s in de ebrichting. Ook in de ebschaar staan de residuele snelheden in de ebrichting met een grootte van ca. 0,05 m/s. In de Spleet zijn de residuele snelheden relatief klein en hebben een noordoostelijke oriëntatie. Op de tussenliggende, ondiepere ruggen staat de residuele snelheid aan de westkant in vloedrichting met een grootte die oploopt tot ~0,08 m/s ten westen van de ebschaar. Verder naar het oosten zijn de gemiddelde snelheden op de ondiepe banken kleiner.

Wind en golven hebben alleen een klein effect op de gemiddelde stroomsnelheden, zoals volgt uit de vergelijking tussen het bovenste en onderste paneel in Figuur 4-14. Wind en golven vergroten de gemiddelde snelheden op het centrale deel van de Vlake van de Raan, maar hebben geen effect op de gemiddelde snelheidsrichting. In het interessegebied aan de

zuidkant van de Vlake van de Raan hebben wind en golven bijna geen effect op de reststroming.



Figuur 4-14 Getijgemiddeld stromingsveld op basis van modelberekeningen voor een maand met (boven) en zonder (onder) wind en golven. De onderliggende kaart toont de bodemligging.

Deze aan de bodemligging-gekoppelde residuele snelheden met vloedstroming in ondiepere gebieden en ebstroming in diepere gebieden is een algemeen bekend fenomeen in estuaria (zie bijvoorbeeld Wang (1999)). Het heeft te maken met het feit dat de vloodsnelheden optreden bij een hogere waterstand en dus grotere waterdiepte (h) dan de ebsnelheden. Aangezien het debiet proportioneel is tot ongeveer $h^{1.5}$ stroomt er relatief meer ebdebiët door het diepe gedeelte en relatief meer vlooddebiët door het ondiepte gedeelte, wat resulteert in een residuele eb- en vloodsnelheid, respectievelijk. In buitendelta's liggen de zaken wat

ingewikkelder door faseverschillen tussen geulen. Echter, in algemene zin gaat deze relatie tussen diepte en eb- en vloeddominantie in termen van netto snelheden wel op.

Uit de modelresultaten blijkt dat er in een groot deel van het interessegebied sprake is van netto zandtransport in vloedrichting, veroorzaakt door de sterke getijasymmetrie in termen van pieksnelheden. De getijasymmetrie is in dit gebied dominanter voor het netto zandtransport dan de gemiddelde stroming. In delen van de ebschaar is het netto zandtransport wel gericht in de ebrichting. Dit wordt veroorzaakt door de gemiddelde stroming in ebrichting en een wisselende getijasymmetrie gedurende de spring-doodtij cyclus (Bijlage B).

Aan de hand van de zandtransportprocessen kan de berekende morfologische ontwikkeling uitgelegd worden. Ten westen van de ebschaar is de residuele snelheid gericht in vloedrichting en in de ebschaar zelf is de residuele snelheid gericht in ebrichting. Deze convergentie van residuele stromingen zorgt voor lokale aanzanding. De subtiële, residuele stroming op de ondiepe rug ten noorden van de ebschaar draagt bij aan de sedimentatie en migratie van deze ondiepte.

5 Discussie

5.1 De rol van de ondergrond

Er bevindt zich een moeilijk-erodeerbare Holocene kleilaag nabij het oppervlakte (binnen ~2 m) in het gebied VvdR-Zuid (zie Figuur 2-8). Deze beïnvloedt zichtbaar de morfologische ontwikkeling (zie paragraaf 2.3). Het is de vraag hoe sturend deze kleilaag is (geweest) voor de morfologische ontwikkeling.

Het feit dat deze bodemlaag vooral een effect heeft op bodemerosie en niet zozeer op de sedimentatie die ook optreedt in het gebied spreekt voor een secundaire rol van de ondergrond. Dit wordt bevestigd door modelberekeningen met en zonder niet-erodeerbare lagen. Het verschil tussen de morfologische ontwikkeling na 4 jaar is beperkt (Bijlage A). Aan de ander kant wordt deze vergelijking beïnvloed door de initiële modelbodem die wel degelijk mede door de aanwezigheid van de kleilaag gevormd is.

Verder is het zo dat deze Holocene kleilaag niet zo gemakkelijk erodeert als zand, maar wel degelijk erodeerbaar is. De erosie-resistentie is niet vergelijkbaar met b.v. Boomse klei. Dit blijkt ook uit het feit dat er wel degelijk erosie lijkt op te treden na het in contact komen met deze harde laag, zoals in de ebschaar. Echter, de morfologische ontwikkeling van de ebschaar wijkt af van de theorie, wat waarschijnlijk te maken heeft met de aanwezigheid van moeilijk-erodeerbaar lagen (zie verder paragraaf 5.5).

5.2 Lange-termijn ontwikkelingen

De lange-termijn ontwikkeling van het interessegebied is gecompliceerd. Juist hier ontstaat de cruciale ebschaar die de grootschalige ontwikkelingen in de 19^e eeuw in gang zet. Uit de verkenning van de ondergrond blijkt de aanwezigheid van erosiebestendige lagen. Hoe die de grootschalige ontwikkeling beïnvloed hebben is op dit moment niet duidelijk. Door de lange-termijn ontwikkelingen verder te analyseren kan hun rol duidelijk worden. Daarvoor moet deze lange-termijn ontwikkeling, en de factoren die deze ontwikkeling aansturen, bekend zijn.

De hypothese dat de ontwikkelingen in de monding samenhangen met, en waarschijnlijk aangestuurd worden door de ontwikkelingen in het westelijk deel van het estuarium, is niet voldoende onderzocht. Met name meer inzicht in de veranderingen in de getijstrooming in het oostelijke deel van de monding als gevolg van de verlanding van de zijtakken Sloe en Braakman en de daardoor veroorzaakte veranderingen in waterbeweging en morfodynamica in het westelijk deel van de Westerschelde is nodig. Hierbij kan gedacht worden aan verschuivingen in de fase tussen het getij in het zeegat en op zee en de waterstanden waarbij maximale strooming optreedt.

5.3 Invloed van menselijke ingrepen

Zoals beschreven in paragraaf 3.5 is er in het interessegebied en haar directe omgeving relatief weinig gebaggerd en gestort in vergelijking met de opgetreden sedimentatie- en erosievolumes. Het **directe** effect van baggeren en storten op de morfologische ontwikkeling van het interessegebied is dus beperkt. Hetzelfde geldt voor de uitbreiding van de haven van Zeebrugge: de directe morfologische effecten zijn vooral lokaal zichtbaar. Beide ingrepen hebben ook meer **indirecte** effecten.

De sedimentatie aan weerszijden van de Scheur tussen ca. xRD = 4-12 km (Figuur 3-5) tezamen met de verdieping van Scheur-Wielingen hebben mogelijk de sterke erosie van het

gebied direct ten noorden van de Scheur veroorzaakt. Volgens Cleveringa (2008) is hier een nieuwe getijgeul aan het ontstaan. Het is niet duidelijk hoe dit de morfologische ontwikkeling van het interessegebied beïnvloedt. Gezien de grootte van het erosiegebied en de nabijheid is het zeer waarschijnlijk dat het wel degelijk een invloed heeft. Mogelijk draagt het bij aan de sedimentatie, gezien het netto zandtransport in vloedrichting is (Figuur 4-8).

5.4 Zandtransporten

De transporten die met het Delft3D model zijn berekend laten zien dat in een groot deel van het interessegebied aan de zuidkant van de Vlake van de Raan sprake is van netto zandtransport in de vloedrichting. Terwijl de residuele stroming over het algemeen in ebrichting gericht is, zorgt getijasymmetrie met grotere pieksnelheden tijdens vloed voor vloeddominantie in termen van zandtransport.

Bodemveranderingen zijn met name het gevolg van subtiele gradiënten in het netto zandtransport, in plaats van uitgesproken convergentie- of divergentiepunten. De netto zandtransporten in de vloedrichting, in het bijzonder een afname ervan in oostelijke richting, corresponderen goed met de uitbouw van de westelijk gelegen bank in de vloedrichting. De noordwaartse uitbreiding van de bank tussen de ebschaar en de Spleet lijkt het gevolg van zandtransporten door de Spleet (oostwaarts) en vanaf de bank (noord-noordoostwaarts) die bij elkaar komen.

De berekeningen laten zien dat het netto zandtransport in de ebschaar relatief klein is en dat de richting van het netto transport varieert (Figuur 4-9). Dat wil zeggen dat de ebschaar in termen van zandtransport deels eb- en deels vloeddominant is. De berekende gemiddelde stroomsnelheid is in de hele ebschaar in de ebrichting, dus variaties worden veroorzaakt door vloeddominantie in termen van pieksnelheden (d.w.z. getij-asymmetrie).

Dat bepaalde delen van de ebschaar vloeddominant zijn is opvallend, omdat zandtransporten in een ebschaar normaal gesproken ebdominant zijn. Dit leidt tot onzekerheid over de kwaliteit van het gebruikte model om de sedimenttransporten in de ebschaar te reproduceren. Het morfodynamische model berekent namelijk ook niet de mate van erosie van de ebschaar die in de gemeten bodemverandering te zien is.

5.5 Ontwikkeling van de ebschaar

Het ontstaan van de ebschaar vanaf de jaren 1970 is waarschijnlijk de belangrijkste morfologische ontwikkeling in het zuidelijk deel van de Vlake van de Raan. Het heeft mogelijk te maken met de ontwikkeling van de Wielingen. Met name het zuidelijk gedeelte van de Wielingen is door de jaren heen aanzienlijk dieper geworden door menselijke ingrepen, op een directe en vooral indirecte wijze (zie paragraaf 5.3). Hierdoor is ruimte ontstaan (i.e. een luwere stroming langs de noordrand) voor een ebschaar en een tussenliggende rug (zie ook Cleveringa, 2008). Het ontstaan van deze ebschaar heeft er waarschijnlijk voor gezorgd dat de ondiepte tussen de ebschaar en de Spleet in noordelijke richting is verplaatst.

De ebschaar wijkt op een aantal punten af van de “klassieke” ebschaar zoals onder meer beschreven in Van Veen (1950). In de huidige bodemligging is de ebschaar te herkennen aan een opening aan de kant waar de ebstroming vandaan komt. De ebschaar is echter niet alleen ontstaan door het insnijden van een ondiepte door de ebstroming, maar ook door de ontwikkeling van een rug die de ebschaar scheidt van de Wielingen. De ontwikkeling van die rug wordt gestuurd door vloeddominant transport door getij-asymmetrie, d.w.z. door sterkere (piek)snelheden in de vloedrichting. Hierdoor heeft de rug zich vanuit het westen richting het oosten opgebouwd tussen de ebschaar en de Wielingen.

Mogelijk zorgt de aanwezigheid van harde lagen in de ondergrond er voor dat het westelijke beginpunt van de rug zo stabiel is. Waarschijnlijk heeft de ontwikkeling van de rug tussen de Wielingen en de ebschaar ervoor gezorgd dat de ebschaar in de afgelopen decennia naar het noorden is verplaatst. Die ontwikkeling wordt geremd of gestopt door de aanwezigheid van harde lagen in de ondergrond. Op basis van recente bodemopnames lijkt daar sinds 2017 sprake van.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Het interessegebied is gelegen tussen de ondiepte Raan in het noorden en de geul Wielingen in het zuiden. Vanaf 1800 ontwikkelt zich hier, samenhangend met de langjarige morfologische ontwikkelingen in het estuarium, een grote ebgeul die een reorganisatie van de geulen en zandbanken in gang zet. Tegen het einde van de 19^e eeuw neemt deze geul in omvang af; tegelijkertijd ontwikkelt zich de Geul van de Walvischstaart. Rond 1930 is de ebgeul afgesloten door de Sluissche Hompels, de restgeul heet nu De Spleet. Hierna is de situatie min of meer stabiel en vinden er niet meer dergelijke grootschalige veranderingen plaats.

De belangrijkste morfologische ontwikkelingen in het zuidelijke gedeelte van de Vlake van de Raan in de periode 1964-2020 zijn: i) het ontstaan van de ebschaar tussen de Spleet en de Wielingen, ii) de ontwikkeling van een bank die de ebschaar en de Wielingen scheidt, iii) een versmalling en verhoging van de ondiepte ten noorden van deze ebschaar. De verplaatsing van de ebschaar richting het noorden lijkt de laatste jaren tot een halt te zijn gekomen, waarschijnlijk door moeilijk-erodeerbare lagen.

De directe effecten van menselijke ingrepen op de morfologische ontwikkeling van het interessegebied is beperkt. Er is mogelijk wel sprake van indirect effecten. Het gaat dan om het dieper worden van de Scheur-Wielingen, en het ontstaan van een nieuwe getijgeul ten westen van Vlake van de Raan – zuid.

De netto zandtransporten in het gebied zijn over het algemeen in vloedrichting door de dominante invloed van getij-asymmetrie met grotere vloodsnelheden.

De vorm en ontwikkeling van de ebschaar wijkt af van de theorie. Zo is de ebschaar relatief recht van vorm en stabiel qua ligging. Dit is zeer waarschijnlijk voor een deel gekoppeld aan moeilijk-erodeerbare lagen. Als hypothese stellen we dat de ebschaar niet zozeer ontstaan is door het insnijden door de ebstroming, maar door het opbouwen van een zuidelijk gelegen bank in de vloedrichting.

6.2 Aanbevelingen

Samenhang tussen de ontwikkelingen in de Westerschelde en de monding

De veronderstelde samenhang tussen de langjarige ontwikkelingen in de Schelde-monding en de langjarige morfologische ontwikkelingen in het estuarium is een hypothese die verder onderzocht moet worden. Hiervoor is het gewenst een complete serie historische kaarten voor de periode 1800 – 1964 samen te stellen die de morfologische toestand van zowel de monding als het westelijk deel van de Westerschelde omvatten. Hierbij moeten alle beschikbare opnamen en een representatief aantal dieptecontouren gebruikt worden.

Naast een verdere uitwerking van de morfologische toestand van estuarium en monding, verdient het aanbeveling de gezamenlijke ontwikkeling verder te onderzoeken met behulp van een numeriek morfodynamisch model om de ontwikkeling van het getij in het zeegat en de monding als gevolg van de afnemende zijtakken en de morfologische reactie hierop te analyseren.

Morfodynamische modellering Schelde-monding

Een zogenaamde *hindcast* van de morfologische ontwikkelingen die in het verleden zijn opgetreden gaat enerzijds helpen om meer inzicht te krijgen in de sturende processen en geeft

anderzijds de mogelijkheid om het numerieke model te optimaliseren. Met een dergelijke hindcast wordt gepoogd om de morfologische ontwikkeling die vanaf 1964 in de Vaklodingen te zien is modelmatig te reproduceren. Zonder modelresolutie op te geven zal het echter niet haalbaar zijn om tientallen jaren aan morfologische ontwikkeling door te rekenen. Wel kunnen berekeningen uitgevoerd worden voor een aantal karakteristieke periodes in de ontwikkeling tussen 1964 en nu, door de initiële bodemligging in het model aan te passen. Een belangrijk aandachtspunt hierbij is de ligging van de moeilijk-erodeerbare lagen. Uit een vergelijking met de gemeten morfologische ontwikkeling lijken deze op een aantal plekken te diep in de modelbodem te liggen.

Opbouw van de ondergrond

De ondergrond speelt een belangrijke rol in de morfologische ontwikkeling van de Vlake van de Raan – zuid. Echter, de aanwezigheid, dikte en eigenschappen van erosie-resistente lagen zijn nog onzeker. Meer data zou hierbij helpen: bijvoorbeeld door middel van sidescan sonaropnamen voor het bepalen van de micromorfologie en sedimenttextuur aan het oppervlak, multibeam bathymetrie voor beter bepalen van de positie van de dagzomende lagen en boringen dichtbij de seismische lijnen om uitsluitsel te geven over de lithologie (zie ook Van der Vegt et al., 2021).

Zandtransportprocessen

In een groot deel van het interessegebied zijn de berekende snelheden en netto zandtransporten vloeddominant, zo ook in delen van de ebschaar. Dit is niet in lijn met het klassieke beeld van een ebschaar met netto zandtransport in de ebrichting, wat leidt tot onzekerheid over de kwaliteit van het gebruikte model. Om daar uitsluitsel over te krijgen en eventueel om het numerieke model te optimaliseren bevelen we aan om in de ebschaar en de aanpalende ruggen metingen te doen van de stroming en, waar mogelijk, zandtransportprocessen (b.v. bodemvormen en sedimentconcentraties in de waterkolom).

Pilotsuppletie

De morfodynamiek van de Vlake van de Raan – zuid is complex, met name door de invloed van harde lagen in de ondergrond en de atypische ontwikkeling van de ebschaar en de ruggen ten noorden en zuiden hiervan die we maar ten dele begrijpen. Dit maakt het tot een interessant gebied voor de pilotsuppletie, aangezien deze kennisontwikkeling als hoofddoelstelling heeft. De hierboven gegeven aanbevelingen zijn een belangrijke input voor het kennisprogramma rondom de pilotsuppletie, in het bijzonder de monitoring en de modellering.

7 Referenties

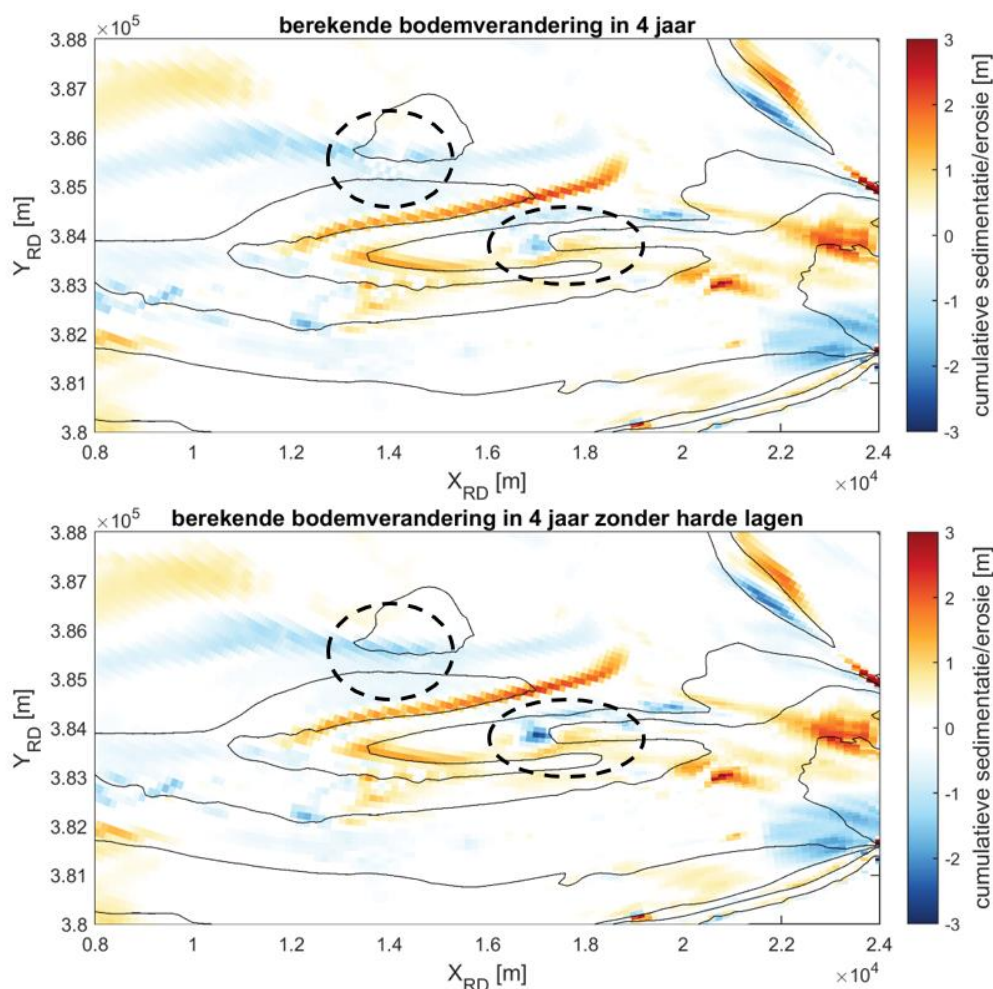
- Brand, E. (2016). The driving mechanisms behind morphological changes in the Western Scheldt mouth area over the past two centuries - a data analysis. Stagerapport Faculteit Geowetenschappen, Universiteit Utrecht, en Waterbouwkundig Laboratorium, Borgerhout.
- Cleveringa, J. (2008). Morphodynamics of the Delta coast (south-west Netherlands). Quantitative analysis and phenomenology of the morphological evolution 1964-2004. Rapport Alkyon A1881.
- De Maerschalck, B.; van der Werf, J.; Kolokythas, G.; Quataert, E.; Van Oyen, T.; Vroom, J.; Dijkstra, J.; Wang, Z.B.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Modellerling Belgische Kustzone en Scheldemonding: Deelrapport 2 – Morfologische analyse scenario's Vlaamse Baaien. Versie 4.0. WL Rapporten, 15_068_2. Waterbouwkundig Laboratorium & Deltares, Antwerpen.
- Excavator (1985). Deel I: de uitbreidingswerken van de haven van Zeebrugge, Deel II : de LNG terminal van Distrigas. Volume 4, pp 2-54.
- Nnafie, A., Van Oyen, T., De Maerschalck, B., van der Vegt, M., van der Wegen, M. (2018). Estuarine channel evolution in response to closure of secondary basins: An observational and morphodynamic modeling study of the Western Scheldt Estuary. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123. <https://doi.org/10.1002/2017JF004364>
- Nnafie, A., de Swart, H.E., De Maerschalck, B., Van Oyen, T., van der Vegt, M., van der Wegen, M. (2019). Closure of secondary basins causes channel deepening in estuaries with moderate to high friction. *Geophysical Research Letters* 46, 13.209–13.216. <https://doi.org/10.1029/2019GL084444>
- Rijkswaterstaat (zonder jaar). Mond Westerschelde. Film Iodigen van 1804 tot en met 1932. Situatie dieptelijnen in dm t.o.v. NAP. Schaal 1:100.000. Rijkswaterstaat, Studiedienst Vlissingen. (9 kaarten zonder toelichting)
- Peters, J.J. (2013). Ontstaan en ontwikkeling van platen en geulen in de Westerschelde. PowerPoint presentatie, toegang via <https://docplayer.nl/47395870-Ontstaan-en-ontwikkeling-van-platen-en-geulen-in-de-westerschelde.html> (download: 15 april 2021)
- Sutherland, J., Peet, A.H., Soulsby, R.L. (2004), Evaluating the performance of morphological models. *Coastal Engineering*, 51, 917-939. doi:10.1016/j.coastaleng.2004.07.015
- 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 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, Haarlem.
- Van der Slikke, M.J. (1999). Morfologische ontwikkeling Westerscheldemonding tot 2020, een fenomenologische visie. Rapport R99-11, IMAU, Universiteit Utrecht.
- Van der Vegt, H., Van Onselen, E., Van der Spek, A. (2021). Erosie-resistente lagen in het Westerschelde mondingsgebied en de invloed daarvan op de pilot-suppletie. Deltares rapport 11203725-001-ZKS-0012.
- Van der Werf, J.J., Damen, J.M., Roos, P.C., Vroom, J., Elias, E.P.L., Hulscher, S.J.M.H. (2020a). Erosion mechanism of the landward Oostgat tidal channel slope, The Netherlands. *Continental Shelf Research*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.104027>
- Van der Werf, J., Meijer – Holzhauer, H., Van der Spek, A., Van Weerdenburg, R., Craeymeersch, J., Tulp, I., Ysebaert, T. (2020b). Morfologie en ecologie van de Schelde-

- monding. Overzicht van bestaande kennis en data. Deltares rapport 11203725-000-ZKS-0018.
- Van der Werf, J., Van Weerdenburg, R., Van der Heijden, L., Meijer – Holzhauer, Taal, M. (2021). Pilotsuppletie Schelde-monding: afwegingskader en alternatieven voor suppletiezones. Rapport 11203725-000-ZKS-0022, Deltares, Nederland.
- Van Veen, J. (1950). Eb- en Vloedschaar Systemen in de Nederlandse Getijwateren. Tijdschrift Kon. Ned. Aardrijkskundig Genootschap, 67, 303-325.
- Van Weerdenburg, R., Van der Werf, J. (2021). Transportpaden in de Schelde-monding. SedTRAILS modellering ter voorbereiding op pilotsuppletie Schelde-monding. Rapport 11203725-000-ZKS-0022, Deltares, Nederland.
- 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. (1999). Tidal asymmetry and residual sediment transport in estuaries. A literature study and application to the Western Scheldt. Report Z2749, WL|Delft Hydraulics, The Netherlands.
- Zijl, F., Verlaan, M., Gerritsen, H. (2015). Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction. *Ocean Dynamics* (63), 826-847.

A Effect van moeilijk-erodeerbare lagen op de berekende morfologische ontwikkeling

In de modelberekeningen die in dit rapport (Hoofdstuk 4) zijn beschreven, zijn de effecten van harde lagen opgenomen door een beperkte dikte van het zandpakket. De dikte van het zandpakket is bepaald op basis van het verschil tussen de bodemhoogte en de diepte waar harde lagen in de ondergrond verwacht worden (Van der Vegt et al., 2021). Een locatie zal in het model niet verder eroderen als het volledige zandpakket al geërodeerd is.

Om het effect van harde lagen op de morfologische ontwikkeling te beoordelen is ook een morfodynamische berekening uitgevoerd zonder harde lagen in het model. In dat geval is de erosie in het hele modeldomein ongelimiteerd. De initiële bodemligging is gebaseerd op lodingen uit 2017. Verschillen in de berekende bodemverandering met en zonder (Figuur A.1) harde lagen laten zien dat harde lagen de bodemverandering op een tijdschaal van enkele jaren alleen lokaal beïnvloeden. Op twee plekken wordt de erosie gelimiteerd door de aanwezigheid van harde lagen. Deze twee plekken zijn met stippellijnen aangegeven in Figuur A.1. Buiten deze twee plekken is er geen directe invloed van harde lagen op de bodemveranderingen in de simulatieperiode van 4 jaar.



Figuur A.1 Berekende bodemverandering voor een periode van vier jaar waarbij de erosie wel (boven) en niet (onder) gelimiteerd wordt door de aanwezigheid van harde lagen.

B Pieksnelheden gedurende spring-doodtij cyclus

Verschillen tussen de maximale stroomsnelheid tijdens eb en de maximale stroomsnelheid tijdens vloed vormen een belangrijk mechanisme voor getij-gedreven netto zandtransport. Een manier om deze getij-asymmetrie inzichtelijk te maken is het per locatie weergeven van de maximale stroomsnelheidsvector in een bepaalde periode. De richting van de vector laat zien of de stroomsnelheden maximaal zijn tijdens eb of tijdens vloed.

In Hoofdstuk 4 (Figuur 4-13) zijn de pieksnelheden weergegeven voor een representatieve periode voor zandtransport (van 5 maart 23:50 tot 7 maart 00:40). Of de pieksnelheden maximaal zijn tijdens de eb- of vloedfase van het getij varieert gedurende de spring-doodtij cyclus. Om de gevoeligheid voor de gekozen getijperiode te illustreren tonen Figure B-1, Figuur B.2 en Figuur B.3 de maximale snelheidsvectoren bij respectievelijk springtij, gemiddeld tij en doodtij. De representatieve periode die in Hoofdstuk 4 is toegelicht ligt tussen springtij en gemiddeld tij in.

Bij springtij zijn de stroomsnelheden aan de zuidkant van de Vlake van de Raan maximaal tijdens vloed. Bij doodtij is de stroomsnelheid in delen van het interessegebied maximaal tijdens eb. Het gaat dan om de zuidelijke geulwand van de Wielingen, delen van de ebschaar en het centrale deel van de Vlake van de Raan (Figuur B.3). Bij gemiddeld tij is het aantal locaties met pieksnelheden tijdens eb iets groter dan bij springtij.

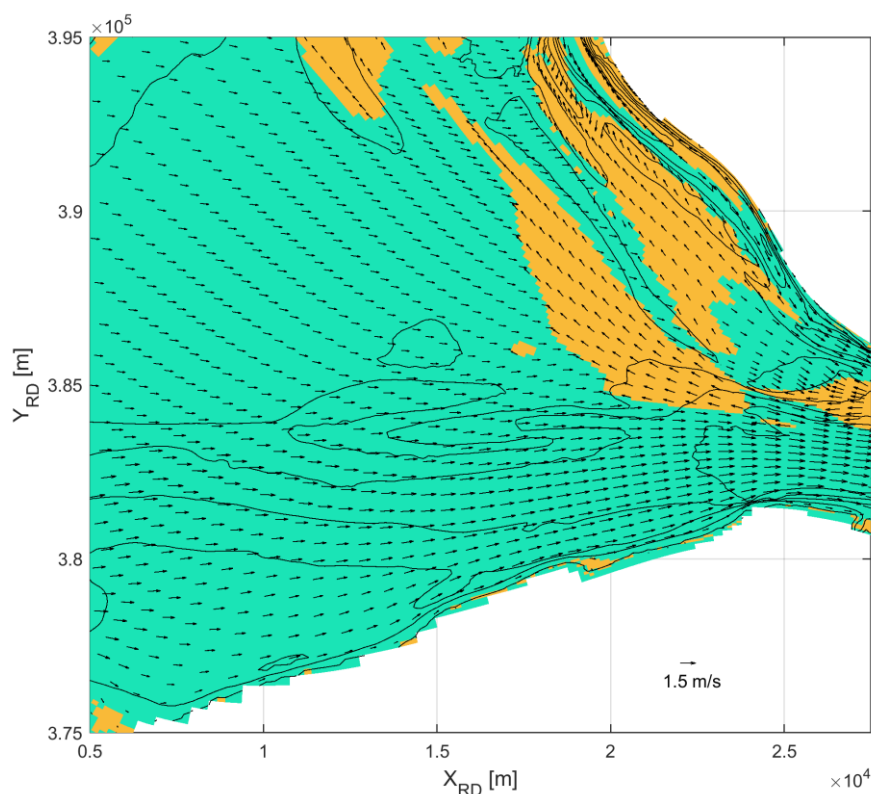
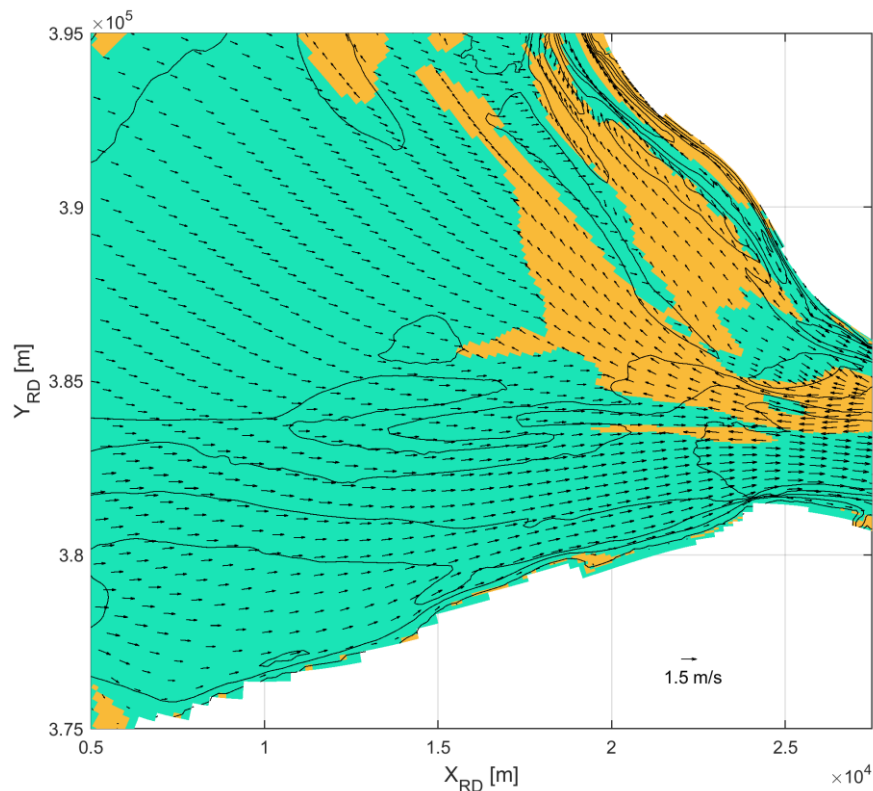
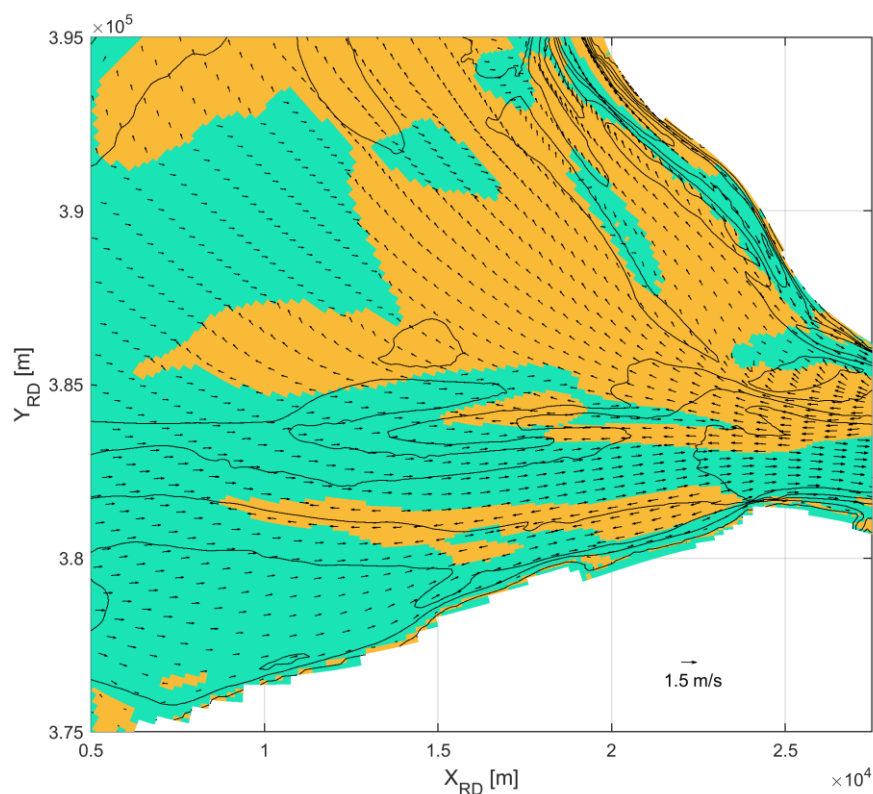


Figure B-1 Berekende pieksnelheden bij springtij rond 19 maart 2014. De groene gebieden zijn vloeddominant; de bruine gebieden ebdominant in termen van pieksnelheden.



Figuur B.2 Berekende pieksnelheden bij gemiddeld tij rond 22 maart 2014. De groene gebieden zijn vloeddominant; de bruine gebieden ebdominant in termen van pieksnelheden.



Figuur B.3 Berekende pieksnelheden bij doottij rond 26 maart 2014. De groene gebieden zijn vloeddominant; de bruine gebieden ebdominant in termen van pieksnelheden.

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