

Transportpaden in de Schelde-monding

SedTRAILS modellering ter voorbereiding op pilotsuppletie Schelde-monding



Transportpaden in de Schelde-monding

SedTRAILS modellering ter voorbereiding op pilotsuppletie Schelde-monding

Auteur(s)

Roy van Weerdenburg

Jebbe van der Werf

Interreg
North Sea Region
IMMERSE

European Regional Development Fund



EUROPEAN UNION

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

Transportpaden in de Schelde-monding

SedTRAILS modellering ter voorbereiding op pilotsuppletie Schelde-monding

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Zee en Delta locatie Middelburg
Contactpersoon	Marco Schrijver
Referenties	
Trefwoorden	Schelde-monding, pilotsuppletie, morfologie, sedimenttransport, Delft3D, SedTRAILS

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	11-03-2021
Projectnummer	11203725-001
Document ID	
Pagina's	50
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Roy van Weerdenburg	
	Jebbe van der Werf	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Roy van Weerdenburg	Edwin Elias	Toon Segeren	
	Jebbe van der Werf			

Samenvatting

Rijkswaterstaat heeft als doel meer kennis te ontwikkelen van de Schelde-monding middels een kennisprogramma waarin een pilotsuppletie in of nabij de monding een belangrijke rol speelt. Voor de pilotsuppletie zal maximaal 1,5 miljoen m³ sediment gebruikt worden. De zuidkant van de Vlake van de Raan is geselecteerd als voorkeurszone voor de suppletie.

Voor een afgewogen keuze van de exacte suppletielocatie is in dit onderzoek een gedetailleerde analyse uitgevoerd naar de sedimenttransportpatronen die aan de zuidkant van de Vlake van de Raan optreden. De sedimenttransporten zijn berekend met een Delft3D model van de Schelde-monding. De modelberekeningen zijn uitgevoerd voor representatieve condities (inclusief de bijdragen van getij, wind en golven) en met alleen getijforcering, zodat inzicht in de maatgevende processen wordt verkregen. Inzicht in de dominante transportpaden en -patronen is verkregen door het toepassen van SedTRAILS, waarbij SedTRAILS visualiseert hoe sedimentdeeltjes door het berekende vectorveld bewegen.

De resultaten van de Delft3D en SedTRAILS analyses laten zien dat de zuidkant van de Vlake van de Raan een overgangszone is die ingeklemd ligt tussen het plaatoppervlak van de Vlake van de Raan (ten noorden), de grote getijgeul Wielingen (ten zuiden) en de geul van de Walvischstaart (ten oosten). In elk van deze deelgebieden overheersen andere transportprocessen en -patronen. Op de Vlake van de Raan is het residuele sedimenttransport richting het noorden/noordoosten gericht. Golven hebben hier een belangrijk aandeel in het totale transport. In de Wielingen zijn de transporten veel groter en getijgedomineerd, een netto transport richting de Westerschelde overheerst in deze zone. In de Geul van de Walvischstaart is het netto transport zeewaarts gericht.

Afhankelijk van de exacte positionering van de pilotsuppletie ten opzichte van de Vlake van de Raan, de Wielingen en de Geul van de Walvischstaart zal deze in meer of mindere mate beïnvloed worden door de daar dominerende processen. De in deze studie gepresenteerde sedimenttransportpatronen vormen een goede basis voor de verdere afwegingen voor het bepalen van de locatie en het ontwerp van de pilotsuppletie.

Summary

Rijkswaterstaat aims to develop more knowledge about the mouth of the Scheldt estuary by means of a knowledge program, in which a pilot nourishment at or near the mouth of the estuary plays an important role. The maximum amount of sediment that will be used for the pilot nourishment is 1.5 million m³. The southern edge of the Vlake van de Raan has been selected as the preferred zone for the nourishment.

For considerations about the exact location of the pilot nourishment, the sediment transport patterns occurring along the southern edge of the Vlake van de Raan are analysed in this study. Sediment transport rates in the mouth of the Scheldt estuary are computed by numerical modelling in Delft3D. Model simulations were performed for representative conditions (including contributions of tides, waves and wind) and with only tidal forcing, which provides insight in the governing processes for sediment transport. Applying SedTRAILS provides insight in dominant sediment pathways and patterns, since SedTRAILS visualizes how sediment particles move through the computed vector field.

The Delft3D and SedTRAILS results show that the southern edge of the Vlake van de Raan is a transition zone that is surrounded by the shoal area of the Vlake van de Raan (in the north), the Wielingen tidal channel (in the south), and the Geul van de Walvischstaart (in the east). The dominant processes and transport patterns are different for each of these areas. On the central Vlake van de Raan area, the residual sediment transport is directed towards the north/northeast, and waves are relatively important in generating (net) sediment transport. In the Wielingen channel, sediment transport rates are large and tide-dominated, and the residual transport in this channel is directed towards the Western Scheldt. The sediment transport in the Geul van de Walvischstaart is ebb-dominant, such that the residual sediment transport is directed seaward.

Depending on the exact location of the pilot nourishment relative to the Vlake van de Raan, the Wielingen and the Geul van de Walvischstaart, the development of the nourishment will be governed by the processes that are dominant in these areas. The sediment transport patterns that are presented in this study will form a sound basis for further considerations about the exact location and the design of the pilot nourishment.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Summary	5
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doelstelling	7
1.3	Aanpak en leeswijzer	7
2	Methode en modelopzet	9
2.1	Wat is SedTRAILS?	9
2.2	Modelschematisatie in Delft3D	10
2.2.1	Rekenrooster en modelbodem	11
2.2.2	Randvoorwaarden	12
2.2.3	Golfklimaat	13
2.2.4	Modelinstellingen	15
2.2.5	Modelvalidatie	15
2.3	Keuze simulatieperiode	16
2.4	SedTRAILS startlocaties	18
3	Resultaten	20
3.1	Sedimenttransportpaden door getij en golven	20
3.1.1	Delft3D transportvelden	20
3.1.2	SedTRAILS resultaten	21
3.1.3	Transportcapaciteit	25
3.2	Bijdrage van golven in sedimenttransport	27
3.3	Gevoeligheid voor korrelgrootte	31
4	Discussie	34
4.1	Geschiktheid van het Delft3D model	34
4.2	Interpretatie van de resultaten voor het ontwerpen van de suppletie	36
5	Conclusies en aanbevelingen	38
5.1	Sedimenttransportpaden in de Schelde-monding	38
5.2	Vervolgstappen en aanbevelingen	38
6	Referenties	40
A	Bijlage	41
A.1	Residueel transport bij afzonderlijke golfcondities	41

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Rijkswaterstaat stelt voor meer kennis te vergaren van de Schelde-monding middels een kennisprogramma tot 2026 waarin een pilotsuppletie in of nabij de monding een belangrijke rol speelt. Voor de pilotsuppletie zal maximaal 1,5 miljoen m³ sediment gebruikt worden. Directe baten van het project zijn het toevoegen van zand aan het kustfundament en het doen van praktijkervaring met het uitvoeren van een suppletie in de monding van een estuarium. De verwachte baten in de kennisontwikkeling volgen uit de monitoringsresultaten en het gekoppelde onderzoek. Deze beogen inzicht te geven in zowel het morfologische als het ecologische functioneren van de Schelde-monding, ten behoeve van de algemene systeemkennis en kalibratie en validatie van rekenmodellen.

Voor het uitvoeren van de praktijkproef moet een geschikte suppletie worden ontworpen aan de zuidkant van de Vlakte van de Raan. De zuidkant van de Vlakte van de Raan is eerder als voorkeurszone aangewezen voor de suppletie (Van der Werf et al., 2020). Het doel is om begin 2021 een keuze te maken voor de precieze locatie én het ontwerp van de suppletie, waarna de pilotsuppletie in 2021-2022 wordt voorbereid en in 2023 wordt uitgevoerd. In 2021-2022 zal de T0 monitoring worden uitgevoerd. In de jaren 2023 t/m 2025 worden de morfologische en ecologische ontwikkelingen gemonitord. De evaluatie van de suppletie zal in 2026 worden opgesteld.

Met inzicht in de sedimenttransportpatronen in de Schelde-monding kan een verwachting worden uitgesproken hoe een suppletie op een bepaalde locatie zich zal ontwikkelen, en door welke fysische processen die ontwikkeling gestuurd zal worden. Op die manier kan een suppletie ontworpen worden, zodat de monitoringsresultaten en het gekoppelde onderzoek bij gaan dragen aan het beantwoorden van de opgestelde kennisvragen voor het sedimentbeheer in het Schelde-estuarium (zie Van der Werf et al. 2020).

1.2 Doelstelling

De doelstelling van de studie die in dit rapport wordt beschreven is: *inzicht krijgen in de sedimenttransportpatronen in de Schelde-monding en het ontrafelen van de bijdragen van de afzonderlijke processen.*

Sedimenttransport aan de zuidkant van de Vlakte van de Raan krijgt daarbij de meeste aandacht, omdat de locatie van de pilotsuppletie in die zone gekozen zal worden.

1.3 Aanpak en leeswijzer

Om bij te dragen aan de doelstelling worden sedimenttransportberekeningen uitgevoerd met een Delft3D model. Met dit model kan het sedimenttransport door getij, golven, opzet en wind berekend worden. Het model wordt beschreven in Hoofdstuk 2. De Delft3D modelresultaten worden gebruikt om sedimenttransportpaden te visualiseren met SedTRAILS. Wat SedTRAILS is en hoe het in deze studie gebruikt wordt, is ook opgenomen in Hoofdstuk 2.

De resultaten van de transportberekeningen en de visualisaties met SedTRAILS zijn opgenomen in Hoofdstuk 3 van dit rapport. Eerst worden de sedimenttransporten door getij, wind en golven besproken. Door vervolgens vergelijkbare resultaten te bekijken zonder de

bijdrage van golven in het totale sedimenttransport wordt duidelijk hoe groot de bijdrage van golven op verschillende plekken in de Schelde-monding is. Als gevoeligheidsonderzoek worden ook de sedimenttransportpaden van een grovere zandfractie berekend en gevisualiseerd.

In Hoofdstuk 4 wordt besproken hoe de resultaten kunnen bijdragen aan het ontwerpen (inclusief het bepalen van de precieze locatie) van de pilotsuppletie in de Schelde-monding. Daarbij wordt nog eens kritisch naar het gebruikte Delft3D model gekeken. Conclusies over de sedimenttransportpaden in de Schelde-monding en aanbevelingen voor vervolgonderzoek zijn onderdeel van Hoofdstuk 5.

2 Methode en modelopzet

2.1 Wat is SedTRAILS?

Deze paragraaf is voor een groot deel gebaseerd op de Nederlandstalige samenvatting in de uitgebreide beschrijving van SedTRAILS door Elias & Pearson (2020).

SedTRAILS is geen nieuwe simulatiesoftware, maar is ontwikkeld als een nabewerking op de resultaten van bestaande sedimenttransportmodellen (zoals Delft3D). Op basis van de berekende sedimenttransportvectoren worden sedimenttransportpaden berekend. Deze paden illustreren hoe sediment zich mogelijk verplaatst en stellen ons in staat fenomenen zichtbaar te maken, zoals:

- Waarheen sediment van een bepaalde bron verspreidt;
- Vanwaar het sediment komt dat op bepaalde plekken accumuleert;
- Langs welke wegen het sediment zich verplaatst tussen twee punten;
- Waar sedimentbronnen uniek of dominant zijn voor specifieke plaatsen.

Met reguliere visualisatie van Delft3D modelresultaten zouden vragen hierover niet direct kunnen worden beantwoord. Er zouden aanvullende “particle-tracking” simulaties, met software zoals Delft3D PART, moeten worden gemaakt. Een nadeel van Delft3D PART is dat alleen de Partheniades-Krone transportformule voor cohesief sediment kunnen worden gebruikt. Hierdoor is een directe vergelijking met Delft3D resultaten voor zandtransport niet mogelijk, waarvoor gewoonlijk de Van Rijn formules voor zandtransport worden gebruikt. SedTRAILS maakt gebruik van de door Delft3D berekende sedimenttransportvectoren; alleen de resulterende verplaatsing van de sedimentdeeltjes wordt berekend. Groot voordeel van deze nabewerking is dat er geen aanvullende modelsimulaties nodig zijn. Dit maakt de SedTRAILS methode snel en efficiënt.

Het is belangrijk te begrijpen dat SedTRAILS niet de verplaatsing van een individueel deeltje berekent (geen particle-tracking). SedTRAILS visualiseert hoe deeltjes zich door een al berekend transportveld verplaatsen. Dat transportveld is een combinatie van bodemtransport en suspensief transport. Uitwisseling met de bodem wordt niet meegenomen. Deze uitwisseling vormt in werkelijkheid wel een belangrijk onderdeel van de verplaatsing van het sediment. In de huidige implementatie van SedTRAILS is de verplaatsingssnelheid niet gekalibreerd. Het berekende transportpad, de route die het sediment volgt, zal gelijk zijn aan die berekend wordt met een particle tracking model. Hoe lang het duurt om van begin tot eind van dat pad te reizen volgt niet uit SedTRAILS. De resultaten worden daarom uitgedrukt in relatieve mobiliteit. Een lang transportpad betekent dat deeltjes sneller bewegen dan een kort transportpad.

SedTRAILS kan worden toegepast op de resultaten van elk proces-gebaseerd model voor sedimenttransport. De enige voorwaarde is dat de sedimenttransport-vectoren in voldoende detail worden weggeschreven. Het maakt dan niet uit of deze vectoren berekend zijn met bijv. Delft3D 4, XBeach, Delft3D FM, Mike, Finel of Telemac. Qua toepassing maakt het karakter van het systeem niet uit. Het werkt voor een rechte kust, maar b.v. ook bij een zeegat. Feit blijft wel dat SedTRAILS ontwikkeld is voor complexe morfologische systemen zoals zeegaten en estuaria. Dergelijke systemen zijn uitgestrekt en hebben lange tijdschalen van morfologische ontwikkeling.

Morfologische voorspellingen op de schaal van zulke complexe morfologische systemen zijn vaak rekenintensief. Dat maakt de systemen lastiger te bestuderen met proces-gebaseerde

modellen. Er zijn namelijk compromissen nodig tussen rekentijd, resolutie, data voor afregeling, een formulering voor sedimenttransport (bv. Van Rijn) en het aantal simulaties. Als dieptegemiddelde modellen met beperkte resolutie gedraaid worden, blijft (bij die complexe morfologische systemen zoals zeegaten) de vraag of zo'n model de onderliggende fysica op de schaal van kleinere morfologische elementen (geulen en platen) wel voldoende bevat om tot realistische voorspellingen te komen. Ook andere bestaande instrumenten, zoals algemene denkmodellen en empirische relaties geven niet het detail dat nodig is. In deze systemen heeft SedTRAILS toegevoegde waarde, omdat transportberekeningen voor een korte worden opgeschaald naar ruimtelijke resultaten die representatief zijn voor een lange periode. In systemen met geringe complexiteit (bijv. een rechte kust) heeft de SedTRAILS aanpak waarschijnlijk minder toegevoegde waarde. Hier geven de sedimenttransport vectoren al voldoende inzicht.

Twee recente toepassingen van SedTRAILS zijn (1) de verspreiding van sediment nabij de monding van de Columbia River en (2) de sedimentuitwisseling rond de diepe Put van Hansweert in de Westerschelde (Elias & Pearson, 2020).

1. Bij de Columbia River is gekeken naar de optimale stortlocatie om het eroderende naastliggende strand te voeden. Het rechtstreeks aanbrengen van sediment op het strand is kostentechnisch niet mogelijk. Met behulp van Delft3D modellering en SedTRAILS zijn ca 19.000 transportpaden berekend over een representatief getij- en golfklimaat, onder verschillende rivierafvoeren. De resultaten gaven inzicht in hoe gebieden onderling verbonden zijn en onder welke condities er uitwisseling tussen de gebieden plaatsvindt.
2. Voor de Put van Hansweert is SedTRAILS ingezet om een al opgesteld conceptueel model te toetsen. Daarnaast is de samenhang tussen morfologische elementen gevisualiseerd. Dat gebeurde via 'connectiviteit', waarmee het mogelijk was de samenhang statistisch te onderzoeken. Connectiviteit is een van de vele statistische instrumenten die beschikbaar zijn om de resultaten van SedTRAILS nader te duiden.

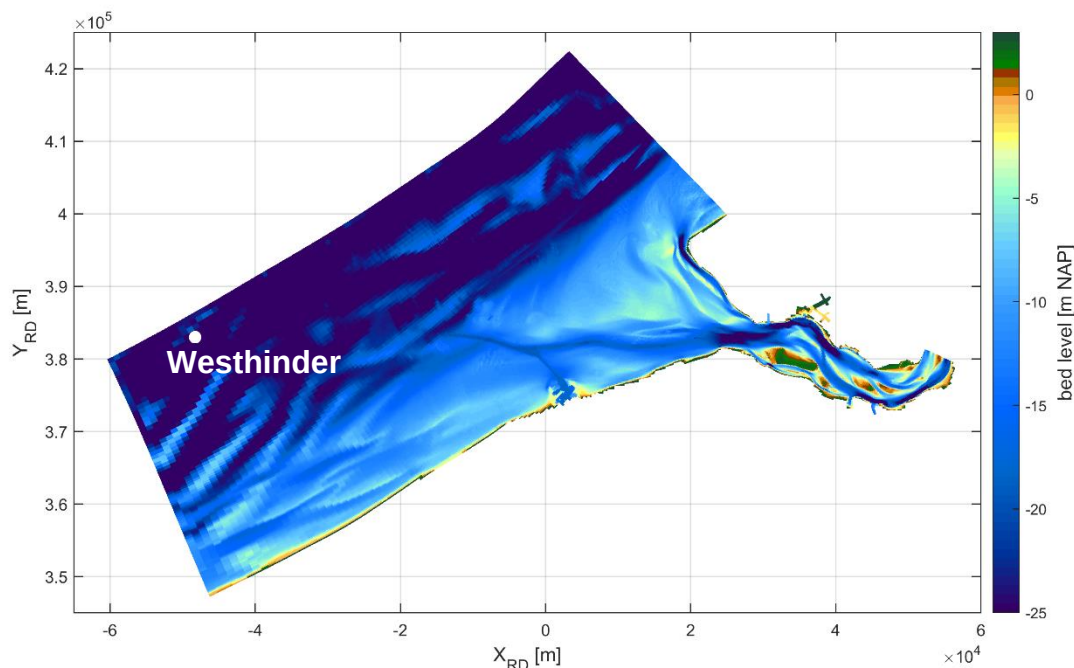
In deze studie wordt SedTRAILS ingezet als nabewerking op sedimenttransportberekeningen in Delft3D, met als doel om de sedimenttransportpaden in de Schelde-monding inzichtelijk te maken. Voor de Delft3D berekeningen wordt gebruik gemaakt van een representatieve getijconditie en een geschematiseerd golfklimaat. Dat wordt in het vervolg van dit hoofdstuk verder toegelicht. In de analyse van de SedTRAILS resultaten wordt aandacht besteed aan de bijdrage van getij en golven aan de transportpaden. Als gevoeligheidsonderzoek worden ook de transportpaden van een andere zandfractie gevisualiseerd (zie Hoofdstuk 3).

2.2 Modelschematisatie in Delft3D

Het ZWeM (Zeebrugge en Westerschelde Monding) model dat is beschreven door Vroom et al. (2016) wordt als uitgangspunt gebruikt voor de modellering in Delft3D. Het modeldomein is weergegeven in Figuur 2.1. De waterbeweging en sedimenttransporten die door dit model worden berekend zijn uitgebreid gevalideerd met de beschikbare velddata. Dit model is eerder toegepast in onderzoek naar sedimentdynamiek rond de haven van Zeebrugge en in de Schelde-monding (Vroom et al., 2016). Dit maakt dat het model een goed uitgangspunt is voor de Delft3D modellering in deze studie. Op de eerder uitgevoerde modelvalidatie wordt nader ingegaan in Paragraaf 2.2.5.

In deze studie wordt een tweedimensionale (2D) versie van het Delft3D model gebruikt voor het modelleren van zandtransport. Slibfracties blijven buiten beschouwing, waardoor het niet nodig is om een driedimensionale (3D) versie van het model te gebruiken. Met het Delft3D model wordt het sedimenttransport (zand) voor verschillende scenario's berekend. De berekende transportvelden worden vervolgens met SedTRAILS gevisualiseerd. De

uitgevoerde berekeningen in Delft3D zijn morfostatistisch. Dit betekent dat de bodemhoogte en de beschikbaarheid van sediment niet worden aangepast ten gevolge van het berekende zandtransport. Zo een aanpassing van de morfologie is in dit geval niet nodig, omdat maar een korte periode gemodelleerd wordt, waardoor het effect van berekende morfologische veranderingen op de waterbeweging (d.w.z. forcering) verwaarloosbaar klein is.



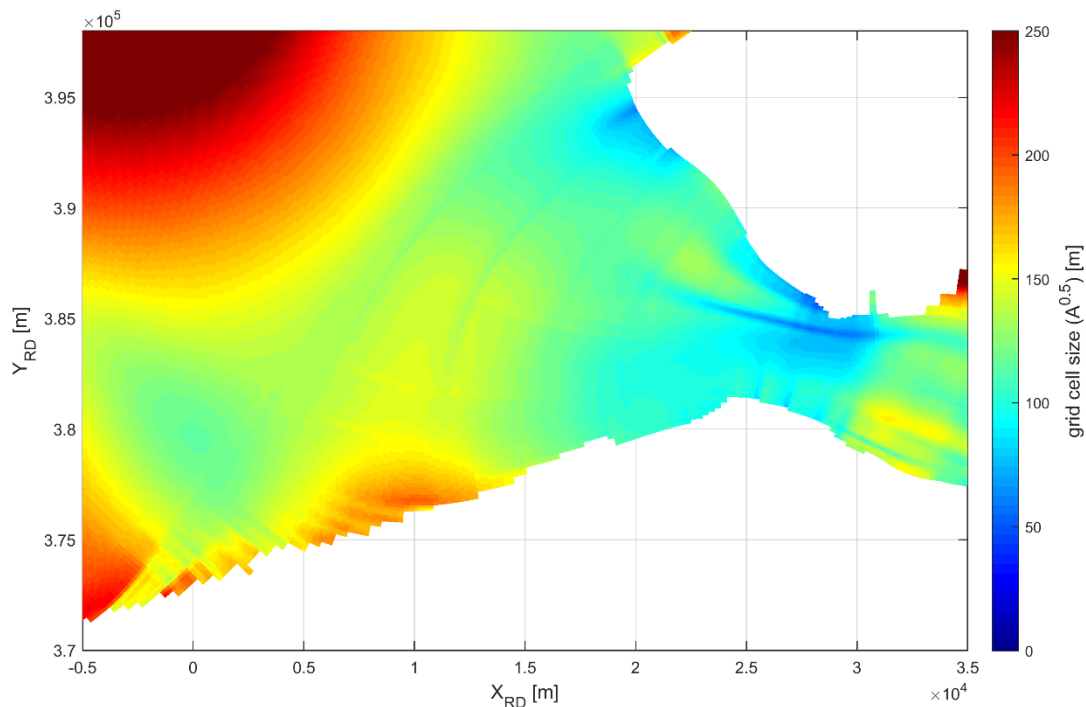
Figuur 2.1 Modeldomein van het Delft3D model dat in deze studie wordt toegepast. De kleurenschaal toont de bodemligging in het model. De bodemhoogte is gebaseerd op Vaklodgingen uit 2017. De randvoorwaarde voor golven is gebaseerd op gemeten golven bij Westhinder.

2.2.1 Rekenrooster en modelbodem

Het rekenrooster is in beperkte mate aangepast ten opzichte van het rekenrooster dat is toegepast door Vroom et al. (2016), zodat de roosterlijnen minder sterk convergeren richting de haven van Zeebrugge. Het convergeren van de roosterlijnen zorgt voor een verfijning van rekencellen. Dit was relevant voor het onderzoek naar sedimenttransport rond de haven van Zeebrugge, maar voor de huidige toepassing is het beter om de roostercellen gelijkmatiger over het interessegebied te verdelen. De haven van Zeebrugge ligt net buiten het interessegebied.

Er bestaan meerdere versies van het rekenrooster, die van elkaar verschillen in resolutie. De resolutie van het grove rooster is ongeveer 250 m in het interessegebied. In het fijne rooster zijn de roostercellen 2x2 verfijnd, zodat de resolutie in het interessegebied ongeveer 120 m is. De roosterresolutie in het fijne rooster is weergegeven in Figuur 2.2.

Het modeldomein van het golfmodel is gelijk aan het domein van het stromingsmodel. Het golfmodel maakt gebruik van hetzelfde rekenrooster (d.w.z. met dezelfde resolutie) als het stromingsmodel.



Figuur 2.2 Resolutie van het fijne rekenrooster in het interessegebied. De kleurenschaal toont de wortel van de oppervlakte van de rekencellen ($A^{0.5}$) als maat voor de grootte van de cellen.

De bodemhoogte in het model is ten opzichte van Vroom et al. (2016) aangepast met recente bodemdata. Voor een groot deel van de Schelde-monding en voor de Westerschelde zijn lodingen uit 2017 gebruikt. Op dieper water (d.w.z. ruim voorbij de -20 m lijn) en ten zuiden van de haven van Zeebrugge is de bodemhoogte overgenomen uit de eerdere versie van het model. De bodemhoogte op het fijne rekenrooster is weergegeven in Figuur 2.1.

2.2.2 Randvoorwaarden

Hydrodynamische randvoorwaarden op de drie zeewaartse randen van het modeldomein zijn afgeleid uit het DCSMv6-ZUNOV4 model met Kalmanfiltering (Zijl et al., 2015). De randvoorwaarden zijn beschikbaar voor het jaar 2014. Op de noordwestelijke rand (d.w.z. kustparallel) is een waterstandsrand opgelegd. Op de zuidwestelijke en noordoostelijke randen (d.w.z. kustdwars) worden Riemann invarianten opgelegd. Op de rand in de Westerschelde worden debieten opgelegd voor twee segmenten, namelijk het Gat van Ossenisse en het Middelgat. De debieten zijn ook uit het DCSMv6-ZUNOV4 model afgeleid en worden proportioneel met de waterdiepte verdeeld over de roostercellen binnen het segment. Deze randvoorwaarden zijn gelijk aan de randvoorwaarden die zijn gebruikt door Vroom et al. (2016).

Randvoorwaarden voor de saliniteit worden opgelegd op alle open modelranden. Voor de zeewaartse randen zijn MWTL (d.w.z. Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands) metingen gebruikt bij Walcheren 20 km uit de kust en Walcheren 2 km uit de kust. Voor de saliniteit op de modelrand in de Westerschelde is data van het meetpunt Overloop van Hansweert gebruikt.

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. Die transportcapaciteit volgt uit de transportvergelijking en de hydrodynamische condities.

2.2.3 Golfklimaat

Voor de SedTRAILS analyse worden 16 verschillende golfcondities doorgerekend met een SWAN golfmodel. Voor elke golfconditie wordt een afzonderlijke modelberekening uitgevoerd. Vervolgens wordt een gewogen gemiddelde genomen van de berekende sedimenttransporten bij verschillende golfcondities. De 16 golfcondities volgen uit een schematisatie van het gemeten golfklimaat bij Westhinder in 2014. Westhinder ligt in de noordwestelijke hoek van het modeldomein ($X_{RD} = -4.83e^4$ m, $Y_{RD} = 3.83e^5$ m, zie Figuur 2.1). De geschematiseerde golfcondities bij Westhinder worden als randvoorwaarden op de hele zeewaartse modelrand opgelegd. Uit een analyse door Vroom et al. (2016) bleek dat randvoorwaarden op basis van de metingen bij Westhinder betere resultaten geeft in het interessegebied dan op basis van metingen bij Europlatform of Schouwenbank (Europlatform ligt aan de noordkant van de Voordelta, ongeveer 30 km ten westen van Hoek van Holland; Schouwenbank ligt nabij het meest noordelijke punt van het modeldomein (zie Figuur 2.1)).

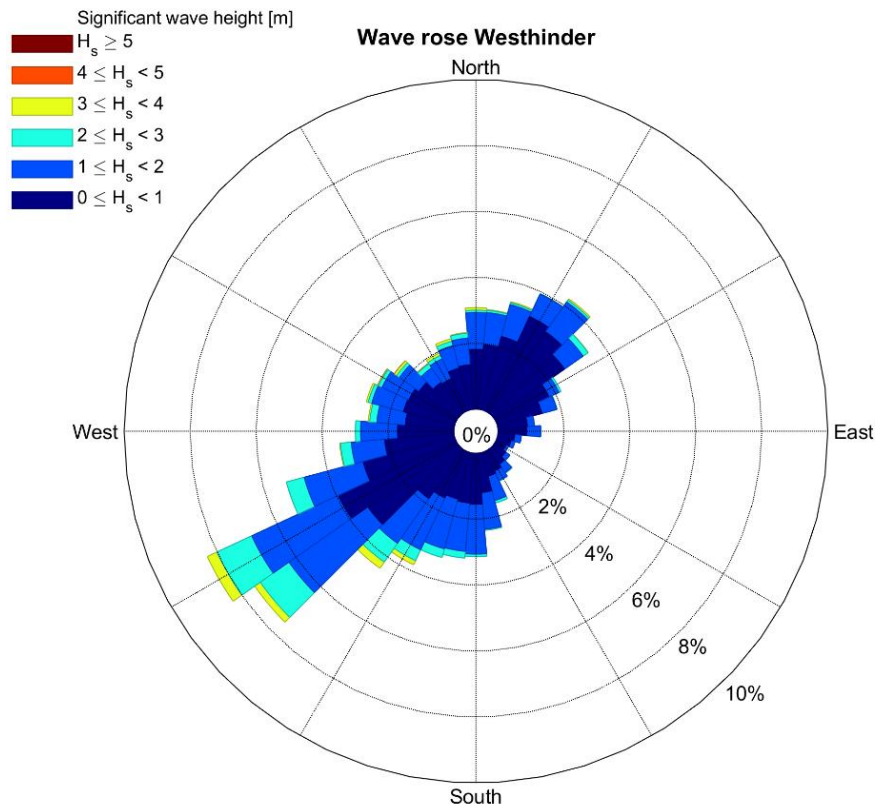
De gemeten golfcondities (d.w.z. significante golfhoogte en golfrichting) bij Westhinder in 2014 is weergegeven in een golfroos in Figuur 2.3. Uit de golfroos blijkt dat golven bij Westhinder vaak uit het noordoosten of het zuidwesten komen. Hoge golven komen voornamelijk uit het zuidwesten. Voor de schematisatie van het golfklimaat zijn de golfcondities in Figuur 2.3 eerst opgeknipt in zes delen van 60° . Vervolgens is elk deel opgesplitst in vier golfklassen op basis van de golfhoogte:

1. Golven met een hoogte tot 1 m
2. Golven met een hoogte tussen 1 en 2 m
3. Golven met een hoogte tussen 2 en 3 m
4. Golven met een hoogte groter dan 3 m

Totaal zijn er dan 24 golfklassen (d.w.z. 6 delen en 4 klassen per deel). Voor elk van de golfklassen is op basis van de CERC formuleringen (Shore Protection Manual, 1984) een representatieve golfconditie bepaald (d.w.z. golfhoogte, voortplantingsrichting en golfperiode). Om een representatieve golfconditie voor sedimenttransport te bepalen wordt in de CERC formuleringen aangenomen dat sedimenttransport zich verhoudt tot de golfhoogte tot de macht 2,5.

Elke golfklasse krijgt ook een weegfactor op basis van hoe vaak die golven in die klasse voorkomen in de meting. Golfklassen met een weegfactor kleiner dan 0.5% worden buiten beschouwing gelaten in de schematisatie van het golfklimaat. Hierdoor blijven 16 van de 24 golfklassen over. Dit betekent dat de golfklasse met hoge golven uit het oosten komt te vervallen, omdat die golven haast niet voorkomen in de meting. De 16 overgebleven golfcondities zijn opgenomen in Tabel 2.1. De weegfactoren van de 16 overgebleven golfcondities zijn door middel van een vermenigvuldigingsfactor (gelijk voor alle golfcondities) verhoogd, zodat het totaal van alle weegfactoren op 100% uitkomt.

De windcondities die in het model worden opgelegd passen bij de golfklassen. Per golfklasse zijn de gemiddelde windcondities bepaald op basis van metingen bij meetstation Vlissingen. De windcondities worden uniform toegepast in het hele modeldomein. De windsnelheid en de windrichting per golfklasse zijn opgenomen in Tabel 2.1.



Figuur 2.3 Golfroos van de gemeten golfcondities bij Westhinder in 2014. Onderliggende data is afkomstig uit het Meetnet Vlaamse Banken (zie <https://meetnetvlaamsebanken.be/>).

Tabel 2.1 Karakteristieken van de zestien golfcondities die in het Delft3D model worden toegepast en de kans van voorkomen (laatste kolom) van elk van de golfcondities. De kans van voorkomen wordt gebruikt om het gewogen gemiddelde van de verschillende golfcondities te bepalen.

	Golfhoogte [m]	Golfrichting [°N]	Golfperiode [s]	Windsnelheid [m/s]	Windrichting [°N]	Weegfactor [%]
1	0,65	32	5,8	2,3	36	15,3
2	0,69	82	5,8	2,0	38	5,2
3	0,74	158	4,3	5,0	147	4,5
4	0,71	215	4,5	4,5	194	12,8
5	0,67	265	5,2	3,1	242	12,8
6	0,65	328	5,8	1,6	290	7,9
7	1,37	26	6,1	4,5	20	5,3
8	1,36	83	6,0	6,2	78	1,7
9	1,37	163	4,8	8,8	154	3,3
10	1,44	215	5,5	8,2	202	12,2
11	1,48	265	5,7	7,2	244	7,6
12	1,46	332	6,2	4,1	316	4,5
13	2,40	223	6,8	11,8	214	3,4
14	2,39	255	6,7	10,6	244	2,0
15	2,30	331	7,01	6,69	324	0,7
16	3,27	225	7,49	15,10	218	0,8

2.2.4 Modelinstellingen

Belangrijke instellingen voor de modelberekeningen zijn opgenomen in Tabel 2.1. Om te voorkomen dat modelberekeningen op het fijne rekenrooster instabiel worden is de tijdstap een factor 2 verkleind ten opzichte van modelberekeningen op het grove rekenrooster. Alle andere instellingen zijn gelijk voor de beide rekenroosters.

Veel van de instellingen zijn overgenomen uit het ZWeM model (Vroom et al., 2016; De Maerschalck et al., 2017). De factoren *SusW*, *BedW* en *AlfaBn* zijn gebaseerd op het Delft3D-NeVla model (Van der Wegen et al., 2017) en het VlaBa model (Röbke et al., 2018) die, anders dan het ZWeM model, gericht waren op de (lange-termijn) morfologische ontwikkeling van het Schelde-estuarium. De schalingsfactor *Sus*, die naar verwachting het meeste invloed heeft op de berekende transporten vanwege de dominantie van stromingsgerelateerd suspensietransport, had in al deze studies een waarde van 0,5.

In modelberekeningen met golven vindt de koppeling tussen de golf- en stromingsmodules van het model elk uur plaats. Alle andere instellingen van het golfmodel zijn overgenomen uit Vroom et al. (2016).

Tabel 2.2 Basisinstellingen van hydrodynamische- en transportberekeningen in het Delft3D model.

Modelinstelling	Grof rekenrooster	Fijn rekenrooster
Tijdstap (Dt)	30 s	15 s
Viscositeit (Vicouv)	1 m ² /s	
Diffusiviteit (Dicouv)	10 m ² /s	
Transportvergelijking	Van Rijn (2007)	
Korrelgrootte (SedDia)	2e ⁻⁴ m	
Schalingsfactor suspensief transport (Sus)	0.5	
Schalingsfactor bodemtransport (Bed)	0.5	
Schalingsfactor golfgedreven suspensief transport (SusW)	0.3	
Schalingsfactor golfgedreven bodemtransport (BedW)	0.3	
Factor bodemtransport helling in stroomrichting (AlfaBs)	1	
Factor bodemtransport helling in dwarsrichting (AlfaBn)	100	

2.2.5 Modelvalidatie

Het hierboven beschreven Delft3D model is gebaseerd op het 3D ZWeM model beschreven in Vroom et al. (2016) en de modelinstellingen van het Delft3D-NeVla model (Van der Wegen et al., 2017) en het Delft3D-VlaBa model (Röbke et al., 2018). Het model is voor deze studie niet aanvullend gevalideerd.

Het ZWeM model is hydrodynamisch gekalibreerd voor het jaar 2014. Het berekent de waterstanden in de Schelde-monding (13 locaties) met een gemiddelde absolute *bias* van 0,05 m. De zogeheten *unbiased root-mean-square error* (URMSE), die aangeeft hoe goed een model de tijdsfluctuaties reproduceert, heeft een gemiddelde absolute waarde van 0,08 m. De magnitude van de diepte-gemiddelde snelheden (7 locaties) wordt berekend met een gemiddelde absolute *bias* van 0,03 m/s, en een gemiddelde absolute URMSE van 0,10 m/s. Voor de validatie zijn snelheidsmetingen gebruikt op vier meetpunten in de Schelde-monding tijdens een meetcampagne in 2014 (Plancke et al., 2014) en snelheidsmetingen bij permanente observatiepunten Wandelaar, Bol van Heist en Scheur Wielingen.

Het ZWeM model berekent de golfhoogte bij 6 meetstations met een gemiddelde correlatiecoëfficiënt, $R^2 = 0,83$. De correlatiecoëfficiënt is hoger voor meetstations aan de zuidkant van de Schelde-monding dan voor meetstations aan de noordkant van de Schelde-monding (minimum $R^2 = 0,77$ voor station Deurloo).

Het model reproduceert baggeren en storten van zand en slib (voor het jaar 2014) binnen een factor 2, in zowel zandige, hoogenergetische gebieden (geulen in de Westerschelde) als in slib-gedomineerde gebieden (Pas van het Zand, haven van Zeebrugge).

De Delft3D-NeVla en VlaBa modellen, waar de transportinstellingen mede op gebaseerd zijn (zie Sectie 2.2.4), zijn op een vergelijkbare wijze hydrodynamisch gekalibreerd. Daarnaast zijn deze modellen morfologisch gekalibreerd (lange-termijn; 10 jaar en meer).

Volgens Van der Wegen et al. (2017) 'reflecteert' het NeVla model de belangrijkste morfologische ontwikkelingen tussen 1963 en 2011. De morfodynamiek van het mondingsgebied wordt minder goed gereproduceerd dan het meer "geforceerde" morfologische gedrag in de Westerschelde. Volgens hen speelt mee dat de morfologische ontwikkeling in de monding mogelijk bepaald wordt door meer complexe processen (zoals golfwerking en bodemsamenstelling) die een subtielere schematisatie behoeven. Een 2D versie van het NeVla model overschat de morfologische ontwikkeling in het interessegebied (d.w.z. het zuidelijke deel van de Vlakte van de Raan). Een 3D versie berekent hier realistischere veranderingen maar onderschat de verdieping van de ebschaar tussen Spleet en de Wielingen.

De morfologische kalibratie van het VlaBa model concentreerde zich met name op het gebied tussen de haven van Zeebrugge en het Zwin na uitbreiding van de haven van Zeebrugge in 1986. De morfologische veranderingen op de zuidelijke rand van de Vlakte van de Raan zijn ten opzichte hiervan relatief klein. Alhoewel de sedimentatie-/erosiepatronen onderschat worden, berekent het VlaBa model wel een lichte erosie van de ebschaar en een rand van sedimentatie ten noorden en zuiden hiervan in lijn met de metingen (periode 1986-1996).

Dat de Delft3D-NeVla en VlaBa modellen na kalibratie in staat waren om patronen van morfologische veranderingen te reproduceren geeft aan dat de transportinstellingen geschikt zijn om sedimenttransporten in de Schelde-monding te modelleren.

2.3 Keuze simulatieperiode

Voor de SedTRAILS analyse is het belangrijk om een simulatieperiode te kiezen waarin de berekende transporten representatief zijn voor lange termijn gemiddelde condities. Resultaten van de transportberekeningen in Delft3D worden namelijk veelvuldig herhaald om transportpaden van sediment verder van de bron te brengen. Een eventuele afwijking van representatieve condities zou dan ook veelvuldig herhaald worden.

De gekozen simulatieperiode volgt uit een aantal stappen.

1. Op basis van een modelberekening zonder golven voor één jaar (d.w.z. 2014) is het gemiddelde totale sedimenttransport (d.w.z. bodemtransport en suspensief transport) in dat jaar bepaald. Om de rekentijd te beperken is hiervoor de modelversie met het grove rooster gebruikt.
2. Vervolgens is de maand maart gekozen als maand waarvoor de gemiddelde transporten het beste overeen komen met de gemiddelde transporten voor een jaar. Dit is beoordeeld aan de hand van de sedimenttransporten door twee raaien in de monding (raai 11 en raai 12). Deze maand wordt de morfologische maand genoemd. De berekende residuele transportpatronen in maart 2014 zijn te zien in Figuur 2.4.

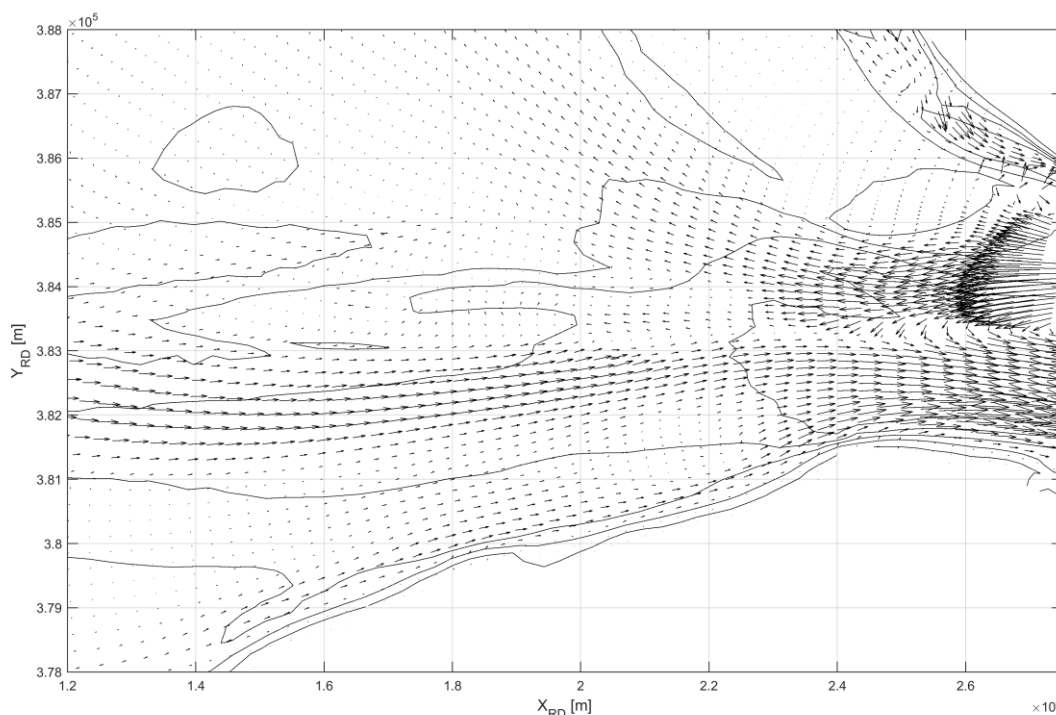
3. Binnen de morfologische maand is gezocht naar een periode van 2 M2 getijperiodes waarvoor de gemiddelde transportpatronen vergelijkbaar zijn met de gemiddelde transportpatronen in de morfologische maand. Door een periode van 2 M2 getijperiodes te kiezen wordt de dagelijkse ongelijkheid in het getijsignaal meegenomen. Een kwadratische fout (*RMSE*) is gebruikt om te bepalen welke periode van 2 M2 getijperiodes het meest representatief is voor de transportpatronen in de morfologische maand. De *RMSE* is bepaald over het verschil tussen het vectorveld van residuele transporten in de 2 M2 getijperiodes en in de morfologische maand.

De gekozen simulatieperiode loopt van 5 maart 23:50 tot 7 maart 00:40. Op 5 maart om 23:50 is er sprake van kentering naar vloed op de raai tussen Vlissingen en Breskens. Het residuele transportpatroon voor de gekozen simulatieperiode is te zien in Figuur 2.5.

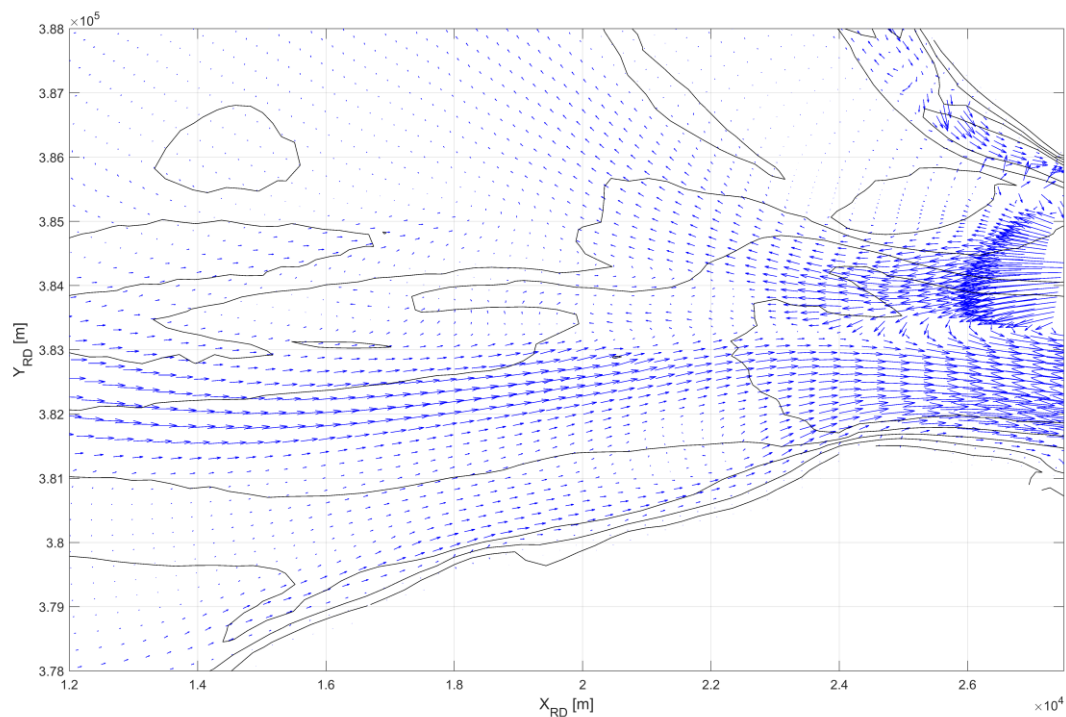
In deze aanpak zou het niet nodig zijn om eerst een morfologische maand te kiezen; deze wordt namelijk niet gebruikt in de SedTRAILS analyse. In een opvolgende modelstudie zullen echter ook morfodynamische modelberekeningen uitgevoerd gaan worden in Delft3D, waarvoor de morfologische maand wel gebruikt zal worden. Om overeenstemming te houden tussen de twee modelstudies is een simulatieperiode gekozen die valt binnen “de morfologische maand” (d.w.z. maart 2014).

Het is niet nodig om modelsimulaties met golven te gebruiken voor de keuze van de simulatieperiode voor SedTRAILS, omdat de variaties in transportpatronen door golven al op een andere manier geschematiseerd worden (zie Paragraaf 2.2.3). De keuze van de simulatieperiode richt zich daarom op representatieve condities voor getij en opzet.

Er wordt een periode van 2 dagen gebruikt als inspeelperiode voor het Delft3D model. De modeluitvoer voor deze periode wordt niet gebruikt. De inspeelperiode zorgt ervoor dat er geen hydrodynamische inspeleffecten meer in de modelresultaten zitten aan het begin van de simulatieperiode op 5 maart om 23:50.



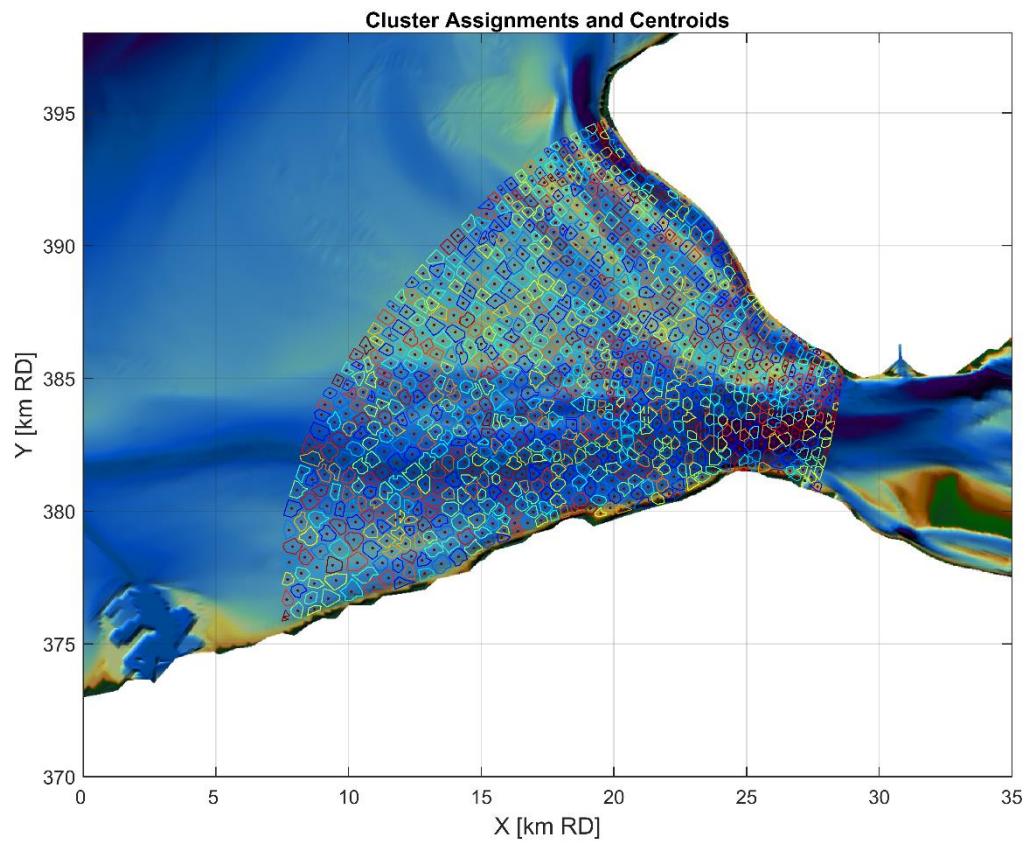
Figuur 2.4 Vectorveld van tijdsgemiddelde residuele transporten in de Schelde-monding op basis van een modelberekening voor maart 2014 zonder golven. De weergegeven dieptecontouren zijn 0, -5 m, -10 m, -15 m en -20 m ten opzichte van NAP.



Figuur 2.5 Vectorveld van tijdsgemiddelde residuele transporten in de Schelde-monding op basis van een modelberekening van 5 maart 23:50 tot 07 maart 00:40. De weergegeven dieptecontouren zijn 0, -5 m, -10 m, -15 m en -20 m ten opzichte van NAP.

2.4 SedTRAILS startlocaties

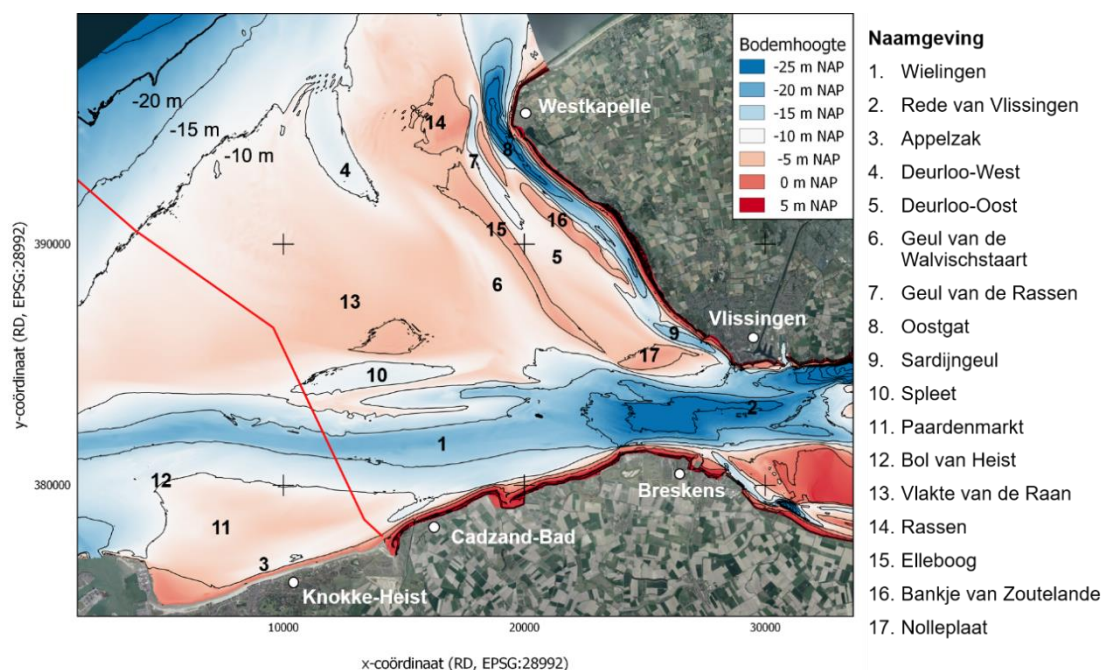
Voor de SedTRAILS analyse worden 1000 sedimentbronnen geplaatst in het interessegebied (zie Figuur 2.6). De bronnen zijn de initiële locaties van de transportpaden. De 1000 bronnen zijn verdeeld op basis van een clusteranalyse waarbij de bathymetrie een rol speelt. Dit zorgt ervoor dat er relatief veel sedimentbronnen aanwezig zijn in delen van het interessegebied met een complexe bathymetrie.



Figuur 2.6 Locaties van 1000 sedimentbronnen in de Schelde-monding, afgeleid met een cluster analyse op basis van de bathymetrie. De zwarte punt in elk cluster is het initiële punt van de transportpaden.

3 Resultaten

Bij het bespreken van de resultaten wordt de naamgeving van geulen en banken aangehouden zoals die is weergegeven in Figuur 3.1. Aan de zuidzijde van het mondingsgebied ligt de brede en diepe geul de Wielingen [1], die in de Westerschelde overgaat in de Rede van Vlissingen [2]. Ten zuiden van de Wielingen liggen de ondieptes Paardenmarkt [11] en Bol van Heist [12]. De geul Appelzak [3] loopt langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen. Langs de zuidwestkust van Walcheren liggen de geulen Oostgat [8] en Sardijngeul [9]. Het bankje van Zoutelande [16] scheidt het Oostgat van Deurloo-Oost [5] en Geul van de Rassen [7]. Ten westen hiervan ligt een langwerpige bank Elleboog [15], die de Rassen [14] en de Nolleplaat [17] verbindt. Elleboog scheidt de geulen Deurloo-Oost en Deurloo West [4]. Tussen Elleboog en de grote ondiepte Vlake van de Raan [15] ligt de geul van de Walvischstaart [6]. Aan de zuidkant van de Vlake van de Raan liggen de geul Spleet [10] en een ebschaar tussen de Vlake van de Raan en de Wielingen.



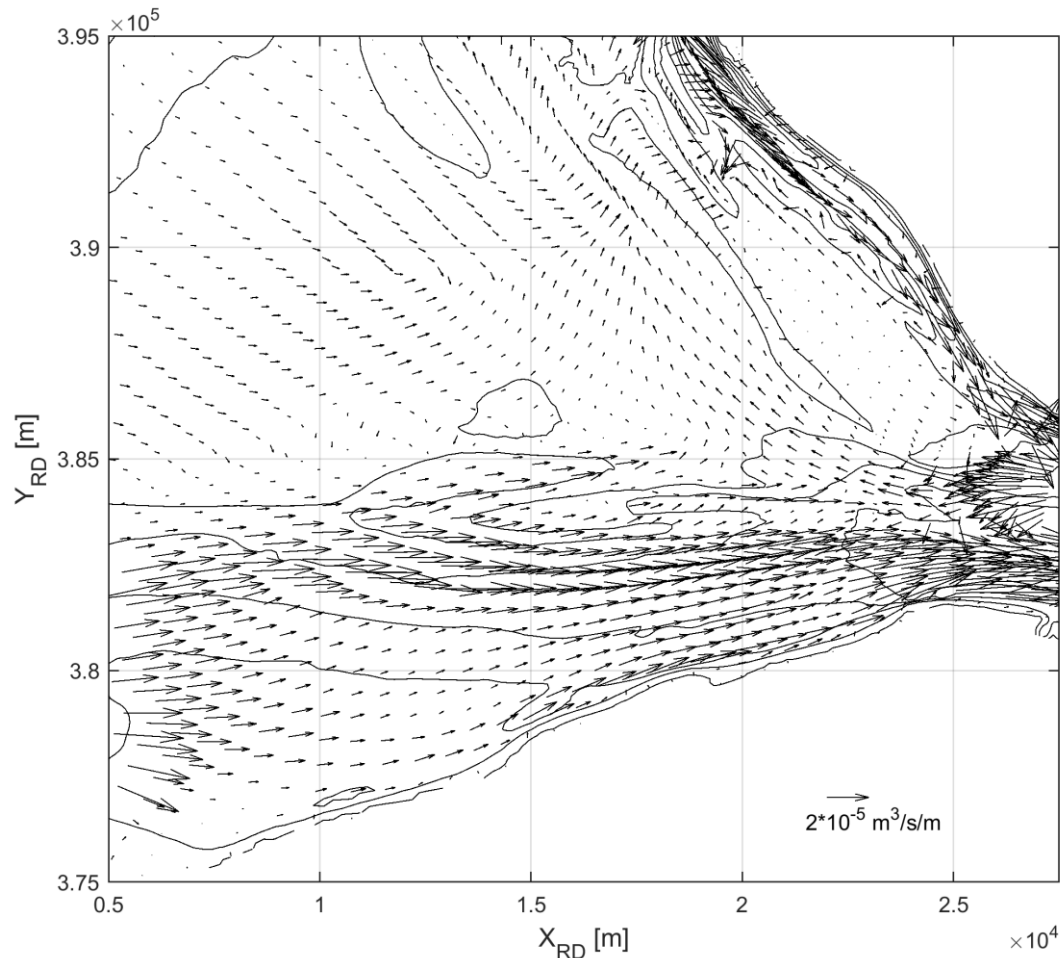
Figuur 3.1 Bodemligging van de Schelde-monding met hierop aangegeven de belangrijkste geulen en banken in het gebied. De landsgrens is aangegeven met een rode lijn. De weergegeven dieptecontouren zijn elke 5 m ten opzichte van NAP.

3.1 Sedimenttransportpaden door getij en golven

3.1.1 Delft3D transportvelden

De resultaten van Delft3D modelberekeningen bevatten het bruto sedimenttransport gedurende de simulatieperiode. Het residuele (tijdsgemiddelde) transport over de simulatieperiode is het netto transport. Gedurende de twee getijcycli in de simulatieperiode gaat het transport namelijk heen en weer ten gevolge van eb en vloed, maar voor het residuele transport is het relevant waar het sedimenttransport netto naartoe gaat. Het residuele transport over de simulatieperiode is bepaald voor elk van de zestien golfcondities (zie Bijlage A.1).

Figuur 3.2 toont het gewogen gemiddelde van de sedimenttransportfactoren van de afzonderlijke golfcondities. De grootte en de richting van het residuele sedimenttransport volgt hieruit voor elke rooster cel in het modeldomein, en daarmee op vele punten in de Schelde-monding. Deze resultaten worden gebruikt in de SedTRAILS analyse om ook de transportpaden tussen de punten te visualiseren.



Figuur 3.2 Residuele sedimenttransportvectoren voor de simulatieperiode van twee getijdeperiodes, bepaald als een gewogen gemiddelde van de transportvectoren bij zestien verschillende golfcondities. Vectors zijn een factor 4 uitgedund ten opzichte van het rekenrooster (d.w.z. 1 vector voor 16 rooster cellen). De weergegeven dieptecontouren zijn 0, -5 m, -10 m, -15 m en -20 m ten opzichte van NAP.

3.1.2 SedTRAILS resultaten

De berekende transportpaden in de Schelde-monding zijn weergegeven in Figuur 3.3. De transportpaden vertrekken vanaf 1000 sedimentbronnen (zie Figuur 2.6). De kleuren van de paden zijn hier willekeurig gekozen. Een conceptuele beschrijving van de transportpaden is opgenomen in Figuur 3.4 en wordt hieronder toegelicht.

De drie belangrijkste geulen in de Schelde-monding zijn duidelijk terug te zien in de transportpatronen. De paden door de geulen volgen de richting van de geul en scheiden de meer diverse transportpaden op ondiepere delen van de Schelde-monding.

- In de Wielingen is de transportcapaciteit groot (d.w.z. lange transportpaden) en gericht naar de Westerschelde (d.w.z. vloed-dominant). Het zuidelijke deel van de keel van

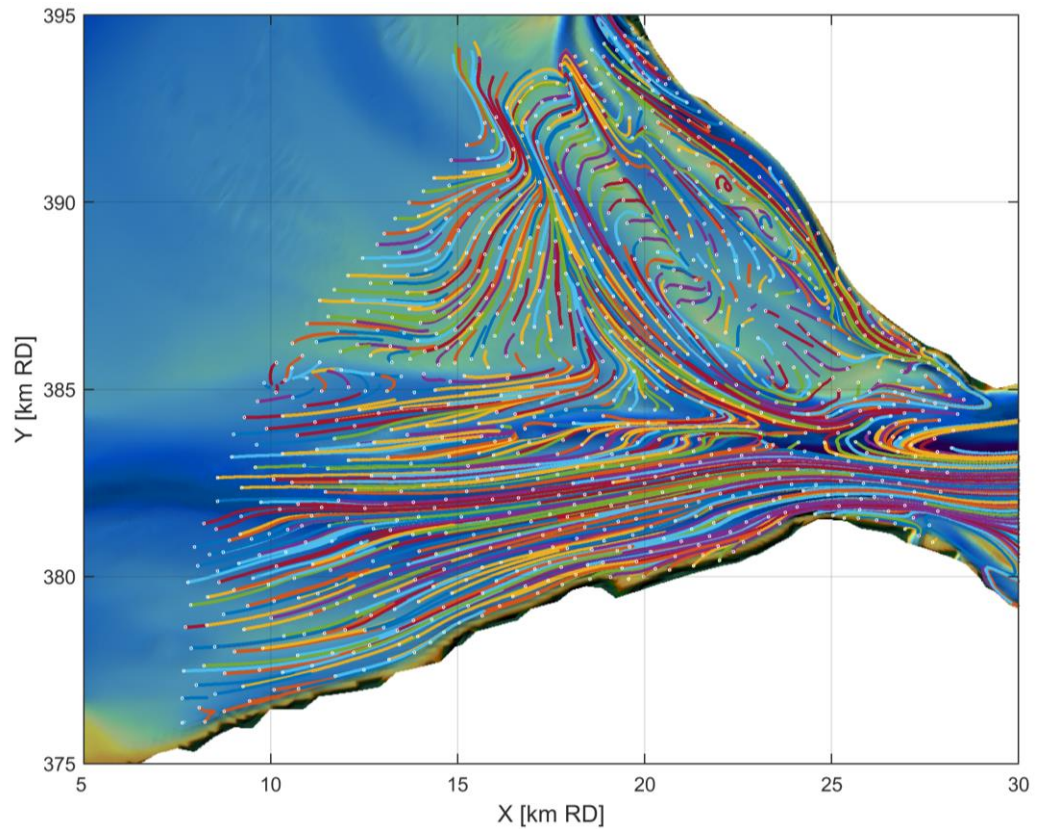
de Schelde-monding (d.w.z. op de lijn Vlissingen-Breskens) is daardoor vloedgedomineerd.

- In de Geul van de Walvischstaart zijn de transportpaden eb-dominant. Aan de noordzijde van de geul loopt een deel van de transportpaden vanuit de Geul van de Walvischstaart naar Deurloo-West en een ander deel loopt over de Elleboog naar de Geul van de Rassen.
- Langs het Bankje van Zoutelande in het Oostgat en in de Sardijngeul is het berekende transport vloed-dominant. Dat wil zeggen dat de transporten zuidoostelijk gericht zijn. Dit is lastig te zien in Figuur 3.2, omdat er slechts enkele transportpaden in de geul liggen. Aan de noordzijde van het Oostgat zijn transporten langs de kust noordelijk gericht.

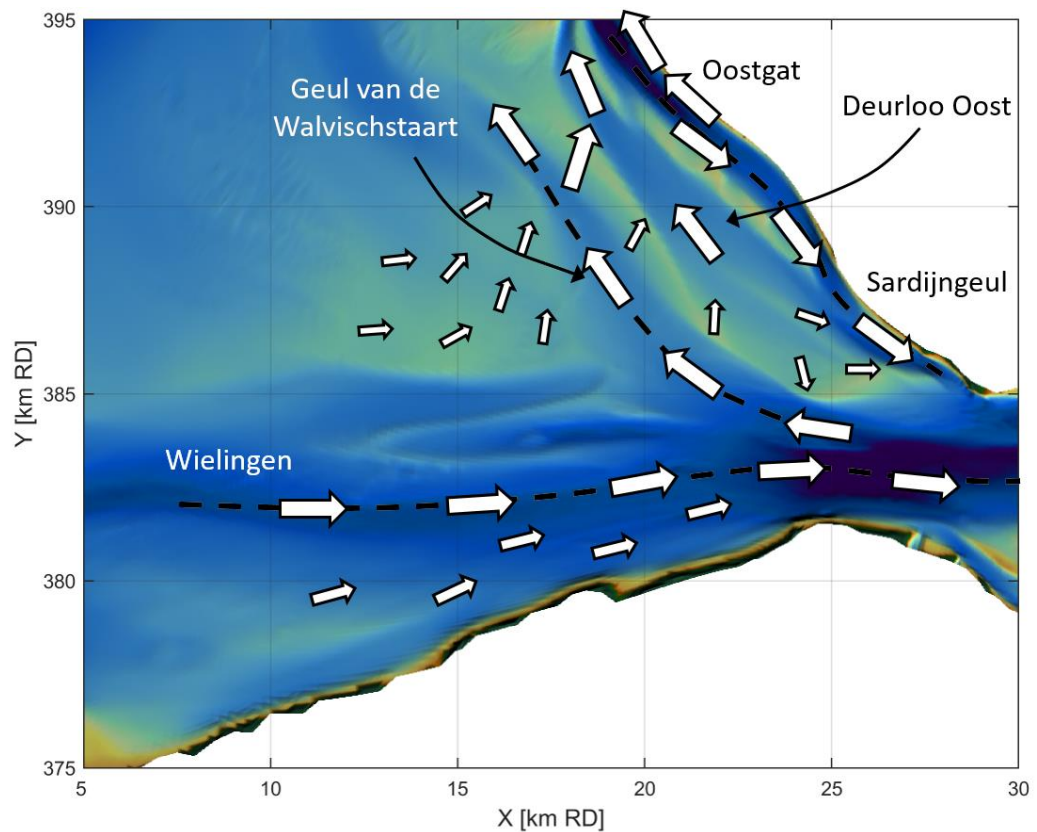
De ligging van de geulen is geschetst in Figuur 3.3. De geul Deurloo-Oost is minder duidelijk terug te zien in de transportpaden. Over het algemeen is het transport hier noordwestelijk gericht.

Tussen de belangrijkste geulen zijn over het algemeen zones te zien met meer variatie in de richting van de transportpaden. Dat is niet het geval aan de zuidkant van de Wielingen, nabij de Zeeuws-Vlaamse kust. De transportpaden volgen daar dezelfde richting als in de Wielingen, namelijk in de richting van de Westerschelde. Het berekende sedimenttransport is in dit deel dus vloed-dominant. Tussen de Geul van de Walvischstaart en Oostgat/Sardijngeul zijn de overgangen van diepe geulen naar ondiepe banken duidelijk terug te zien, omdat de transportpaden niet in de richting van de geul lopen. Bij Elleboog volgen de transportpaden een richting die dwars op de geul staat, waarschijnlijk omdat het getij hier niet langer de dominante forcering is (de bijdragen van getij en golven in het sedimenttransport worden verder uitgewerkt in Paragraaf 3.2).

Op het noordwestelijke en het centrale deel van de Vlakte van de Raan, tussen de Wielingen en de Geul van de Walvischstaart, zijn de transportpaden gericht richting het noordoosten. Alle transportpaden die hier starten buigen af en lopen vervolgens via de Geul van de Walvischstaart verder zeewaarts. Dit deel lijkt daardoor geen directe interactie te hebben met de Westerschelde; het is niet waarschijnlijk dat sediment opgepikt in dit deel de Westerschelde in wordt getransporteerd.



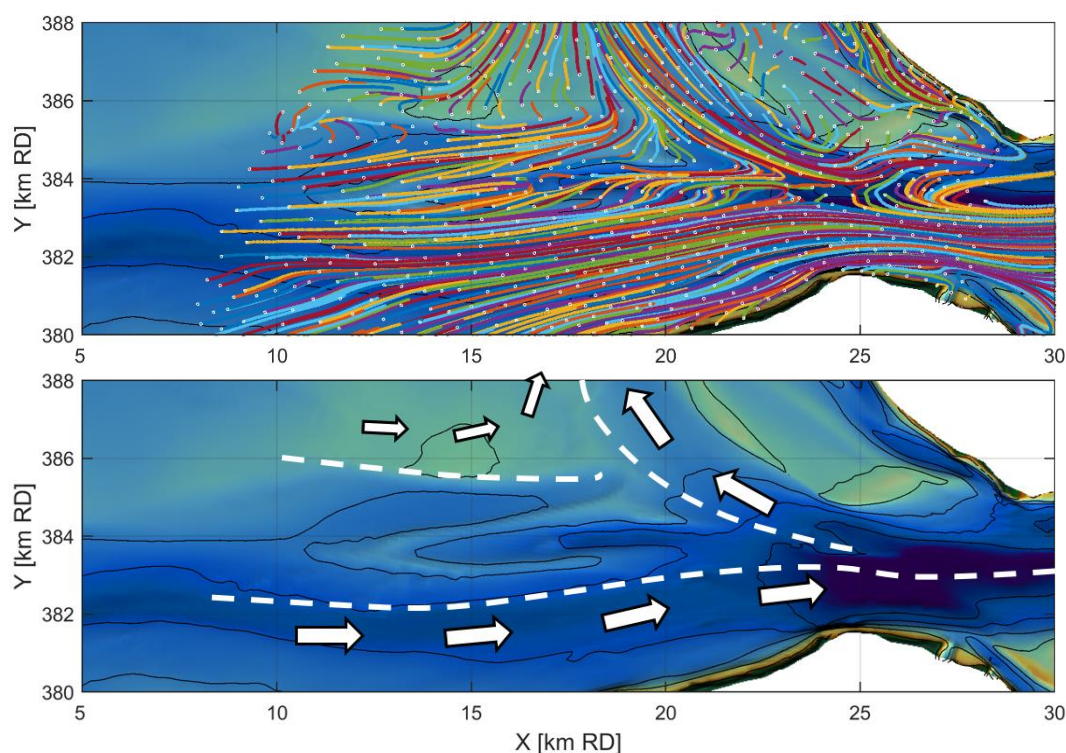
Figuur 3.3 Sedimenttransportpaden in de Schelde-monding. Witte stippen tonen de initiële locatie van de transportpaden. De kleur waarmee transportpaden zijn weergegeven is willekeurig gekozen.



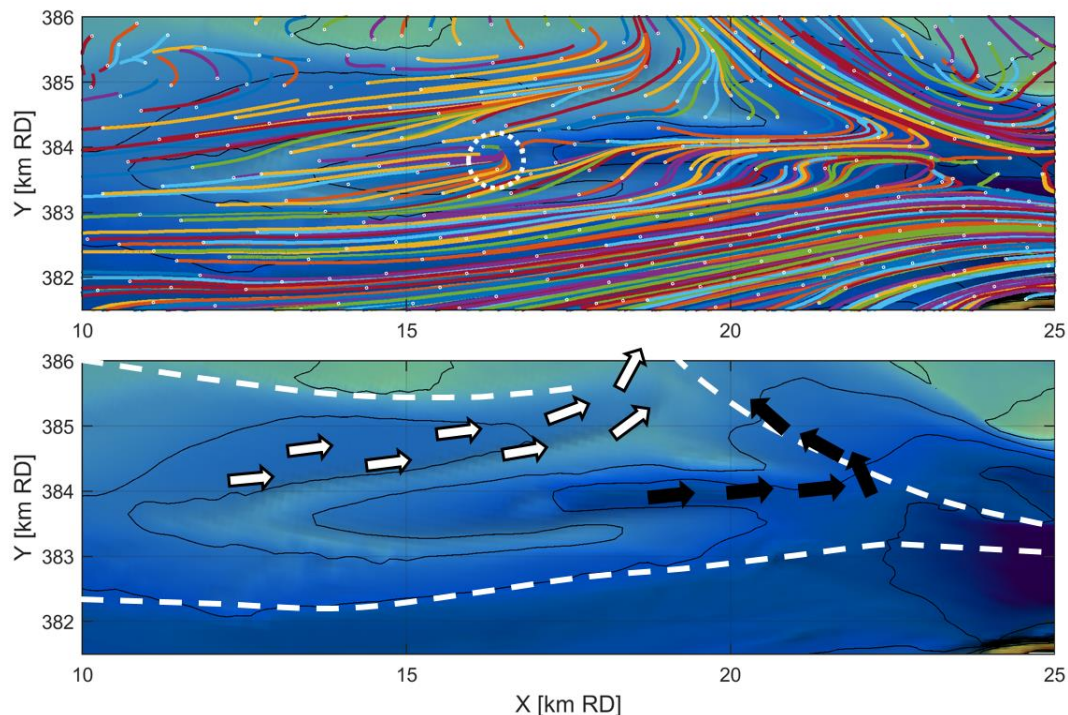
Figuur 3.4 Conceptuele beschrijving van de gemiddelde sedimenttransporten in de Schelde-monding op basis van transportpaden in Figuur 3.3. Zwarte stippellijnen tonen de belangrijkste geulen.

Aan de zuidkant van de Vlake van de Raan, tussen de Wielingen en het meest ondiepe deel van de Vlake van de Raan, is veel ruimtelijke variatie te zien in de transportcapaciteit en in de richting van de transportpaden. Figuur 3.5 toont dit gebied. Het gebied wordt omsloten door de Wielingen (transportpaden in vloed-richting), de Geul van de Walvischstaart (transportpaden in eb-richting) en het ondiepe deel van de Vlake van de Raan (transportpaden richting het oosten en noordoosten). Dit is met witte stippellijnen weergegeven in de conceptuele beschrijving in het onderste paneel van Figuur 3.5.

Het merendeel van de transportpaden vanaf de zuidkant van de Vlake van de Raan komt uiteindelijk in de Geul van de Walvischstaart uit. In Figuur 3.6 is nog verder ingezoomd op de transportpaden aan de zuidkant van de Vlake van de Raan. Een deel van de transportpaden (vanuit de noordelijke punten in dit gebied; volgens de witte pijlen onderin Figuur 3.6) komt via Spleet in de Geul van de Walvischstaart terecht. Andere transportpaden lopen via de ebschaar tussen Spleet en de Wielingen verder naar het oosten, om vervolgens in het begin van de Geul van de Walvischstaart onderdeel te worden van het eb-dominante transport (zwarte pijlen onderin Figuur 3.6). Op een centraal punt in het gebied is het berekende residuele transport nihil. Daar convergeert een aantal van de transportpaden (witte gestippelde in Figuur 3.6).



Figuur 3.5 Sedimenttransportpaden aan de zuidkant van de Vlake van de Raan. In het onderste paneel zijn de gemiddelde sedimenttransporten langs de randen van dit gebied conceptueel weergegeven, zoals in de tekst wordt toegelicht.

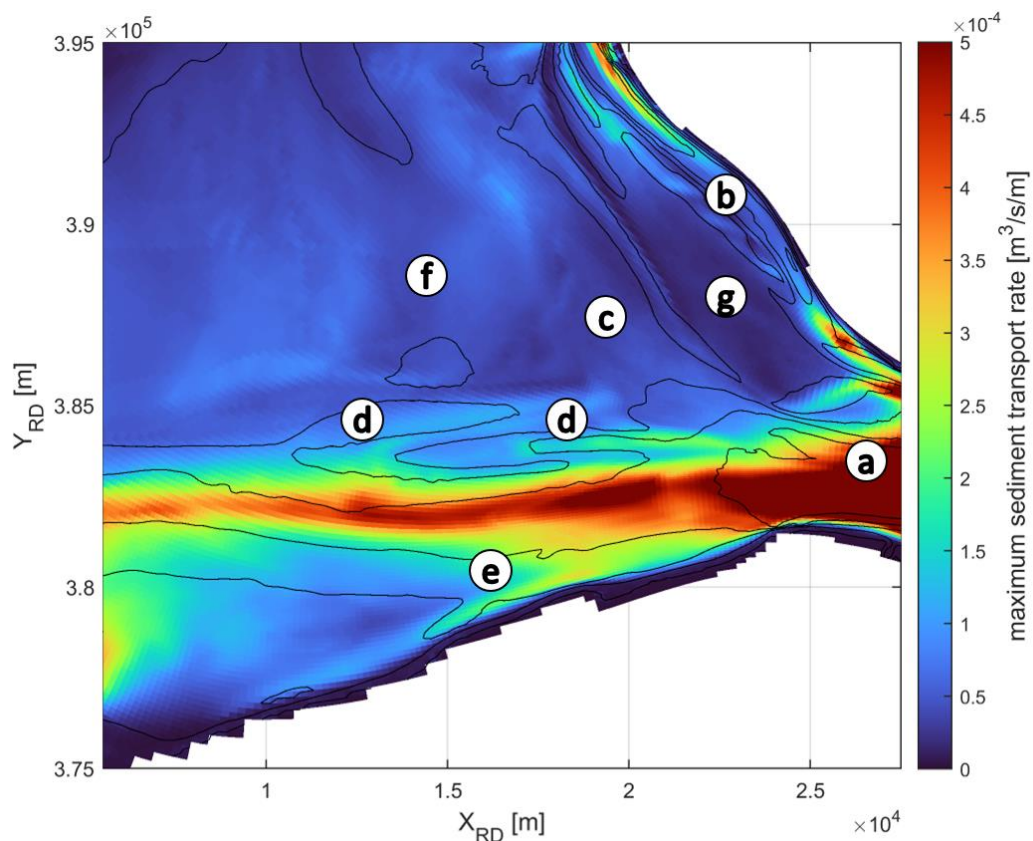


Figuur 3.6 Sedimenttransportpaden aan de zuidkant van de Vlake van de Raan. In het onderste paneel is een conceptuele beschrijving van de gemiddelde sedimenttransporten opgenomen die wordt toegelicht in de tekst.

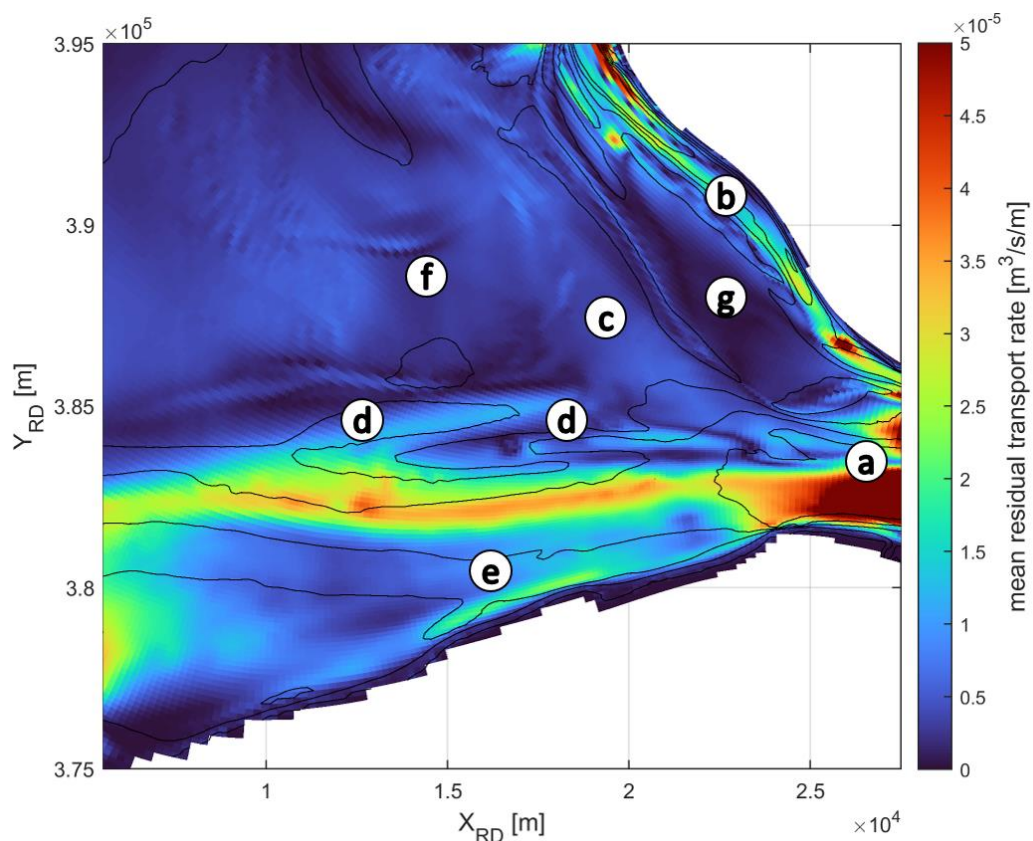
3.1.3 Transportcapaciteit

Een ruimtelijk beeld van de transportcapaciteit volgt uit de Delft3D resultaten. Het bruto transport is een maat voor de transportcapaciteit van sediment. De transportcapaciteit varieert per fase van het getij, met pieken tijdens de maximale eb- en vloedstroming. In Figuur 3.7 is per roostercel de grootte van het maximale sedimenttransport (d.w.z. 95^e percentiel) in de simulatieperiode weergegeven. Per locatie kan de richting van het maximale transport verschillen; voor een deel van de roostercellen zal het maximale transport optreden tijdens eb en voor een ander deel tijdens vloed. Het bruto transport hoeft nog niet te leiden tot netto (d.w.z. residueel) transport. Als het transport in beide richtingen even groot is kan een groot bruto transport netto geen effect hebben. In Figuur 3.8 is de grootte van het gemiddelde residuele transport weergegeven. Dit komt overeen met de grootte van de vectoren in Figuur 3.2. Over het algemeen is het gemiddelde residuele transport een orde grootte (d.w.z. ongeveer een factor 10) kleiner dan het maximale bruto transport. Hierdoor is de residuele transportsnelheid groot op plekken waar de bruto transportcapaciteit groot is.

De transportcapaciteit is vooral groot in de Wielingen. De residuele transportsnelheid is met name groot in de keel van de Schelde-monding (d.w.z. op de lijn Vlissingen-Breskens; [a] in Figuur 3.7 en in Figuur 3.8). De residuele transportsnelheid in het Oostgat/Sardijngeul ([b]) is ook relatief groot, terwijl de residuele transportsnelheid in de Geul van de Walvischstaart ([c]) niet groter is dan in de kleinere geulen aan de zuidkant van de Vlake van de Raan ([d]) of langs de Zeeuws-Vlaamse kust ([e]). Op het ondiepe deel van de Vlake van de Raan ([f]) en op de banken tussen de Geul van de Walvischstaart en het Oostgat/Sardijngeul ([g]) is de transportsnelheid relatief laag.



Figuur 3.7 95^e percentiel van de grootte van het (bruto) sedimenttransport in Delft3D berekeningen. Per locatie zal de fase in het getij wanneer dit sedimenttransport optreedt verschillen.

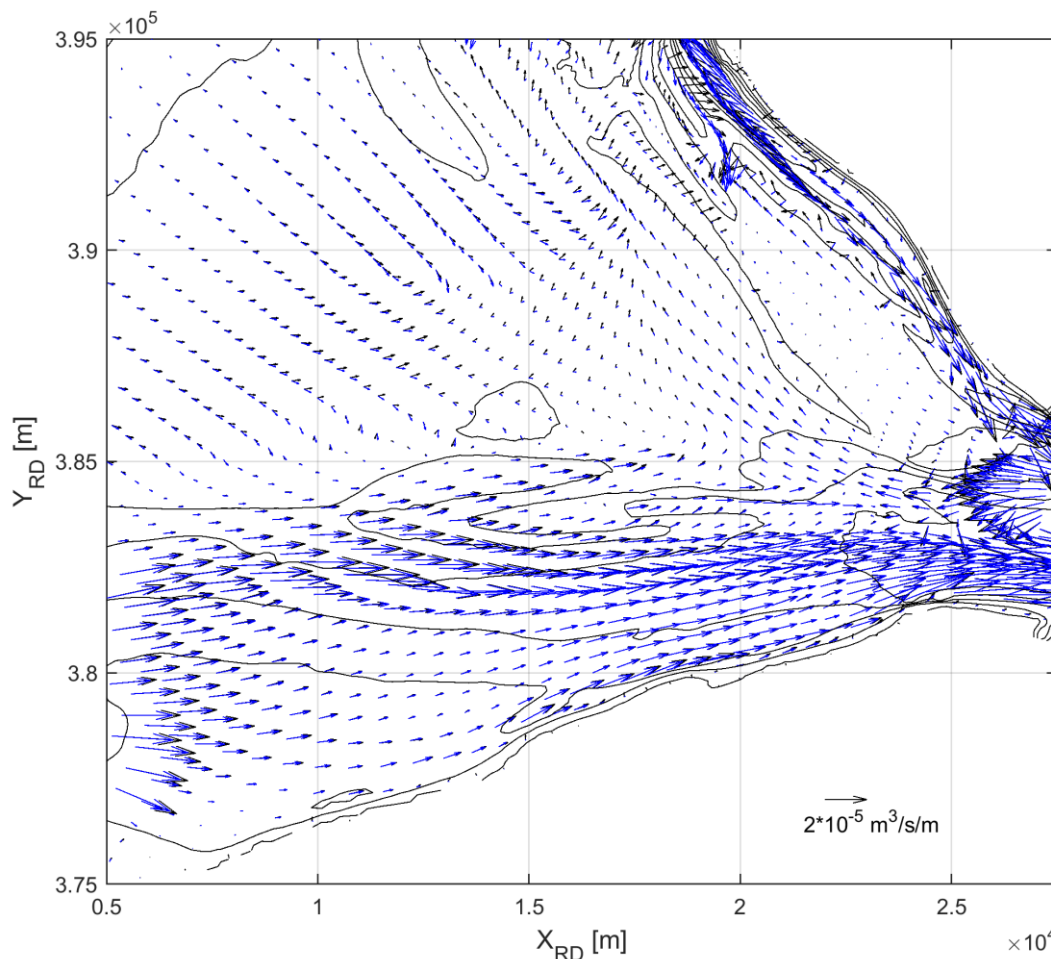


Figuur 3.8 Grootte van het gemiddelde residuele sedimenttransport in Delft3D berekeningen. De richting van het residuele transport is weergegeven in Figuur 3.2.

3.2 Bijdrage van golven in sedimenttransport

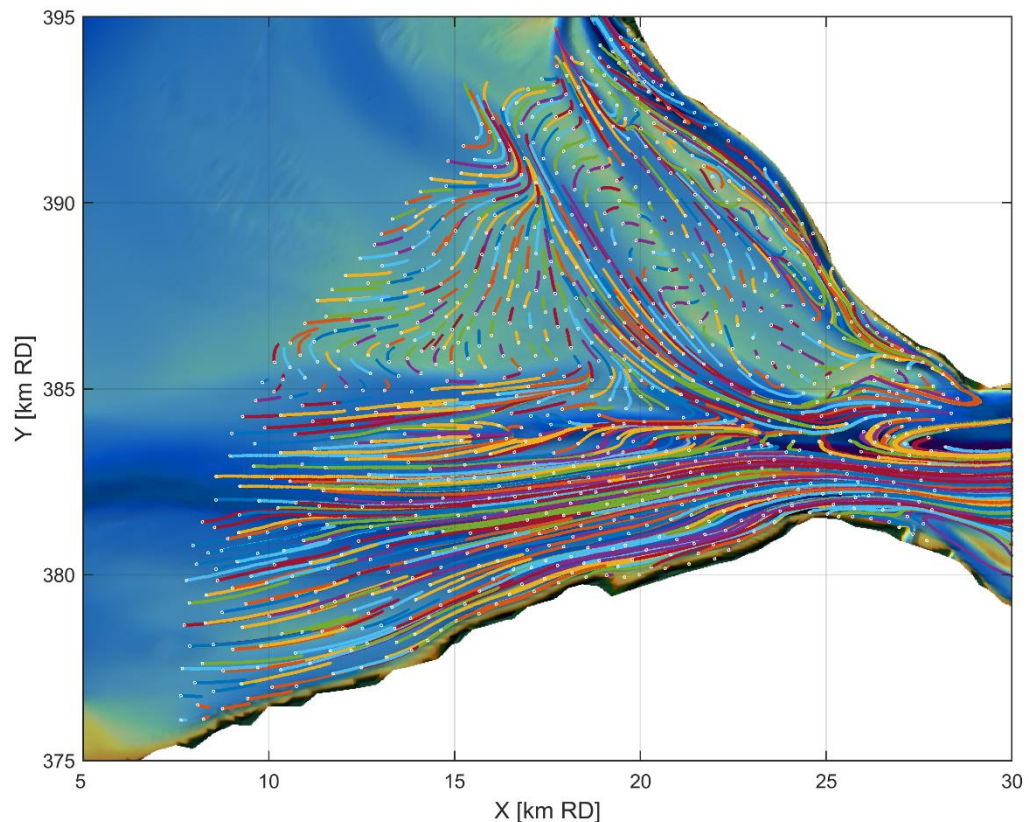
Door de transportpaden in de Schelde-monding te bepalen zonder de bijdrage van golven in de sedimenttransportberekeningen, kan per gebied inzichtelijk gemaakt worden welk proces verantwoordelijk is voor het sedimenttransport. In een deel van het gebied zal de getij-forcering namelijk dominant zijn. In andere delen zal golf-forcering dominant zijn, of zijn zowel getij als golven voor een belangrijk deel verantwoordelijk voor het berekende transport.

Figuur 3.9 toont de residuele transportvectoren in de Schelde-monding met (zoals in Figuur 3.2) en zonder de bijdrage van golven. Over het algemeen neemt de grootte van de transportvectoren af als de bijdrage door golven en de interactie tussen stroming en golven wegvalt (d.w.z. zwarte vectoren in Figuur 3.9 zijn groter dan blauwe vectoren).



Figuur 3.9 Residuele sedimenttransportvectoren voor de simulatieperiode van twee getijdeperiodes met golven (zwarte pijlen) en zonder golven (blauwe pijlen). De weergegeven dieptecontouren zijn 0, -5 m, -10 m, -15 m en -20 m ten opzichte van NAP.

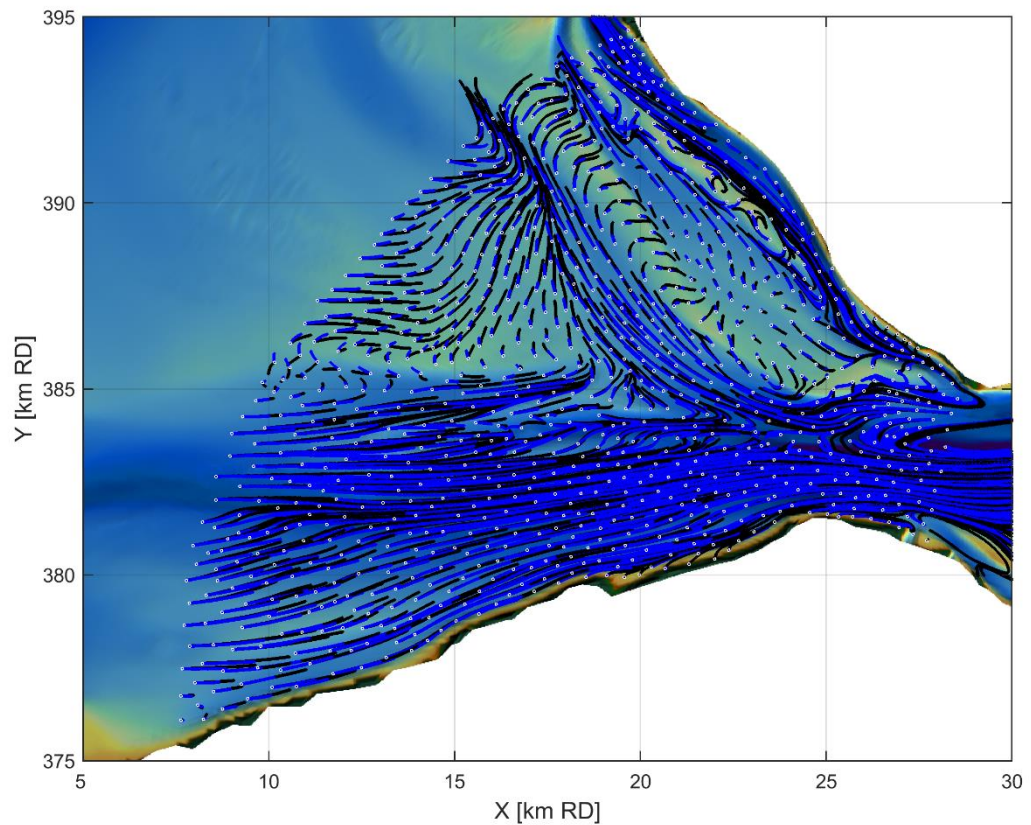
De sedimenttransporten zonder golven kunnen duidelijker weergegeven worden aan de hand van de transportpaden uit SedTRAILS (zie Figuur 3.10). Hierin is te zien dat de transportpaden in een groot deel van het gebied korter zijn. Dit is vooral duidelijk zichtbaar op het centrale deel van de Vlake van de Raan en op de Elleboog. In deze ondiepe gebieden hebben golven dus een belangrijke rol in het gemiddelde transport. Dat kan het gevolg zijn van een golfgedreven residuele stroming, maar ook door opwoeling van sediment. Als het sediment door golven wordt opgewoeld en vervolgens door de getijstroming wordt meegevoerd zijn golven niet het dominante transportmechanisme, maar dan hebben golven wel een belangrijke rol in het genereren van residueel transport.



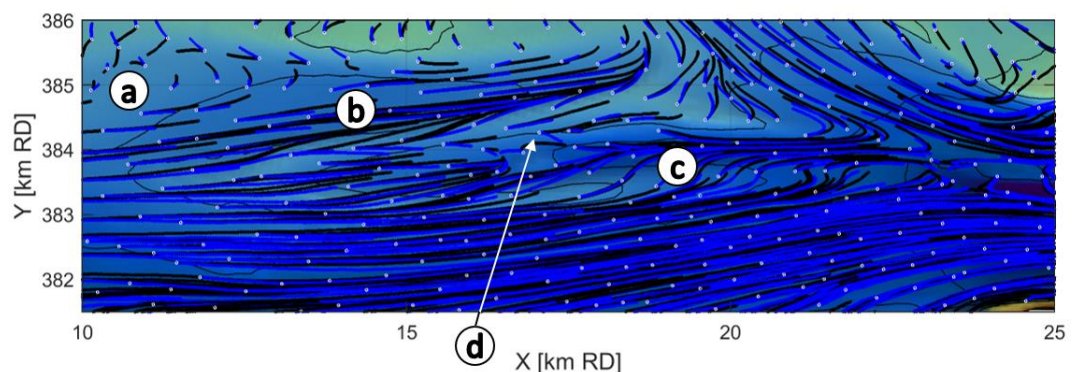
Figuur 3.10 Sedimenttransportpaden in de Schelde-monding op basis van Delft3D modelberekeningen zonder golven. De kleur waarmee transportpaden zijn weergegeven is willekeurig gekozen.

Het verschil tussen de transportpaden met en zonder golven wordt duidelijker door de transportpaden voor de twee situaties over elkaar te visualiseren (zie Figuur 3.11). Om de verschillende paden beter te kunnen onderscheiden is alleen de eerste helft van de eerder besproken transportpaden weergegeven. Als de transportpaden zonder golven (blauwe lijnen) de transportpaden met golven (zwarte lijnen) overlappen, dan hebben golven een klein effect op het sedimenttransport. Dat is het geval in de diepe geulen Wielingen en Oostgat/Sardijngeul, en in mindere mate ook in de Geul van de Walvischstaart. In de diepe geulen neemt de transportcapaciteit wel toe door de aanwezigheid van golven, omdat het aanbod van sediment toeneemt.

Aan de zuidwestelijke kant van de Vlakte van de Raan ([a] in Figuur 3.12) wordt de transportsnelheid niet alleen kleiner, maar verandert ook de richting van het residuele transport door de aan-/afwezigheid van golven. In Spleet ([b] in Figuur 3.12) blijft de transportrichting ongeveer gelijk, maar neemt de transportsnelheid aanzienlijk af. Datzelfde geldt voor de ebschaar ([c] in Figuur 3.12). In de ondiepe zone tussen Spleet en de ebschaar kunnen de golfcondities bepalen of de transportpaden richting Spleet of richting de ebschaar lopen ([d] in Figuur 3.12).



Figuur 3.11 Sedimenttransportpaden in de Schelde-monding op basis van Delft3D modelberekeningen met golven (zwarte lijnen) en zonder golven (blauwe lijnen).



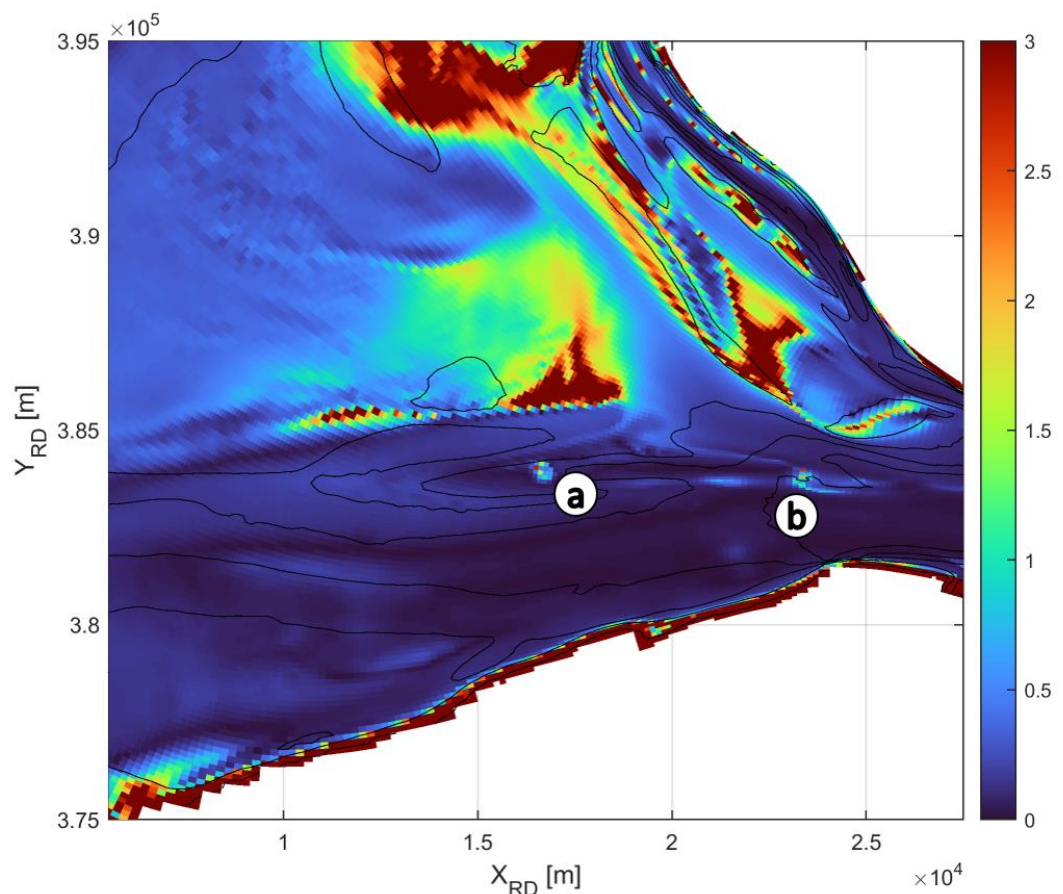
Figuur 3.12 Sedimenttransportpaden aan de zuidkant van de Vlake van de Raan op basis van modelberekeningen met golven (zwarte lijnen) en zonder golven (blauwe lijnen).

In Figuur 3.13 is het belang van golven in het residuele transport op een andere manier weergegeven. Daarvoor is eerst per roostercel de verschilvector bepaald tussen het residuele sedimenttransport in modelberekeningen met en zonder golven. Vervolgens is de magnitude van de verschilvector gedeeld door de magnitude van de transportvector zonder golven. Dit leidt tot de relatieve magnitude van de verschilfactor. Hierin is duidelijk te zien in welke gebieden golven veel invloed hebben op het residuele sedimenttransport.

- Bij een waarde van 0 hebben golven geen effect op het berekende transport. Voor waarden tussen 0 en 0.5 is het effect van golven klein (donkerblauw in Figuur 3.13). Dit is het geval in de diepe geulen.

- Voor waarden rond 1 is het effect van het toevoegen van golven vergelijkbaar in grootte als het transport met alleen getij. Dit is bijvoorbeeld aan de westkant van de Vlake van de Raan het geval.
- Voor hogere waarden dan 1 worden golven steeds belangrijker voor het residuele transport. Dat is het geval op het oostelijke deel van de Vlake van de Raan en langs plaatranden en op platen tussen het Oostgat en de Geul van de Walvischstaart. Merk op dat na opwoeling van sediment door golven het nog steeds de getijstroming kan zijn die het sediment transporteert. Het residuele transport wordt hier dus gedomineerd door golven en/of de interactie tussen het getij en golven.

Door te delen door de magnitude van de transportvector kan het relatieve effect van golven groot zijn, terwijl het absolute effect klein is. Dit is het geval wanneer het sedimenttransport klein is, bijvoorbeeld bij punten [a] en [b] in Figuur 3.13. In Figuur 3.9 is te zien dat het sedimenttransport hier klein is. Verder is het opvallend dat de berekende golfinvloed langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen klein is. Dat komt waarschijnlijk omdat de roosterresolutie onvoldoende is om het golfgedreven kustlangs transport te simuleren.

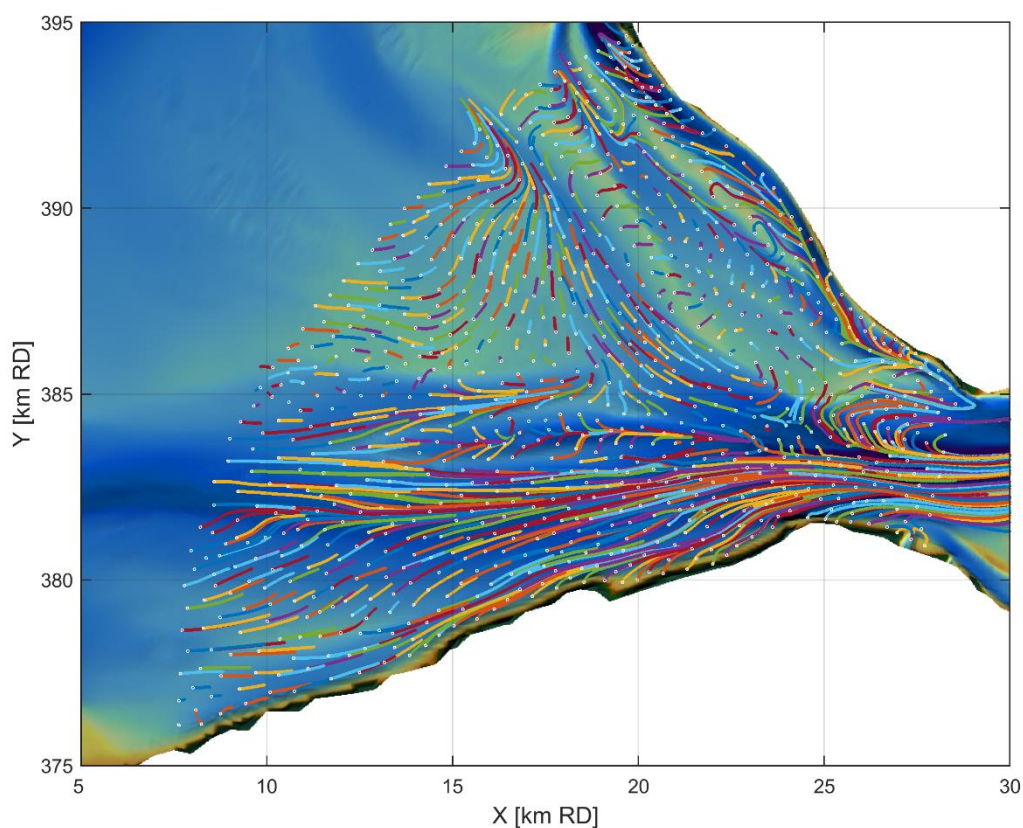


Figuur 3.13 Bijdrage van golven in het totale residuele sedimenttransport, weergegeven als de verschilvector tussen het residuele transport in berekeningen met en zonder golven ten opzichte van het residuele sedimenttransport zonder golven. Het effect van golven neemt toe voor hogere waarden. De weergegeven dieptecontouren zijn 0, -5 m, -10 m, -15 m en -20 m ten opzichte van NAP.

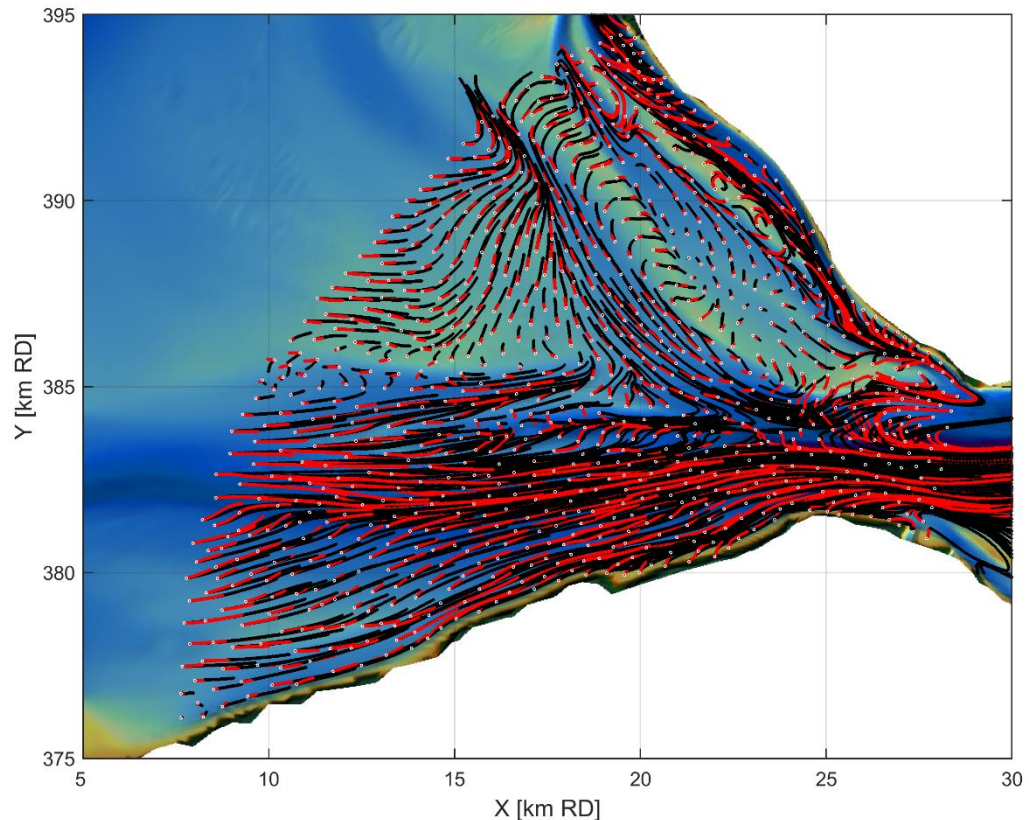
3.3 Gevoeligheid voor korrelgrootte

Als gevoeligheidsonderzoek is gekeken hoe de transportpaden veranderen als de korrelgrootte van de gemodelleerde zandfractie verandert van 200 μm naar 300 μm . Voor het ontwerpen van de suppletie is het namelijk relevant om te weten of suppletiezand van een andere korrelgrootte zich anders zal verspreiden. De modelinstellingen zijn echter gekozen om de morfodynamiek (zonder suppletie) te reproduceren met een uniforme zandfractie van 200 μm . Daarom is dit gevoeligheidsonderzoek minder relevant voor het bestuderen van transportpatronen in de Schelde-monding dan voor het verspreiden van suppletiezand.

De sedimenttransportpaden van een zandfractie van 300 μm zijn weergegeven in Figuur 3.14 en de sedimenttransportpaden van beide fracties (200 μm (zoals in Figuur 3.3) en 300 μm (zoals in Figuur 3.14)) zijn weergegeven in Figuur 3.15. Het is duidelijk te zien dat de transportsnelheid van de grove fractie kleiner is; de zwarte lijnen zijn langer dan de rode lijnen in Figuur 3.15. Dat wordt veroorzaakt omdat er meer energie nodig is om het grovere zand in beweging te krijgen/houden.



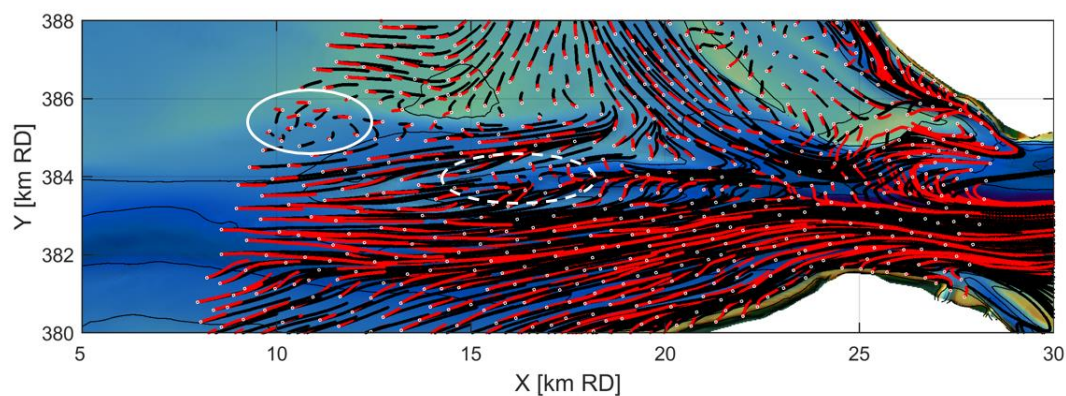
Figuur 3.14 Sedimenttransportpaden in de Schelde-monding op basis van Delft3D moelberekeningen met een zandfractie van 300 μm .



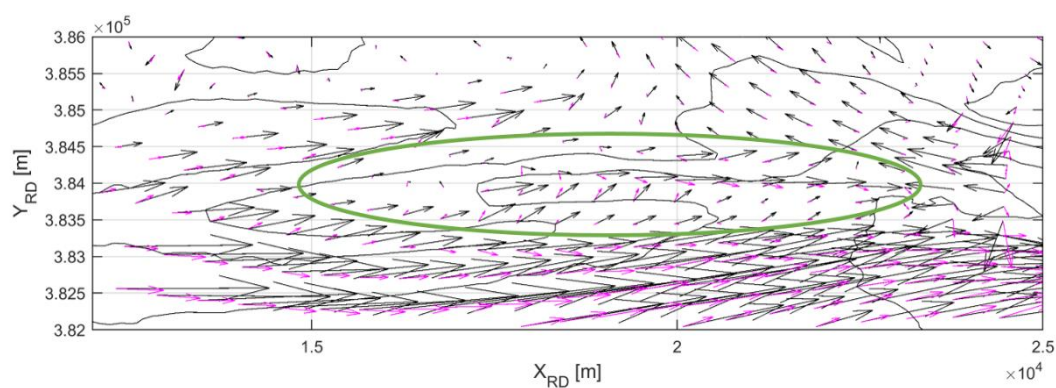
Figuur 3.15 Sedimenttransportpaden in de Schelde-monding op basis van Delft3D modelberekeningen met een zandfractie van 200 μm (zwarte lijnen) en met een zandfractie van 300 μm (rode lijnen).

De meeste transportpaden in Figuur 3.15 zijn alleen korter voor de grove fractie; de richting verandert niet ten opzichte van de transportpaden van de fijnere fractie. De patronen die in Paragraaf 3.1 werden besproken gelden dus ook voor de grove fractie. Voor een klein deel van de transportpaden verandert de richting van het residuele transport wel. De bruto transportsnelheid in verschillende richtingen neemt dan niet in dezelfde mate af. Dat kan uitgelegd worden aan de hand van de formuleringen voor zandtransport (Van Rijn, 2007). Er is een bepaalde hoeveelheid energie nodig om zand in beweging te krijgen. Die benodigde hoeveelheid energie is groter voor grovere fracties. Als de hoeveelheid energie in een bepaald deel van de getijcyclus niet voldoende is om het grovere zand in beweging te krijgen, dan valt het transport in die richting weg en verandert de richting van de residuele transportvector.

In Figuur 3.16 zijn twee zones in het interessegebied aangegeven waar de residuele transportrichting verandert door de grotere korrelgrootte. Aan de zuidwestelijke kant van de Vlakte van de Raan (getrokken witte polygoon in Figuur 3.16) is het residuele transport van de grove fractie meer naar het westen gericht, terwijl de fijne fractie meer naar het zuidwesten gaat. Rond de ebschaar tussen Spleet en de Wielingen (gestippelde witte polygoon in Figuur 3.16) buigen transportpaden van de grove fractie eerder af naar het diepere deel van de geul. Dit is ook terug te zien in de transportvectoren in Figuur 3.17.



Figuur 3.16 Sedimenttransportpaden in de Schelde-monding van een zandfractie van $200\ \mu\text{m}$ (zwarte lijnen) en van een zandfractie van $300\ \mu\text{m}$ (rode lijnen). Er zijn twee zones aangegeven waar de residuele transportrichting anders is voor de verschillende fracties.



Figuur 3.17 Residuele sedimenttransportvectoren bij de ebschaar tussen Spleet en de Wielingen voor korrelgroottes van $200\ \mu\text{m}$ (zwarte vectoren) en $300\ \mu\text{m}$ (roze vectoren). In de groene polygoon zijn transportvectoren voor de grove fractie meer naar het midden van de geul gericht.

4 Discussie

4.1 Geschiktheid van het Delft3D model

Er zijn te weinig geschikte sedimenttransportmetingen uitgevoerd om de transportpatronen die door het model worden berekend direct te valideren. Om de waarde van de beschreven resultaten toch enigszins te kunnen beoordelen zijn aanvullende berekeningen uitgevoerd, waarmee het initiële patroon van sedimentatie en erosie in het interessegebied is bepaald (zie Figuur 4.1). Dit patroon kan vergeleken worden met gemeten morfologische verandering (zie Figuur 4.2). Voor het reproduceren van de gemeten morfologische verandering is het van belang dat gradiënten in sedimenttransport goed gereproduceerd worden door het model. Dit is dus nog iets complexer dan het reproduceren van de sedimenttransporten. De aanvullende modelberekeningen zijn wat betreft de instellingen en de forcering identiek aan de berekeningen die in Paragraaf 3.1 zijn besproken, behalve dat de bodemhoogte nu wordt aangepast (d.w.z. morfodynamische in plaats van morfostatische berekeningen). De simulatieperiode is nog steeds twee M2 getijperiodes, zodat morfologische veranderingen aan het eind van de modelsimulatie klein zijn (enkele millimeters, zie Figuur 4.1).

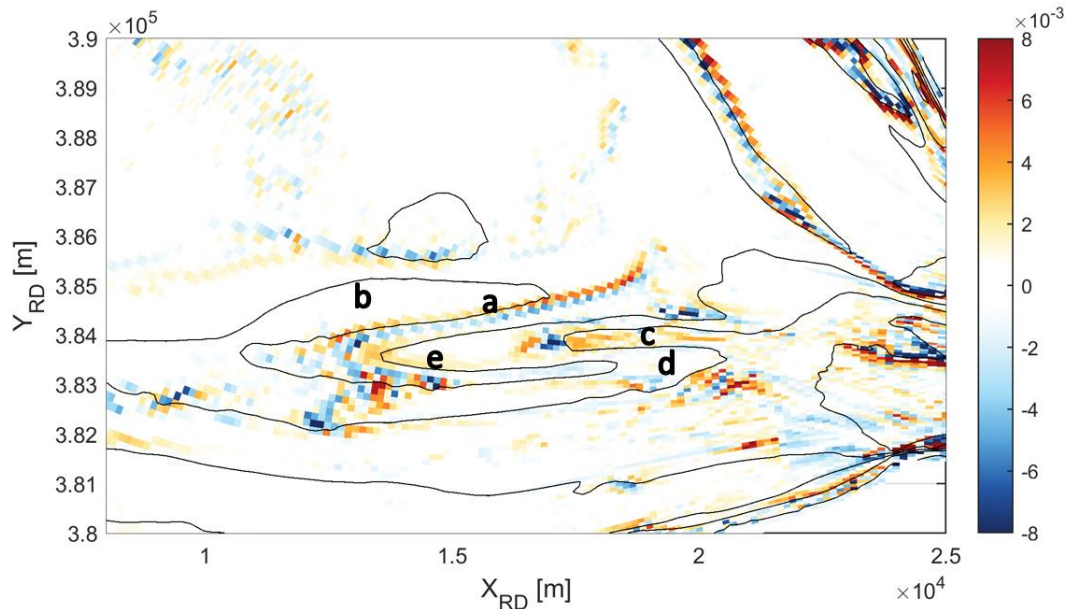
De gemeten patronen in bodemverandering worden deels gereproduceerd door het model. Aan de zuidkant van Spleet berekent het model een rand met sedimentatie, en iets ten zuiden daarvan een rand met lichte erosie ([a] in Figuur 4.1). Dit is ook terug te zien in de gemeten morfologische verandering. In het diepere gedeelte van Spleet is geen sedimentatie of erosie zichtbaar (d.w.z. niet in modelberekeningen en niet in Vaklodingen; [b] in Figuur 4.1). De modelresultaten laten sedimentatie zien in de ebschaar tussen Spleet en de Wielingen (voor het deel dieper dan 15 m NAP; [c] in Figuur 4.1). In de recente Vaklodingen is die sedimentatie alleen aan de zuidkant van de ebschaar terug te zien. De sedimentatie waar de ebschaar afbuigt van de Wielingen is niet in de modelresultaten terug te zien ([d] in Figuur 4.1). In het deel aan de zuidkant van de ebschaar, rond de 10 m NAP dieptecontour ([e] in Figuur 4.1), is zowel in de modelresultaten als in de Vaklodingen sedimentatie te zien. Ten zuiden daarvan treedt zowel in de meting als in het model erosie op.

De initiële morfologische veranderingen die in Figuur 4.1 te zien zijn kunnen deels het gevolg zijn van morfodynamische inspeleeffecten. Morfodynamische inspeleeffecten treden op wanneer de initiële bodemligging niet in morfodynamisch evenwicht is onder de hydrodynamische forcering die in het model is opgenomen. Aan het begin van de modelberekening zullen verstoringen ten opzichte van het morfodynamische evenwicht door het model worden weggevaagd door lokale erosie en sedimentatie.

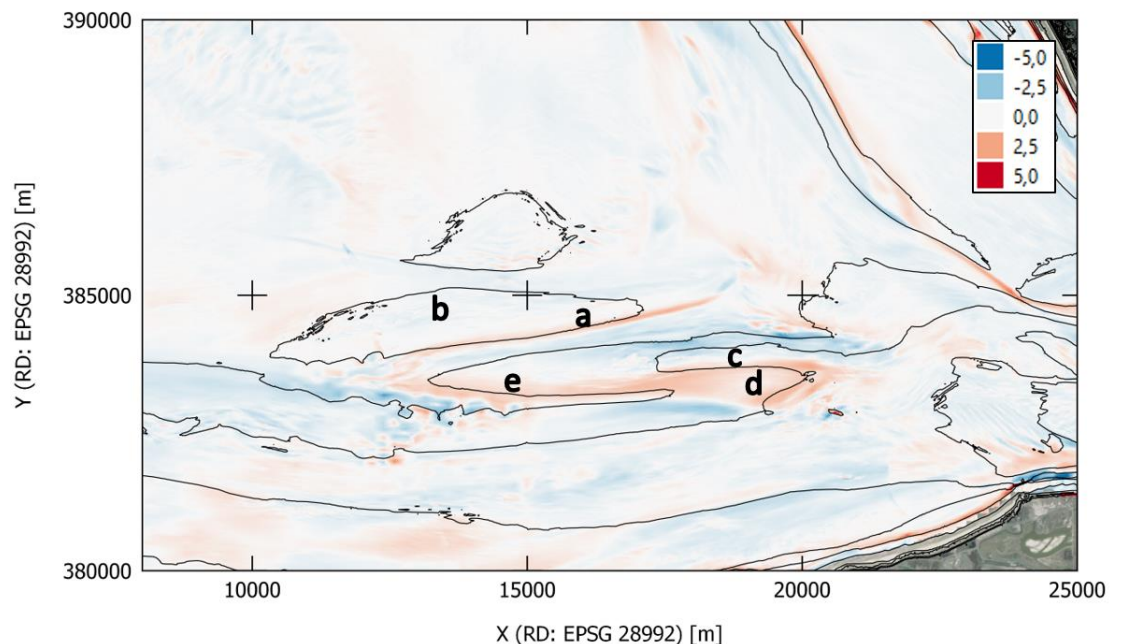
In de huidige modelberekeningen zijn geen moeilijk erodeerbare lagen opgenomen. Door de aanwezigheid van die lagen zullen bepaalde delen in werkelijkheid moeilijk of langzamer eroderen dan op basis van de gradiënten in sedimenttransportcapaciteit verwacht zou worden. Recente analyses (Van der Vegt et al., 2020) laten zien dat erosie resistente lagen dagzomen in het interessegebied, waardoor ze de morfologische ontwikkeling waarschijnlijk beïnvloeden. Daarnaast is het baggeren en storten van zand en slib niet in het model opgenomen, terwijl effecten daarvan de gemeten bodemveranderingen in delen van de Schelde-monding hebben beïnvloed. Het is nog niet precies duidelijk hoe groot het effect van baggeren en storten is op de morfologische verandering aan de zuidkant van de Vlakte van de Raan. Er liggen geen stortlocaties binnen het interessegebied, maar door het storten kan het aanbod van sediment ook in het interessegebied toenemen.

Beide effecten (d.w.z. harde lagen en baggeren/storten) zullen een minimaal effect hebben op de initiële sedimentatie en erosie die hier zijn weergegeven, maar in morfodynamische modellering over een langere periode worden die effecten wel relevant.

Samenvattend kan de modelschematisatie nog verbeterd worden en er zijn langere modelsimulaties nodig om de reproductie van de morfologische ontwikkeling goed te kunnen beoordelen. Toch is een behoorlijk groot deel van de morfologische verandering al in de patronen van initiële sedimentatie en erosie opgenomen. Dit geeft enigszins vertrouwen dat het model in staat is om de sedimenttransportpatronen nauwkeurig te reproduceren.



Figuur 4.1 Initiële patroon van sedimentatie en erosie [m] op basis van korte modelberekeningen (2 M2 getijperiodes) voor 16 verschillende golfcondities.

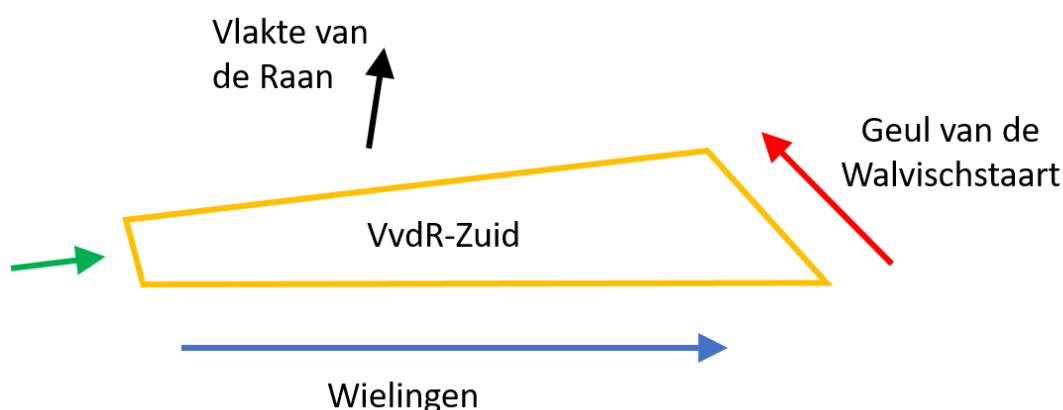


Figuur 4.2 Gemeten verandering in bodemhoogte tussen 2011 en 2017 (in meters) op basis van Vaklodingen. De dieptecontouren (elke 5 m t.o.v. NAP) zijn bepaald op basis van de bodemhoogte in 2011.

4.2 Interpretatie van de resultaten voor het ontwerpen van de suppletie

Ter ondersteuning van het ontwerpen van de pilotsuppletie in de Schelde-monding was het doel van deze studie (zoals geformuleerd in Hoofdstuk 1) inzicht te krijgen in de sedimenttransportpatronen in de Schelde-monding en het ontrafelen van de bijdragen van de afzonderlijke processen. De zuidkant van de Vlake van de Raan is aangewezen als voorkeurszone voor de pilotsuppletie, daarom is relatief veel aandacht besteed aan het beschrijven van de sedimenttransporten in deze zone.

De zuidkant van de Vlake van de Raan is een overgangszone tussen deelgebieden van de Schelde-monding waar de transportpatronen ruimtelijk meer uniform zijn. Zuidelijk ligt de Wielingen; een dominante geul met veel transportcapaciteit, netto richting de Westerschelde (blauwe pijl in Figuur 4.3). Centraal op de Vlake van de Raan is het residuele sedimenttransport richting het noordoosten gericht. Golven hebben hier een belangrijk aandeel in het totale transport (zwarte pijl in Figuur 4.3). In de Geul van de Walvischstaart (d.w.z. aan de noordoostkant van de voorkeurszone) is de transportcapaciteit relatief laag. Deze geul is ebdominant, zodat het residuele sedimenttransport richting het noordwesten gericht is (rode pijl in Figuur 4.3).



Figuur 4.3 Schematische weergave van de dominante transportrichting in drie delen van de Schelde-monding (namelijk de Wielingen, de Vlake van de Raan en de Geul van de Walvischstaart) met de zuidkant van de Vlake van de Raan daartussen.

De overgangen naar omliggende deelgebieden en de complexe bodem zorgen langs de zuidkant van de Vlake van de Raan voor veel ruimtelijke variatie in (1) transportrichting, (2) transportcapaciteit en (3) dominante forcering. De ruimtelijke variatie maakt het lastig om de morfodynamiek van het gebied te vangen met de aanleg en monitoring van één suppletie. Met een aantal kleinere suppleties zou dat wel kunnen. Voor het kiezen van de locaties moeten dan afwegingen gemaakt worden op de drie genoemde aspecten.

1. Transportrichting

Hoe dichterbij de Wielingen, hoe meer het residuele transport aan de zuidkant van de Vlake van de Raan het vloed-dominante transport in de Wielingen volgt. Gesuppleerd zand zal hier op den duur richting de keel van de Schelde-monding (d.w.z. de lijn Vlissingen – Breskens) getransporteerd worden.

Zand dat verder naar het noorden gesuppleerd wordt (bijv. rond Spleet) zal opgepikt worden door het residuele transport richting de Geul van de Walvischstaart. Dit zand zal minder dicht bij de keel van de Schelde-monding komen dan zand gesuppleerd langs de Wielingen.

2. Transportcapaciteit

De sedimenttransportcapaciteit op een bepaalde locatie kan gezien worden als een maat voor de levensduur van een suppletie op die locatie. De levensduur van de suppletie is relevant voor het volgen van de morfologische ontwikkeling tijdens de monitoring en uiteindelijk voor de kennisontwikkeling. De bruto transportcapaciteit is relevant voor de dispersie van suppletiezand. De residuele transportcapaciteit is relevant voor de verplaatsing en de morfologische ontwikkeling van de suppletie als geheel.

Aan de zuidkant van de Vlakte van de Raan is de transportcapaciteit lang niet zo groot als in de Wielingen. In Spleet en in de ebschaar tussen Spleet en de Wielingen is de transportcapaciteit groter dan op ondieptes tussen deze geulen. Op basis hiervan is het te verwachten dat een suppletie in Spleet of in de ebschaar sneller zal vervormen en/of verplaatsen dan een suppletie in één van de ondiepere zones.

De transportcapaciteit neemt af bij een toenemende korrelgrootte van gesuppleerd zand. De transportcapaciteit op een bepaalde locatie kan dus te groot zijn om de ontwikkeling van een suppletie met zand van 200 µm goed te monitoren, terwijl dat met zand van 300 µm of grover prima zou lukken.

3. Dominante forcering

De bijdrage van golven in het totale sedimenttransport verschilt per locatie, zodat sedimenttransport op sommige locaties primair het gevolg is van de getijbeweging en op andere locaties hebben golven ook een belangrijke rol. Het kiezen van een suppletielocatie is daarmee ook een afweging welke processen tijdens de monitoring en het vervolgonderzoek verder bestuurd gaan worden.

In de ebschaar tussen Spleet en de Wielingen is de getijstroming de dominante forcering voor sedimenttransport. Op de ondieptes rond de ebschaar en in Spleet is de bijdrage van golven in het totale transport groter. Ten noorden van Spleet is de bijdrage van golven nog groter; residuele sedimenttransporten zijn hier veel kleiner in afwezigheid van golven.

Bovenstaande afwegingen zullen onderdeel worden van het ontwerpproces voor een suppletie, net als afwegingen vanuit andere disciplines (bijv. ecologie en geologie).

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Sedimenttransportpaden in de Schelde-monding

Uit de modelresultaten volgt dat belangrijkste transportpatronen in de Schelde-monding kunnen worden beschreven aan de hand van de sedimenttransporten in de verschillende morfologische eenheden:

- In het Oostgat is het sedimenttransport vloed-dominant langs het Bankje van Zoutelande. Langs de kust van Walcheren is het Oostgat eb-dominant in het noordelijke deel en vloed-dominant in het zuidelijke deel. In de Sardijngeul is het sedimenttransport vloed-dominant.
- In de Wielingen is de transportcapaciteit relatief groot en gericht naar de Westerschelde (d.w.z. in vloedrichting).
- Langs de Zeeuws-Vlaamse kust is de residuele transportrichting vergelijkbaar met de transportrichting in de Wielingen.
- In de Geul van de Walvischstaart is de transportcapaciteit lang niet zo groot als in diepe geulen als het Oostgat. Het sedimenttransport is in deze geul eb-dominant.
- Tussen het Oostgat/Sardijngeul en de Geul van de Walvischstaart is de ruimtelijke variatie in de transportcapaciteit en de residuele transportrichting groot. Golven leveren hier een grote bijdrage in het sedimenttransport. In Deurloo-Oost is het sedimenttransport over het algemeen naar het noorden gericht.
- Centraal op de Vlakte van de Raan is het residuele transport naar het noordoosten gericht. Zowel de getijstrooming als golven dragen bij aan het totale transport.

De berekende transportpatronen laten zien dat de zuidkant van de Vlakte van de Raan een overgangsgebied is tussen drie omliggende gebieden, namelijk de Vlakte van de Raan, de Geul van de Walvischstaart en de Wielingen. In het overgangsgebied variëren de transportsnelheid en de residuele transportrichting van plek tot plek. Dit wordt veroorzaakt door de gevarieerde bathymetrie, met Spleet en de ebschaar tussen Spleet en de Wielingen als belangrijke morfologische eenheden in het gebied. In Spleet is het residuele transport gewoonlijk richting het oosten-noordoosten gericht. Transportpaden lopen vanuit Spleet richting de Geul van de Walvischstaart. Golven hebben hier een belangrijk effect op het totale sedimenttransport (ongeveer 25% minder transport zonder golven). In de ebschaar is het transport gewoonlijk richting het oosten gericht. Transportpaden vanuit de ebschaar worden verder naar het oosten ook onderdeel van het eb-dominante transport in de Geul van de Walvischstaart. Golven hebben een kleinere rol in het sedimenttransport in de ebschaar (< 10%). Op de ondiepe banken tussen Spleet en de ebschaar varieert de residuele transportrichting sterk. Ten noorden van Spleet is de bijdrage van golven groot.

5.2 Vervolgstappen en aanbevelingen

De resultaten die beschreven staan in dit rapport gaan samen met de resultaten van analyses uit andere disciplines (bijv. ecologie en geologie) gebruikt worden voor het ontwerpen van een aantal suppletievarianten. Vervolgens zullen de effecten en het gedrag van de verschillende suppletievarianten beoordeeld worden aan de hand van morfodynamische berekeningen in Delft3D. Het model dat in deze studie is gebruikt zal dan weer ingezet worden.

Aanbevelingen voor aanvullend onderzoek zijn (1) het beschrijven van de recente morfologische ontwikkeling aan de zuidkant van de Vlakte van de Raan en (2) het kalibreren en valideren van het Delft3D model voor het reproduceren van die morfologische ontwikkeling.

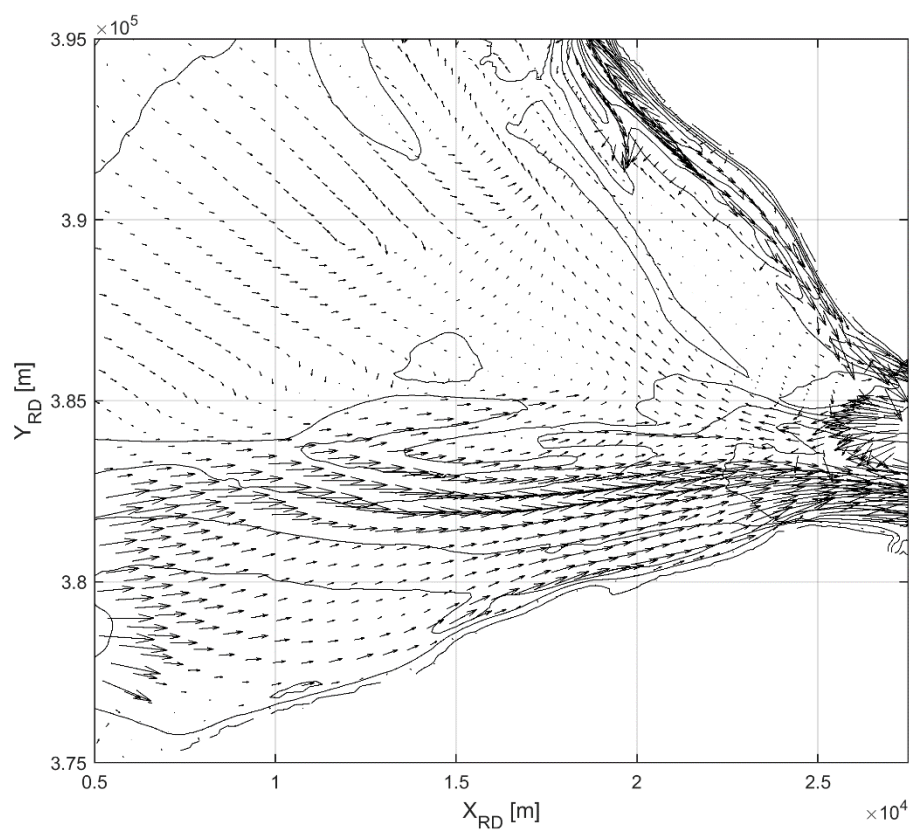
1. Eerdere studies (bijv. Van der Werf et al. (2020) en Van der Wegen et al. (2017)) waren gericht op de morfologische ontwikkeling van de gehele Schelde-monding. De gemeten morfologische ontwikkeling is nog niet beschreven voor het schaalniveau van de zuidkant van de Vlakte van de Raan. Dit zou veel systeemkennis opleveren over de morfologische ontwikkeling. Daarnaast is het interessant omdat de effecten van een suppletie aan de zuidkant van de Vlakte van de Raan dan beoordeeld kunnen worden ten opzichte van de morfologische ontwikkeling die plaatsvindt.
2. Door middel van numerieke modellering kan de morfologische ontwikkeling van de zuidkant van de Vlakte van de Raan verder bestudeerd worden. Het is dan nodig om (i) het Delft3D model dat is gebruikt in deze studie geschikt te maken voor lange-termijn morfodynamische berekeningen, en (ii) de modelberekeningen te valideren met de gemeten morfologische ontwikkeling.

6 Referenties

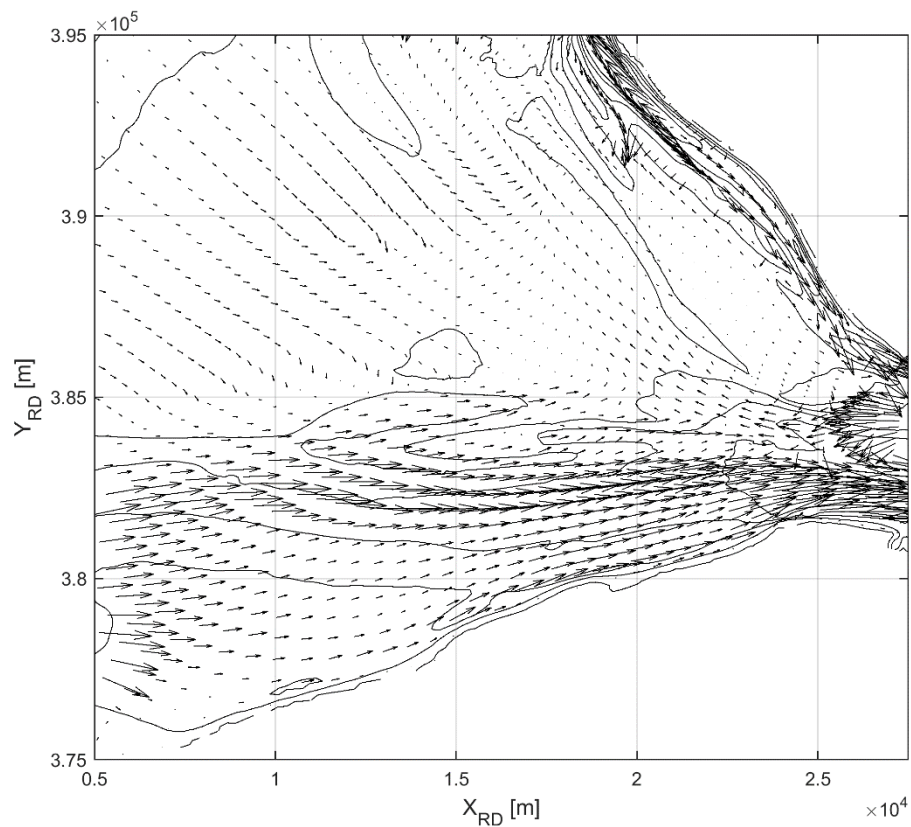
- De Maerschalck, B., van der Werf, J., Kolokythas, G., Quataert, E., Van Oyen, T., Vroom, J., . . . Mostaert, F. (2017). *Modelling Belgische Kustzone en Scheldemonding: Deelrapport 2 – Morfologische analyse scenario's Vlaamse Baaien. Versie 4.0*. WL Rapporten, 15_068_2. Waterbouwkundig Laboratorium & Deltares. Deltares rapport 1210301-010-ZKS-0003.
- Elias, E., & Pearson, S. (2020). *SedTRAILS - Sediment TRANsport vizualization & Lagrangian Simulator*. Rapport 11205236-003-ZKS-0002, Deltares, Nederland.
- Plancke, Y., Vereecken, H., Claeys, S., Verwaest, T., & Mastaert, F. (2014). *Hydro- en sedimentdynamica in het mondingsgebied van het Schelde estuarium. Delrapport 1 - Factual data rapport frame- en puntmetingen periode augustus 2014*. Waterbouwkundig Laboratorium rapport 14_083.
- Röbke, B., Gawehn, M., & Van der Werf, J. (2018). *The morphodynamic Delft3D-Vlaamse Baaien model*. Rapport 1210301-001-ZKS-0007, Deltares, Nederland .
- Shore Protection Manual. (1984). CERC, Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.
- Van der Vegt, H., Van Onselen, E., & Van der Spek, A. (2020). *Erosie-resistente lagen in het Westerschelde mondingsgebied en hun invloed op de pilot-suppletie*. Memo, Deltares, Nederland .
- Van der Wegen, M., Van der Werf, J., De Vet, P., & Röbke, B. (2017). *Hindcasting Westerschelde mouth morphodynamics (1963-2011)*. Rapport 1210301-001-ZKS-0006, Deltares, Nederland.
- Van der Werf, J. M.-H., Van der Spek, A., Van Weerdenburg, R., Craeymeersch, J., Tulp, I., & Ysebaert, T. (2020). *Morfologie en ecologie van de Schelde-monding. Overzicht van bestaande kennis en data*. Rapport 11203725-000-ZKS-0017, Deltares, Nederland.
- Van der Werf, J., Van Weerdenburg, R., Van der Heijden, L., Meijer-Holzhauer, H., & Taal, M. (2020). *Pilot-suppletie Schelde-monding: afwegingskader en alternatieven voor suppletiezones*. Rapport XXX, Deltares, Nederland.
- Van Rijn, L. (2007). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 649:667.
- 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.
- 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 Bijlage

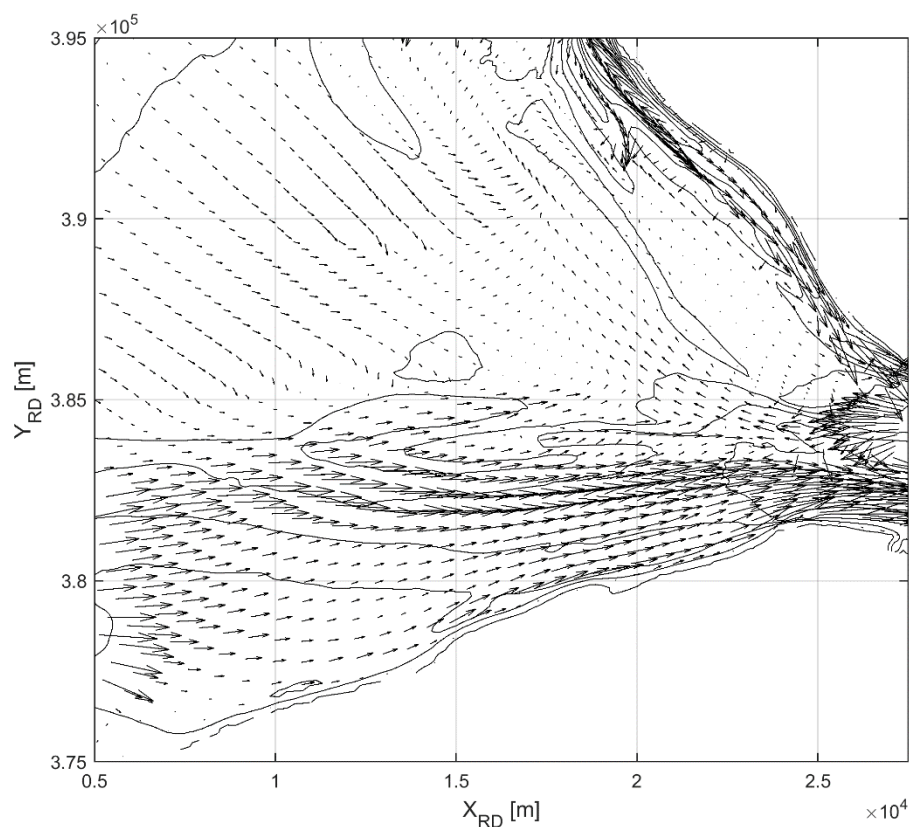
A.1 Residueel transport bij afzonderlijke golfcondities



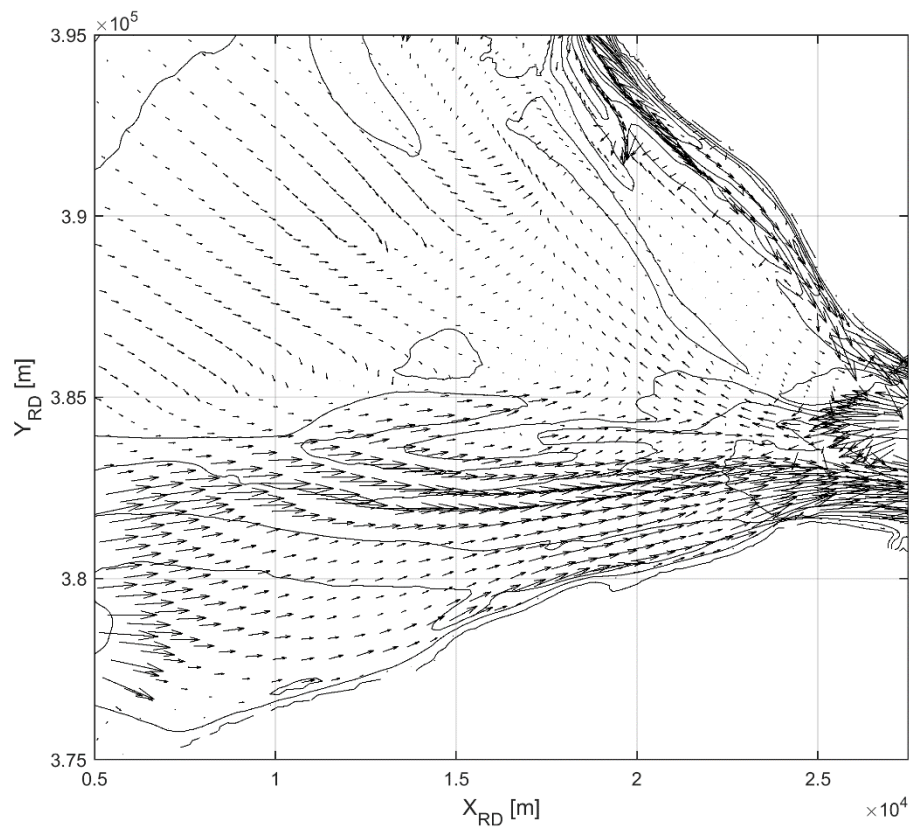
Figuur A.1 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 1 (zie Tabel 2.1).



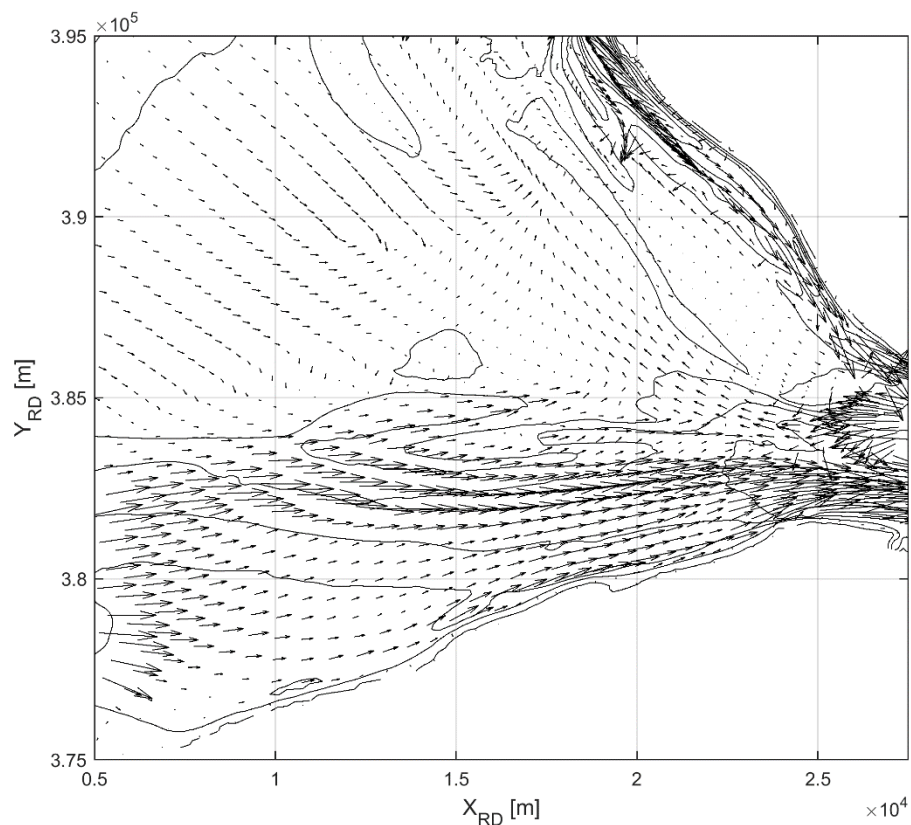
Figuur A.2 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 2 (zie Tabel 2.1).



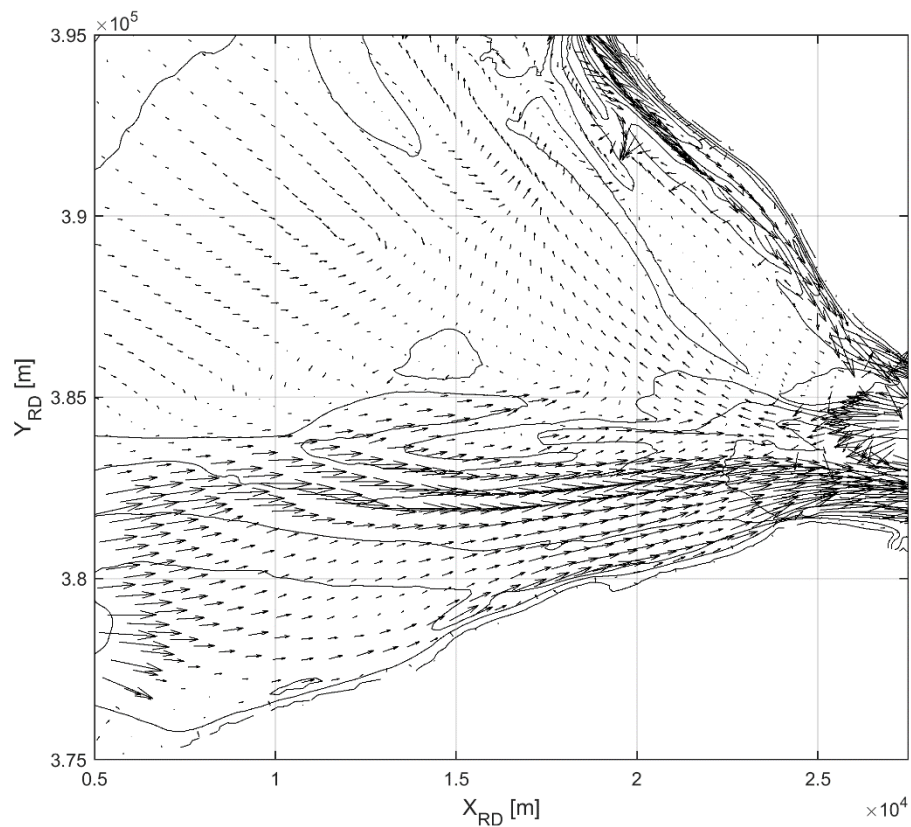
Figuur A.3 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 3 (zie Tabel 2.1).



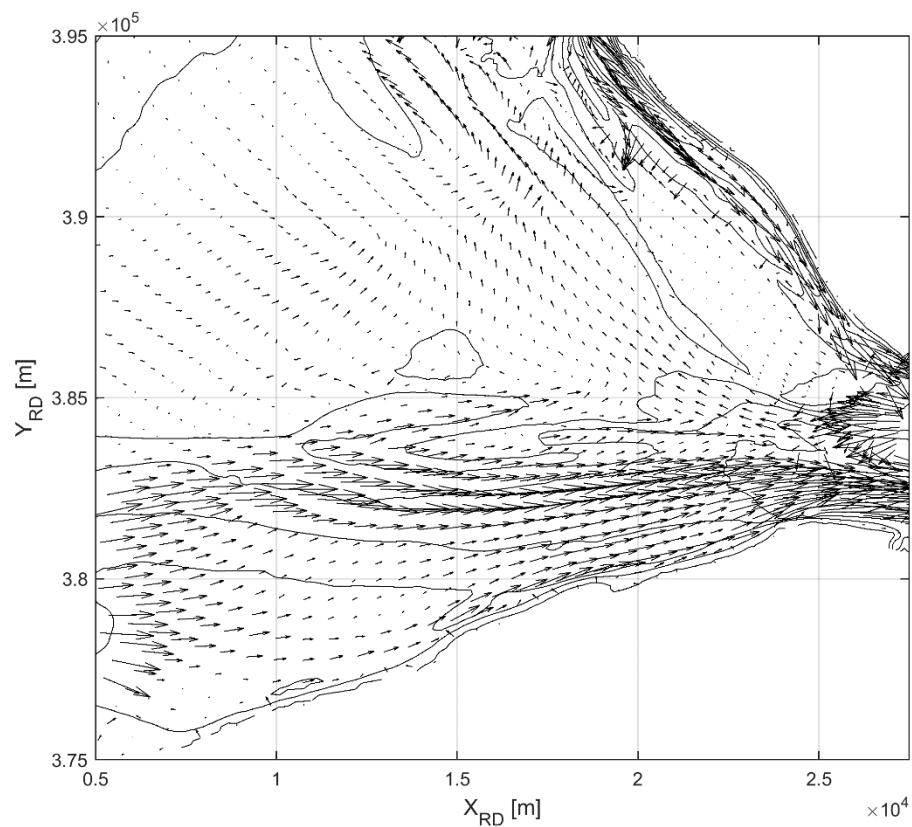
Figuur A.4 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 4 (zie Tabel 2.1).



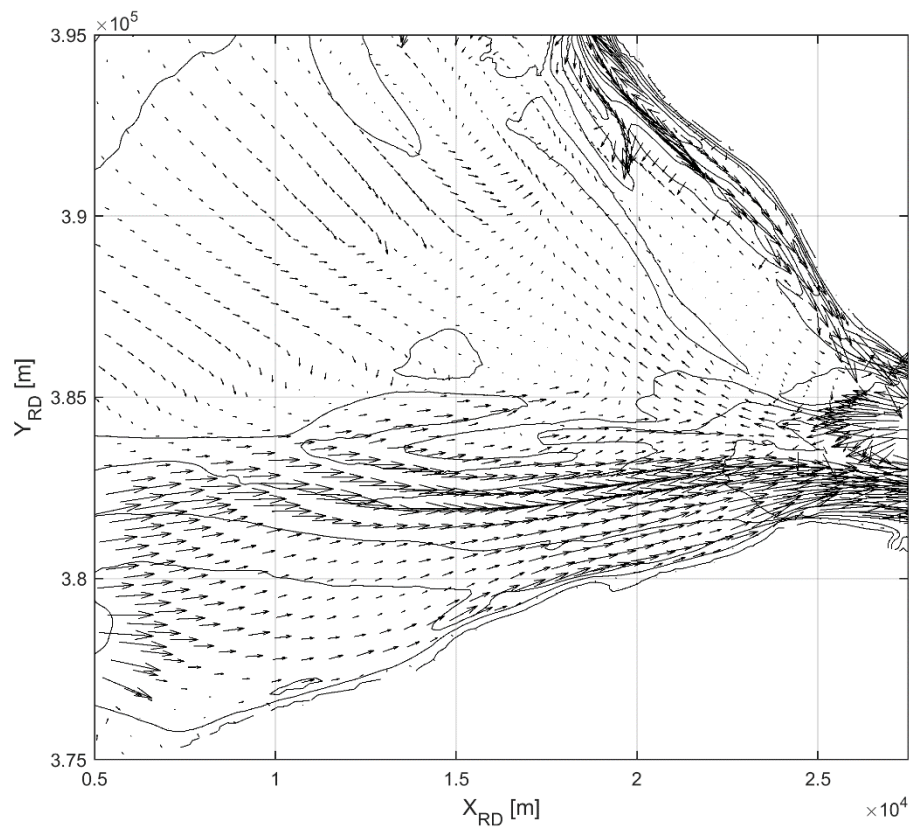
Figuur A.5 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 5 (zie Tabel 2.1).



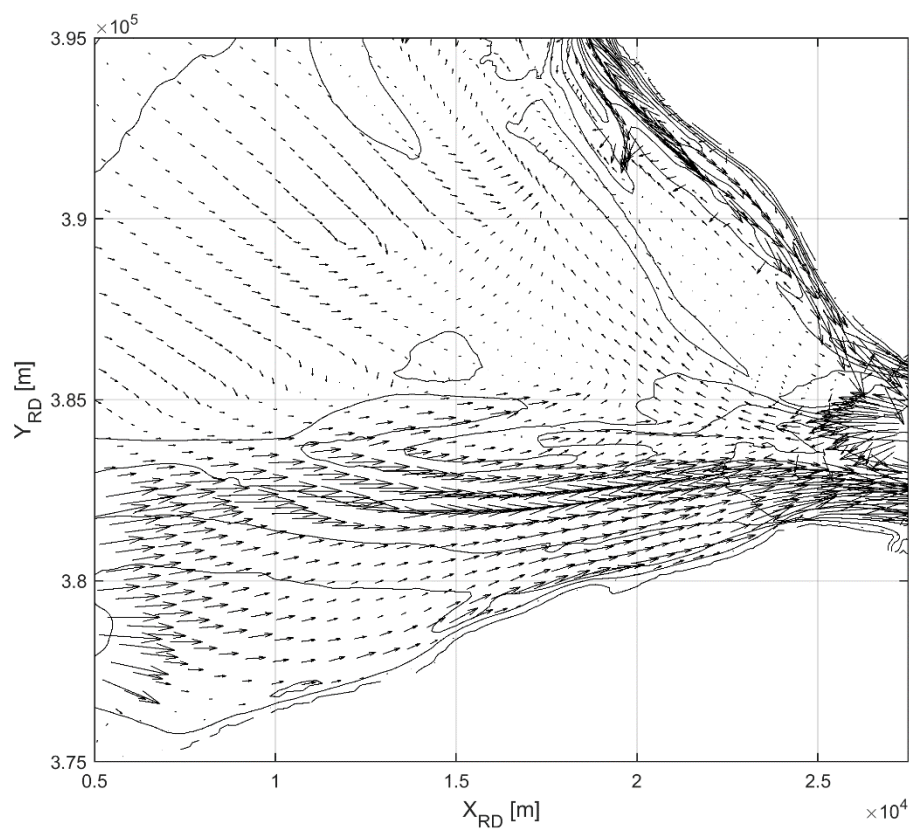
Figuur A.6 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 6 (zie Tabel 2.1).



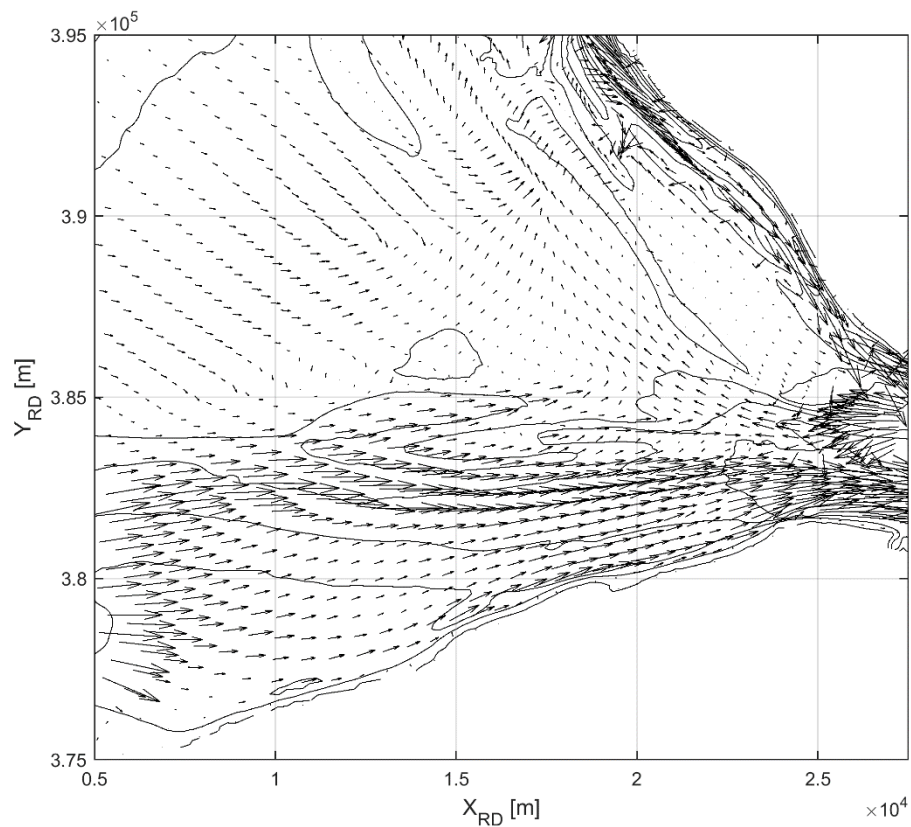
Figuur A.7 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 7 (zie Tabel 2.1).



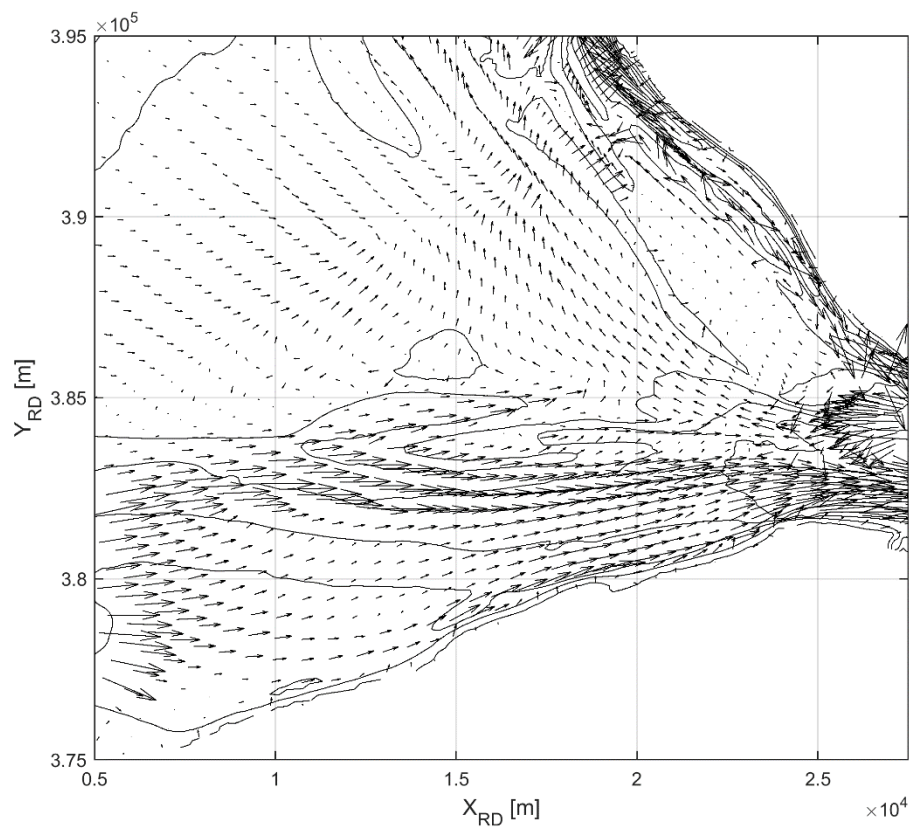
Figuur A.8 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 8 (zie Tabel 2.1).



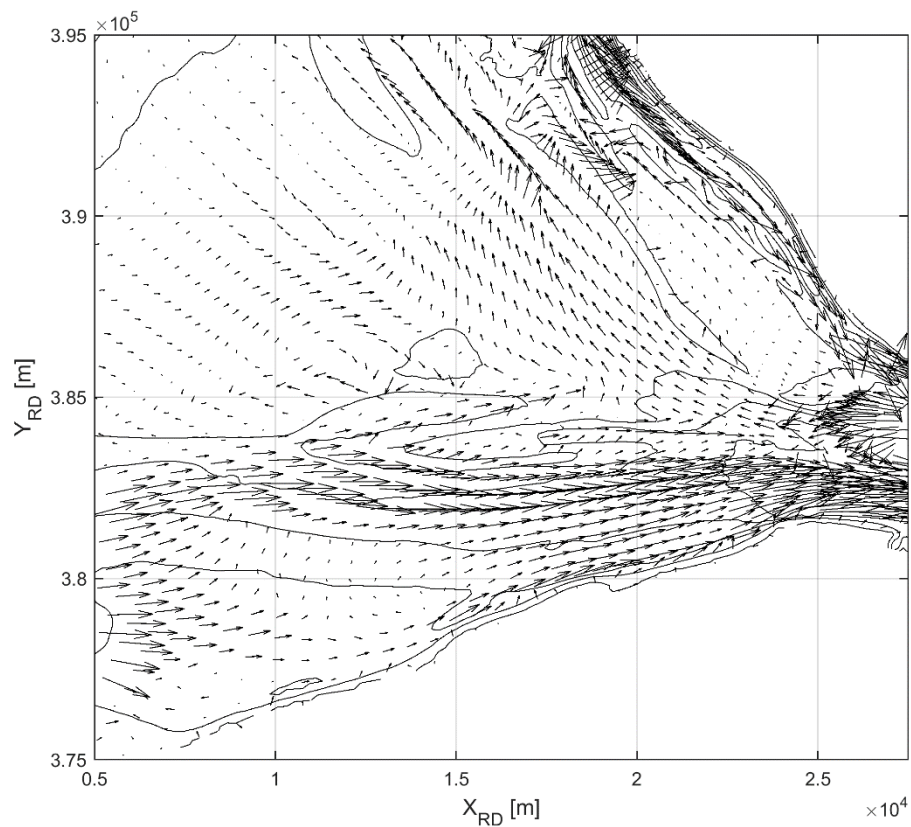
Figuur A.9 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 9 (zie Tabel 2.1).



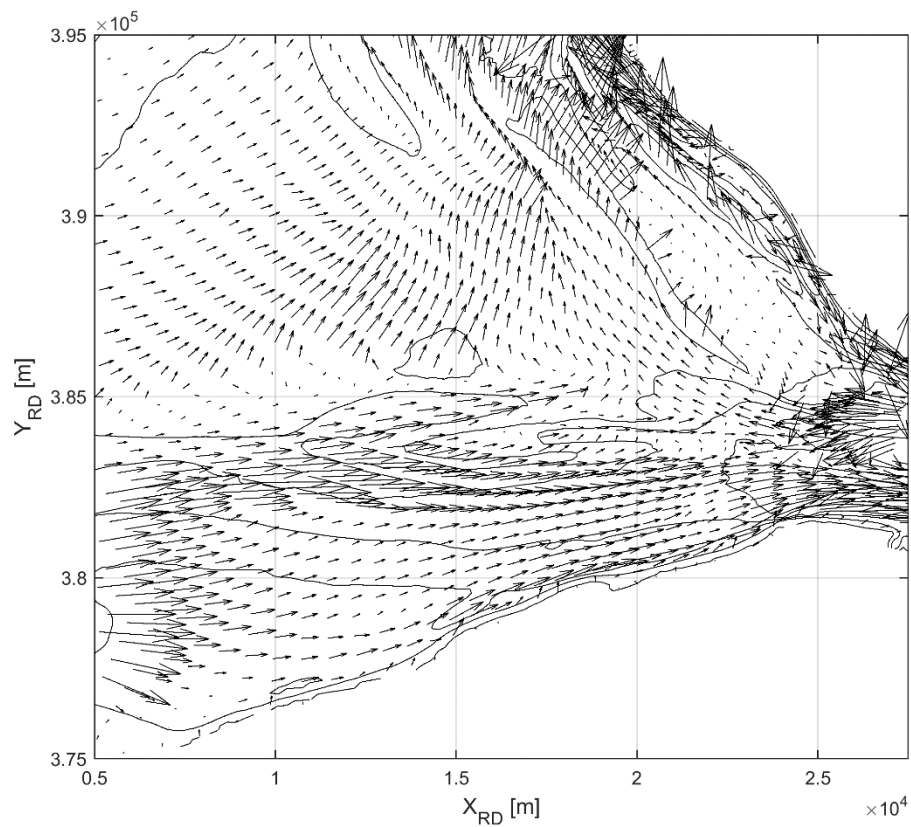
Figuur A.10 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 10 (zie Tabel 2.1).



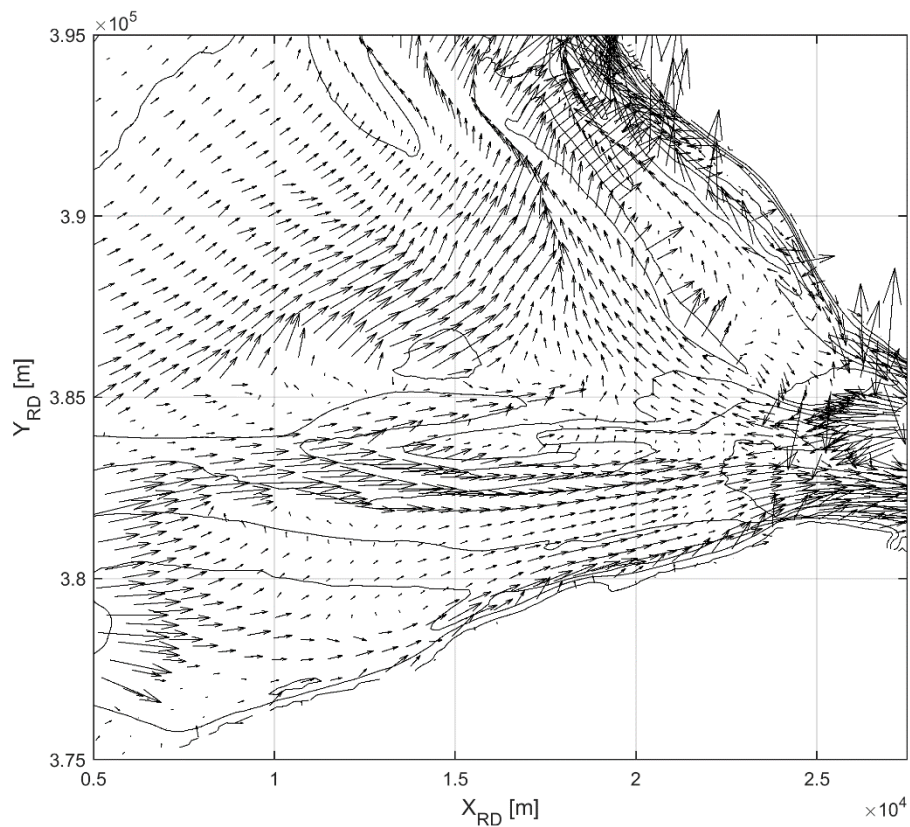
Figuur A.11 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 11 (zie Tabel 2.1).



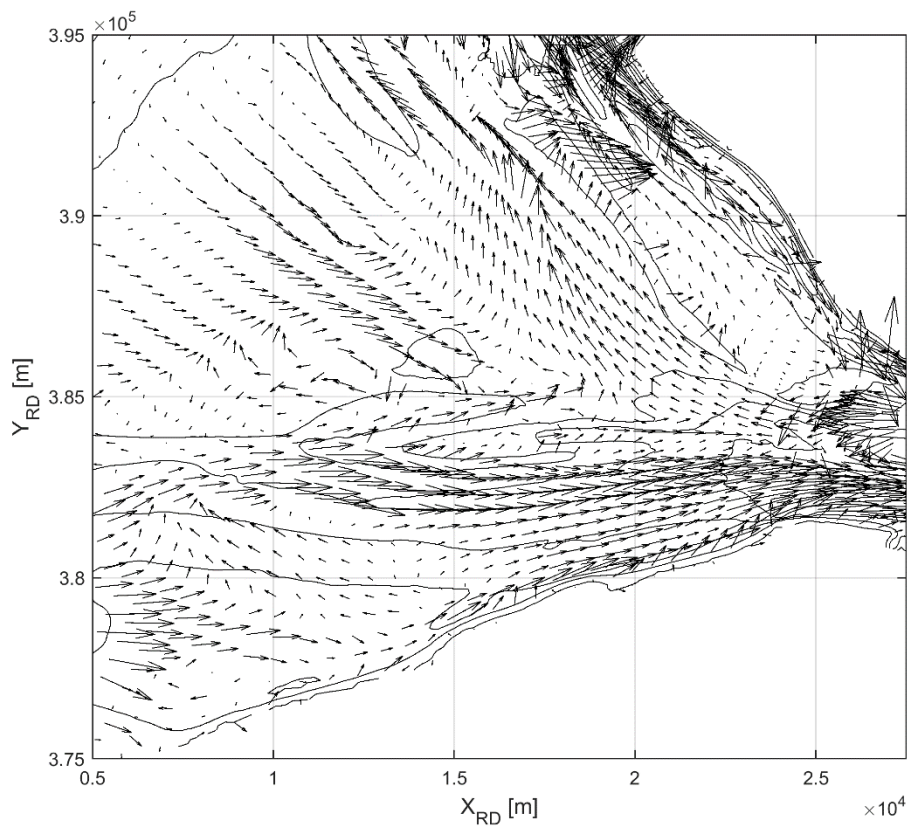
Figuur A.12 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 12 (zie Tabel 2.1).



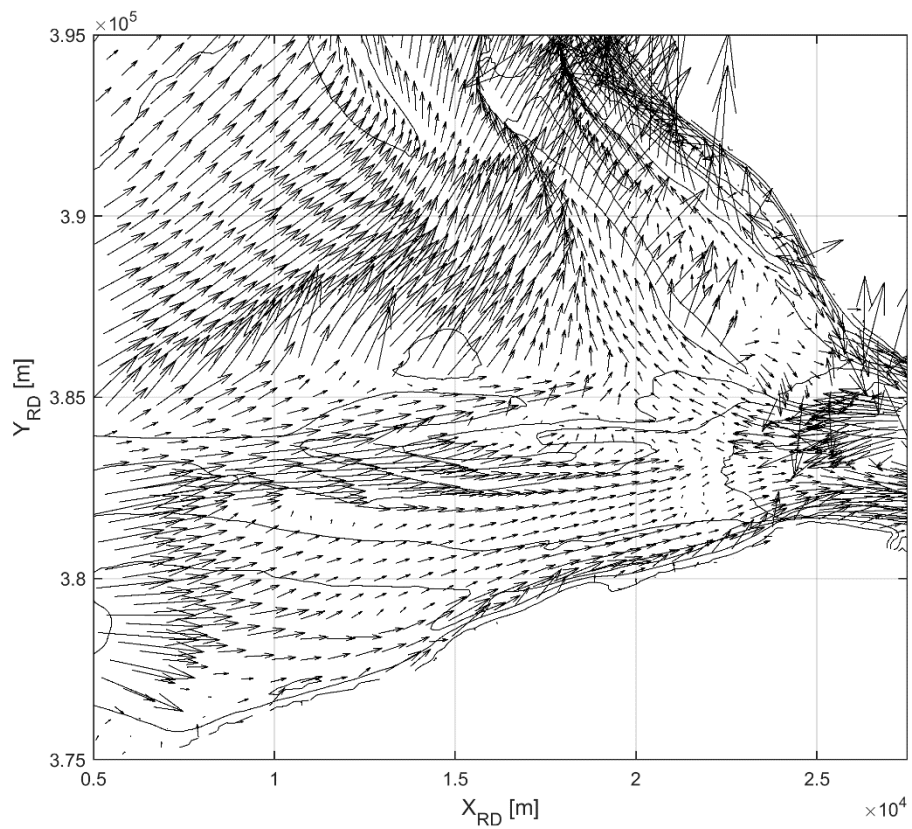
Figuur A.13 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 13 (zie Tabel 2.1).



Figuur A.14 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 14 (zie Tabel 2.1).



Figuur A.15 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 15 (zie Tabel 2.1).



Figuur A.16 Residuele sedimenttransportvectoren bij golfconditie 16 (zie Tabel 2.1).

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