

Evaluatie systeemsuppletie Bankje van Zoutelande



Evaluatie systeemsuppletie Bankje van Zoutelande

Auteur(s)

Edwin Elias

Stuart Pearson

Roy van Weerdenburg

Evaluatie systeemsuppletie Bankje van Zoutelande

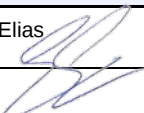
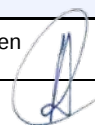
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat WVL
Contactpersoon	Stefan Pluis
Referenties	
Trefwoorden	Walcheren, Morfologie, Suppleties

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	07-01-2021
Projectnummer	11205236-003
Document ID	11205236-003-ZKS-0002
Pagina's	92
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Edwin Elias Stuart Pearson Roy van Weerdenburg	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
	Edwin Elias 	Marcel Taal 	Toon Segeren 	

Samenvatting

Rijkswaterstaat en Deltares onderzoeken samen de mogelijkheden van systeemsuppleties, een manier van suppleren waarbij ook het morfologische gedrag op grotere schaal wordt beïnvloed. Één mogelijke locatie hiervoor is het Bankje van Zoutelande in de Scheldemonding. De invloed op het systeemgedrag die daarmee beoogd wordt is het verminderen van de structurele erosie van de kust van Zuidwest-Walcheren. Deze is gemiddeld tussen de 2 en 4 m/jaar.

Het onderzoek is gebaseerd op Delft3D-simulaties en de toepassing van SedTRAILS. SedTRAILS visualiseert de complexe sedimenttransportpatronen die Delft 3D berekent. Hierdoor zijn de sedimenttransportstromen rond het Bankje van Zoutelande (en de veranderingen hierin door het aanbrengen van een suppletie) beter te analyseren en ook te begrijpen.

Het onderzoek leidt tot de conclusie dat de erosie van de kustlijn vooral gerelateerd is aan de stroming door het Oostgat. Deze stromingen kunnen efficiënt sediment kustlangs afvoeren. Sedimentaanbod vanaf het Bankje van Zoutelande, maar ook vanuit de kustzone, wordt snel afgevoerd. Wat leidt tot structurele erosie. Ter hoogte van Zoutelande ligt een divergentiepunt in de sedimenttransporten. Dit divergentiepunt migreert langs de kust onder invloed van golven en is een mogelijke oorzaak voor de geobserveerde verliezen. Sediment ten zuiden van het divergentiepunt wordt richting de Sardijnegeul verplaatst, ten noorden hiervan richting Westkapelle.

De drie voorgestelde suppletievarianten liggen allen aan de zeewaartse zijde van het Bankje van Zoutelande, met een kruinhoogte van -5 m NAP, -2,5 m NAP en 0 m NAP. Het doel van de suppletie is de golfbelasting op de Zuidwestkust van Walcheren te verkleinen. Op basis van de modellering wordt geconcludeerd dat de suppletievarianten geen invloed op de golfhoogte langs de kust van Walcheren hebben. Lokaal op de suppletie treedt wel een verlaging op, maar deze is niet zichtbaar langs de kustlijn. Geen van de suppleties heeft direct of indirect een effect op de kustlijn of op de grootschalige sedimenttransporten. Alleen lokaal op de suppletielocatie zijn er verschillen in sedimenttransport te onderscheiden.

Op basis van de modellering kan geconcludeerd worden dat er geen directe sedimenttransportpaden tussen het Bankje van Zoutelande en de kustzone aanwezig zijn. Het Oostgat is een effectieve blokkade en voert al het sediment kustlangs af. De suppleties zullen dus niet bijdragen tot vergroting van de zandvolumes in de kustzone. De suppletie zal ook geen effect hebben op de kusterosie. Het golfklimaat blijft immers ongewijzigd. Het is mogelijk dat systeemsuppleties met een ander doel, zoals het vergroten van de zandvoorraden in het kustfundament, behouden van morfologische eenheden, of het realiseren van ecologische kansen wel effectief zijn. De gepresenteerde modelresultaten zouden gebruikt kunnen worden om een eerste afschatting te maken.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doelstelling	7
1.3	Aanpak	7
1.4	Leeswijzer	8
2	Beschrijving van het studiegebied	9
2.1	Westerscheldemonding	9
2.2	Morfologische processen en veranderingen	11
2.3	Menselijk ingrijpen	17
2.4	Kustlijnindicatoren	20
3	Modellering	24
3.1	Het Delft3D model	24
3.2	Toepassing van SedTRAILS	26
3.3	Randvoorwaarden; Morfologisch Getij en Golfklimaat	28
3.3.1	Keuze van het morfologische getij	28
3.3.2	Bepaling van een representatief golfklimaat	29
3.4	Een overzicht van de modelsimulaties en suppletievarianten	30
3.4.1	Suppletieontwerpen	31
3.4.2	Een afbakening van kansen en risico's	33
3.4.3	SedTRAILS instellingen	33
4	Modelresultaten	35
4.1	T0 model resultaten	35
4.1.1	Stromingen en transporten door het getij	35
4.1.2	Getijgedreven transporten	37
4.1.3	Invloed van de buitendelta op het golfklimaat	39
4.1.4	Jaargemiddelde sediment transporten (getij en golven)	41
4.1.5	Sediment transport vanaf de suppletielocatie	48
4.2	Resultaten modellering suppletievarianten	49
4.2.1	Invloed van de suppleties op het golfklimaat	49
4.2.2	Invloed op de sedimenttransporten	53
5	Conclusies & Aanbevelingen	55
5.1	Conclusies	55
5.2	Aanbevelingen	57
6	Referenties	58

A	Kustindicatoren	60
A.1	Raai 2484	60
A.2	Raai 2694	63
A.3	Raai 2990	66
A.4	Raai 3189	69
B	Modelresults T0	72
B.1	Instantane transporten	72
B.2	Waves	73
B.3	SedTRAILS	76
B.3.1	Transportpaden per golfconditie	76
B.3.2	Transportpaden per golfconditie	84
B.3.3	Overzicht transportpaden per deelgebied	87

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Het onderzoeksprogramma Kennis Primaire Processen Beheer & Onderhoud Kust (KPP B&O Kust) ondersteunt Rijkswaterstaat bij het onderhoud en beheer van de kust. Om alternatieve manieren ten behoeve van het onderhoud van het kustsysteem en de kustlijn te verkennen, wordt er binnen het deelprogramma 'Systeemkennis Zeegaten' door Deltares onderzoek gedaan naar systeemsuppleties. Systeemsuppleties wijken af van traditionele strand- en vooroeversuppleties, doordat ze ontworpen zijn om de lokale hydraulische en morfologische processen te beïnvloeden. Op deze manier heeft een systeemsuppletie een beoogd positief effect op de zandvraag van het kustsysteem (voeden van het kustfundament) en de kustlijnontwikkeling ter plekke (onderhouden van de kustlijn met de BKL als referentie).

Een van de locaties langs de Nederlandse kust waar een systeemsuppletie wordt overwogen ligt bij het Bankje van Zoutelande in de Scheldemonding. De kust van Zuidwest-Walcheren wordt gekenmerkt door structurele erosie. Rijkswaterstaat suppleert daarom gemiddeld om de 3-5 jaar het strand op Zuidwest-Walcheren en voert hier tevens geulwandsuppleties uit om het kustsysteem te onderhouden en de kustlijn, met de basiskustlijn (BKL) als referentie, in stand te houden.

Het idee achter een systeemsuppletie bij het Bankje van Zoutelande is het verminderen van de golfbelasting op de Zuidwestkust van Walcheren. Op deze manier kan de levensduur van aangebrachte strandsuppleties potentieel verlengd worden en de (structurele) kusterosie geremd worden. Zo vormt een systeemsuppletie bij het Bankje van Zoutelande een alternatief of aanvulling op het reguliere kustonderhoud met strandsuppleties. Doordat het bij de systeemsuppletie om grotere hoeveelheden zand gaat dan bij strandsuppleties draagt deze ook bij aan een vergroting van het zandvolume in de Westerscheldemonding. Dit is nodig ter compensatie van de structurele zandverliezen in de monding (Elias et al, 2016).

1.2 Doelstelling

De doelstelling van de studie is het in kaart brengen van de sedimenttransportstromen rond het Bankje van Zoutelande en de veranderingen hierin door het aanbrengen van een suppletie. Waar mogelijk volgt een doorvertaling naar de effecten van de suppletie op de ontwikkeling van de achterliggende kustlijn en de kustlijnindicatoren.

1.3 Aanpak

In 2019 is begonnen met het in kaart brengen van de effecten van systeemsuppleties. In deze onderzoeken wordt getracht een aantal vaste stappen te doorlopen. Namelijk:

1. Begrijpen van het huidige gedrag van de kustlijn en vooroever (T0 studie).
2. Ontwerpen van rekenontwerpen voor de systeemsuppletie (T1 studie).
3. Toetsing van de rekenontwerpen door opstellen van de indicatoren (T0 en T1) en het definiëren van kansen en risico's.
4. Modelsimulaties voor de toetsing van de kansen en risico's zodat een afgewogen keuze van het voorkeursrekenontwerp kan worden gemaakt.

In deze studie is hiervan afgeweken. De voorgestelde systeemsuppletie op het Bankje van Zoutelande bevindt zich ver buiten de rekenschijf van de MKL. Hierdoor zijn er geen directe effecten op de indicatoren te verwachten. De focus van deze studie ligt dan ook op het beter

begrijpen van de sedimenttransporthuishouding van de Westerscheldemonding en de vooroever van Walcheren en minder op de kustlijnindicatoren.

Een beter begrip van de sedimenttransportprocessen is verkregen door de SedTRAILS tool te koppelen aan een grootschalig model van de Westerscheldemonding. Met behulp van SedTRAILS kunnen de sedimenttransportpatronen en de maatgevende processen inzichtelijk gemaakt worden. Hiervoor is een uitgebreide evaluatie van de T0 situatie gemaakt en zijn de effecten van de suppletievarianten op deze processen in kaart gebracht.

Uit initiële modelsimulaties was snel duidelijk dat de voorgestelde rekenontwerpen op het Bankje van Zoutelande slechts een zeer beperkt effect hebben op de sedimenttransporten. De analyse van de T0 is daarom uitgebreid voor de gehele vooroever van Zuidwest-Walcheren, ruwweg het gebied tussen Westkapelle en Vlissingen en landwaarts van de bank Elleboog. Het is de verwachting dat deze resultaten bijdragen tot een beter begrip van het systeem, waardoor in de toekomst eventuele alternatieve systeemsuppletielocaties hier beter kunnen worden gekozen.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 zijn de resultaten van een literatuurstudie aangevuld met nieuwe SedTRAILS modelresultaten. In dit hoofdstuk is tevens een samenvatting van de kustlijnindicatoren van Zuidwest-Walcheren, het kustvak ter hoogte van Zoutelande gegeven.

Een beschrijving van het model en de gebruikte randvoorwaarden is gegeven in Hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 geeft de resultaten van de evaluatie van T0 en suppletievarianten. De transporten worden op verschillende manieren geanalyseerd. Als meerdere methoden eenzelfde resultaat geven geeft dit vertrouwen in de resultaten. Het leidt wel tot enige herhaling in dit rapport in de beschrijving van de processen. In Hoofdstuk 5 worden de belangrijkste conclusies van deze rapportage gepresenteerd.

Het onderzoek geeft geen aanwijzing dat de voorgestelde suppletievarianten bijdragen aan het reduceren van kustlijnerosie van Zuidwest-Walcheren. Er is geen directe of indirecte koppeling tussen de suppleties en de kust te maken. De resultaten van dit onderzoek dragen wel bij tot een beter begrip van de maatgevende processen achter de sedimenttransporten. Dit ondersteunt toekomstige keuzes in het sedimentbeheer.

2 Beschrijving van het studiegebied

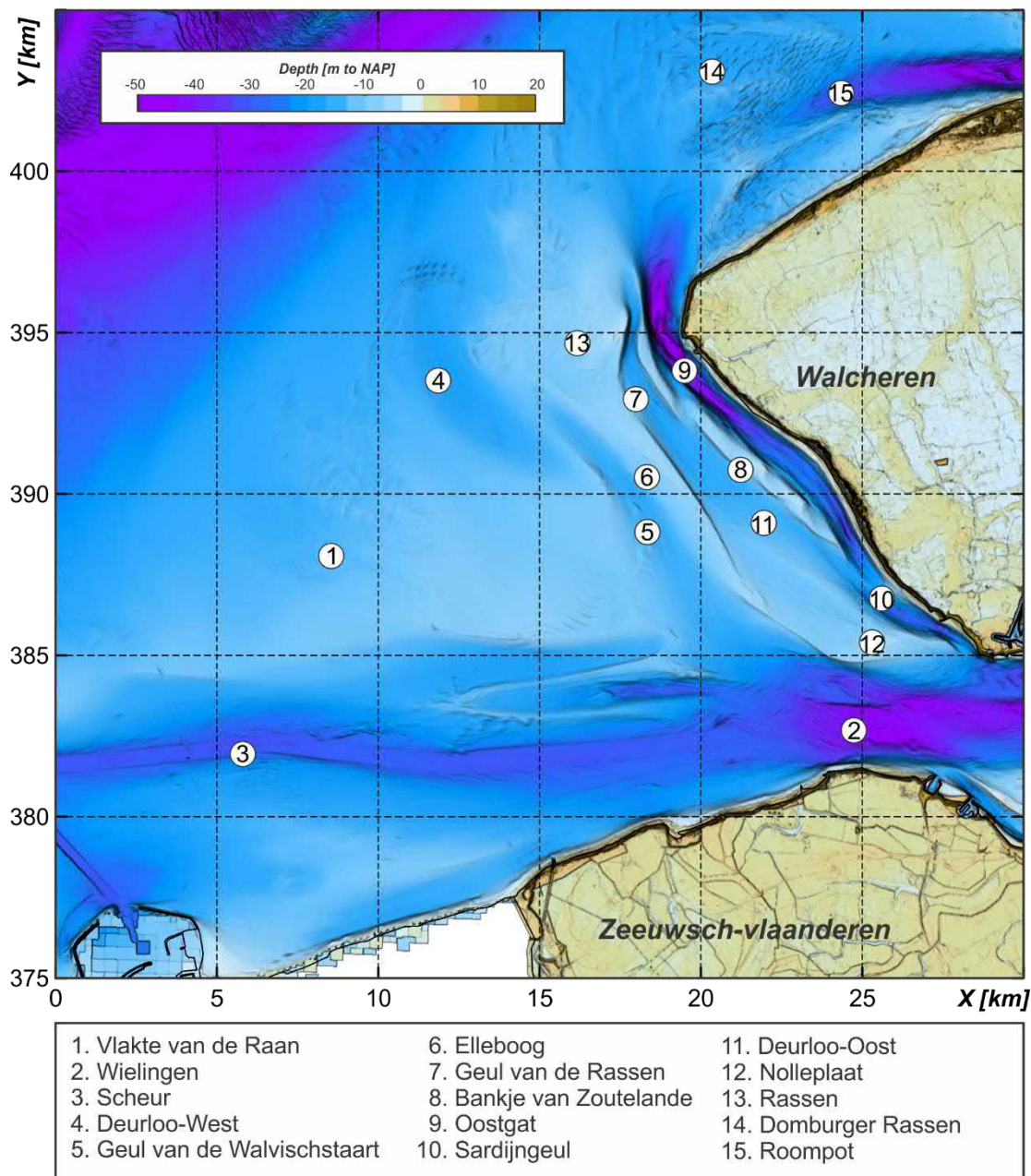
Deze beschrijving behandelt grootschalig de Westerschelde monding, de belangrijkste geulen en platen en de onderliggende processen. Naast natuurlijke processen spelen menselijke ingrepen een belangrijke rol in de kustlijnontwikkeling. Deze worden kort samengevat in H2.3. Alhoewel het model pas in het volgende Hoofdstuk 3 wordt beschreven zijn de resultaten wel al gebruikt in Hoofdstuk 2.3. De modelresultaten geven een unieke blik op de grootschalige processen in de Westerscheldemonding en verduidelijken de, op de literatuur gebaseerde, beschrijvingen van de processen. De kustlijnligging wordt beschreven in H2.4.

2.1 Westerscheldemonding

Figuur 2-1 geeft een beeld van de huidige geulen en platen in de Westerscheldemonding. De buitendelta of monding van de Westerschelde strekt zich uit van Walcheren in het noorden tot de Belgische kustwateren in het zuiden. De grote, voorliggende ondiepte wordt de Vlake van de Raan genoemd en heeft een hoogte tussen de -2 en -10 m NAP. De landwaartse begrenzing van de Westerschelde monding wordt vaak gekozen langs de denkbeeldige lijn Vlissingen-Breskens. Ten oosten van deze lijn wordt het morfologische gedrag verstoord door het op diepte houden (en verdiepen) van de geulen in de Westerschelde ten behoeve van de scheepvaart naar de haven van Antwerpen. De zuidelijke morfologische begrenzing is niet duidelijk vastgesteld, omdat hier de monding van de Wielingen overgaat in de kustzone van de Vlaamse Banken, een gebied met ondiepe kustparallelle zandruggen, gescheiden door diepe trogen.

De Vlake van de Raan [1, Figuur 2-1] kan gezien worden als het dominante platengebied behorende bij de buitendelta van het Westerschelde estuarium. Aan de zuidzijde ligt een brede en diepe oost-west lopende geul de Wielingen [2] die overgaat in Scheur [3]. Dit is de belangrijkste toegangsgeul voor de scheepvaart naar de Westerschelde en haven van Antwerpen. Sinds de jaren 60 wordt de Wielingen door baggerwerkzaamheden op een diepte van circa -20 m NAP gehouden. Voor deze studie is het met name het complexe geulen- en platenstelsel dat de noordoostzijde van de Vlake van de Raan begrensd van belang. Direct grenzend aan de zuidwestkust van Walcheren liggen de geulen het Oostgat [9] en de Sardijngeul [10]. Het Bankje van Zoutelande scheidt het Oostgat van Deurloo-Oost [11] en Geul van de Rassen [7]. Ten westen hiervan ligt een smal en langwerpig platencomplex Elleboog [6], met een hoogte tussen de -2 en -3 m, die de Rassen [3] en de Nolleplaat [12] verbindt. Deze plaat heeft de geul Deurloo in een oostelijk [11] en westelijk [4] deel gesplitst.

Contractie en versnelling van de stroming rond de harde zeewering van Westkapelle heeft het Oostgat hier lokaal sterk verdiept tot een diepte van -35 m NAP [9]. Ten noorden van Westkapelle bevindt zich een ondiepe vlakte: Domburger-rassen [14]. Deze vlakte vormt de natuurlijke scheiding tussen de mondingsgebieden van de Oosterschelde en Westerschelde. De hierop uitstromende geul Roompot [15] is onderdeel van het Oosterschelde estuarium. De Domburger Rassen en De Rassen kunnen worden opgevat als de buitendelta banken, behorende bij de geulen Oostgat, Rassen en Deurloo.



Figuur 2-1: Overzicht geulen en platen in de Westerscheldemonding. De onderliggende bodem is gebaseerd op de 2017 meting van de monding. Langs de kust van Walcheren (incl. Bankje van Zoutelande) en in de Westerschelde zijn de 2019 metingen gebruikt.

Sinds 1964 zijn er gedetailleerde dieptemetingen van de Voordelta beschikbaar. Analyse hiervan laat zien dat sinds 1964 de Westerscheldemonding stabiel in vorm is gebleven (Elias et al. 2016; Elias en Van der Spek, 2015). Dit is opmerkelijk omdat in de Westerschelde, zo'n 400 miljoen in-situ m³ sediment is verplaatst door baggeren en storten en 114 miljoen m³ zand is gewonnen sinds 1955 (Haecon, 2006). Wel verliest de monding sediment. Over de periode 1964-2011 wordt het verlies in het Nederlandse deel van de monding geschat op 67 miljoen m³ (Elias et al, 2016). De verliezen in het Belgische deel zijn echter veel groter.

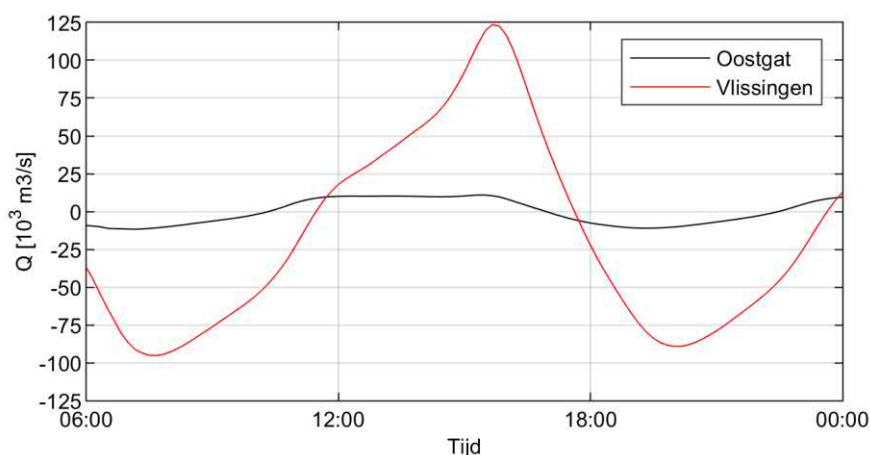
Een deel van het sedimentverlies in de monding is direct gerelateerd aan menselijk ingrijpen. Zo nam de Wielingen toe in diepte door de hier uitgevoerde verdiepingen, maar ook het baggeren in het estuarium speelt een rol. Het baggeren in de Westerschelde en met name het verwijderen van de ondiepe drempels in de vaargeul, verminderde de hydraulische weerstand,

waardoor het getijvolume met 5 tot 7% toenam (Gerritsen en de Jong, 1983). Het Oostgat blijft in deze periode relatief stabiel in ligging. Deze stabiliteit is deels het gevolg van het bestaan van Tertiaire en Pleistocene erosiebestendige lagen in de geulwand, de zuidwestelijke bodem van Walcheren (Van der Spek, 1997). Het Oostgat wordt geleidelijk dieper over de gehele lengte. Het zeewaartse deel, buitengaats van de westelijke punt van Walcheren, breidt zich uit in noordelijke richting. Omdat deze geul nabij de kust ligt heeft de ontwikkeling geresulteerd in kust- en geulwanderosie en veelvuldige zandsuppleties van de aanliggende stranden, geulwand en vooroevers. Ook zijn er grote zorgen over de stabiliteit van de zeer steile vooroever (Lazar et al., 2017).

2.2 Morfologische processen en veranderingen

De morfodynamiek van de geulen en platen in de Westerscheldemonding wordt vooral gedreven door het getij. Het getij is hier echter complex door de interactie van het kustlangs (noord-zuid) getij in de Noordzee en het kustdwars (west-oost) getij in en uit het Westerschelde estuarium. Deze interactie resulteert in een complex stromingspatroon over de buitendelta, dat met behulp van de in dit onderzoek uitgevoerde modellering goed in kaart kan worden gebracht. Figuur 2-3 tot en met Figuur 2-6 geven een impressie van de getijstromingen op basis van de *T0* simulatie.

Het getij plant zich als lopende golf vanuit het zuiden in noordelijke richting voort langs de Zeeuwse en Hollandse kust. Bij de Westerscheldemonding splits het getij in twee componenten. De noordelijke component, langs de kust, neemt daarbij in getijamplitude geleidelijk af. De oostwaartse component, het inkomende getij van de Westerschelde, neemt in amplitude toe en stroomt voornamelijk via de Wielingen het estuarium binnen, het getijvolume van het Oostgat is aanzienlijk kleiner. Dit verschil is ook duidelijk te zien als het debiet door twee raaien weergegeven wordt in Figuur 2-2. Raai Oostgat doorsnijdt het Oostgat ten zuiden van Zoutelande terwijl de raai Vlissingen het debiet door de raai Vlissingen-Breskens weergeeft (zie Figuur 2-3 voor ligging van de raaien).

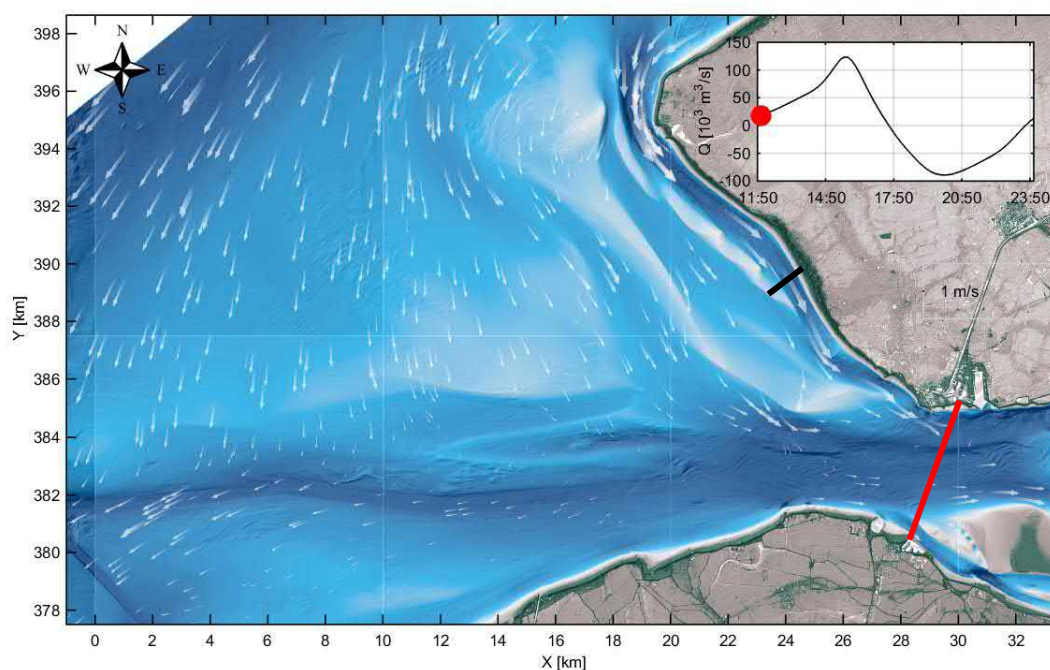


Figuur 2-2: Overzicht debiet op 6 maart van 06:00 tot 7 maart 00:00 2014 door het Oostgat nabij Zoutelande (zwarte lijn) en door de Wielingen -doorsnede Vlissingen-Breskens- (rode lijn), zie Figuur 2-3 voor ligging.

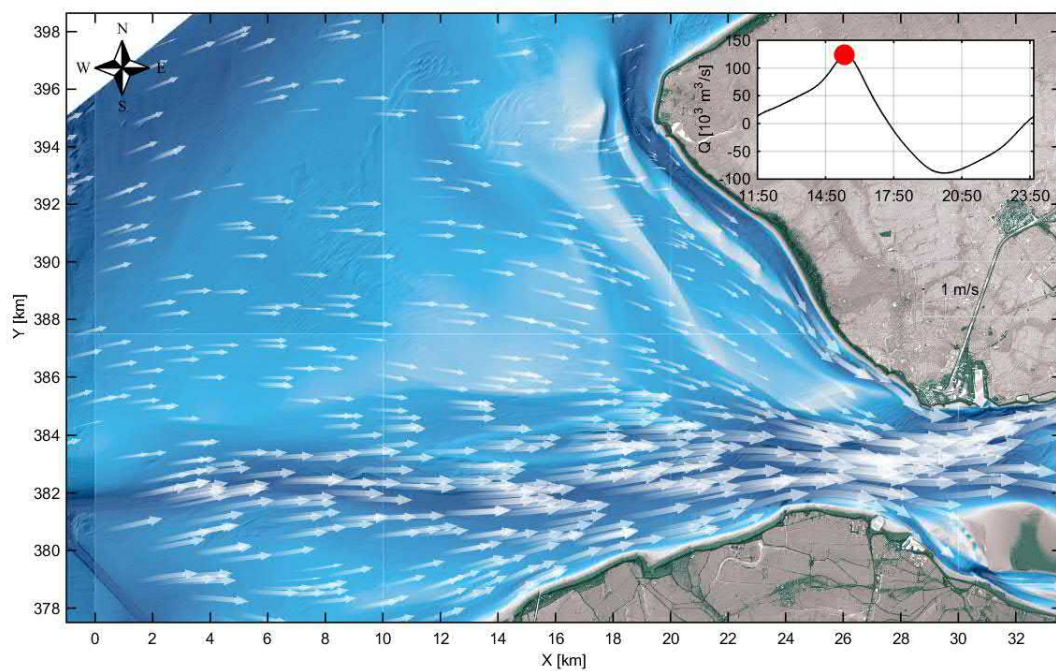
De stromingen door de zuidelijke hoofdgeul (Scheur – Wielingen) worden voornamelijk opgewekt door waterstandsverschillen, die veroorzaakt worden door faseverschillen tussen het getij op zee (bij Zeebrugge) en het getij in de hals (bij Vlissingen). Sha en Van den Berg (1993) benadrukken dat voor het getij in de zeegaten in Zuidwest-Nederland naast het faseverschil ook de noordwaartse afname van getijamplitude van belang is. Dit is met name het geval voor het Oostgat. De stromingen door het Oostgat worden opgewekt door waterstandsverschillen over de geul, die niet alleen door faseverschillen veroorzaakt worden, maar ook door verschil

in getijamplitude. De maximale waterstandsverschillen langs de kust van Walcheren treden op rond stroomkentering. De stroom kentert langs de noordelijke oever eerder dan langs de zuidelijke oever. Als gevolg hiervan zijn de stroomsnelheden door het Oostgat tijdens het begin van eb en vloed het hoogst (Figuur 2-3, Figuur 2-5), terwijl de stroomsnelheden in Scheur/Wielingen tijdens het eind van eb en vloed het hoogst zijn (Figuur 2-4, Figuur 2-6). Bij Westkapelle en Vlissingen speelt de contractie van de stroming een grote rol. De stromingen in het tussenliggende gebied (de huidige Vlakte van de Raan) hebben een rondgaand karakter. Wat ook opvalt in het Oostgat is de lange duur van de hoge vloedstromingen. Gedurende een periode van 4 uur vinden er ongeveer gelijke stroomsnelheden plaats in het Oostgat.

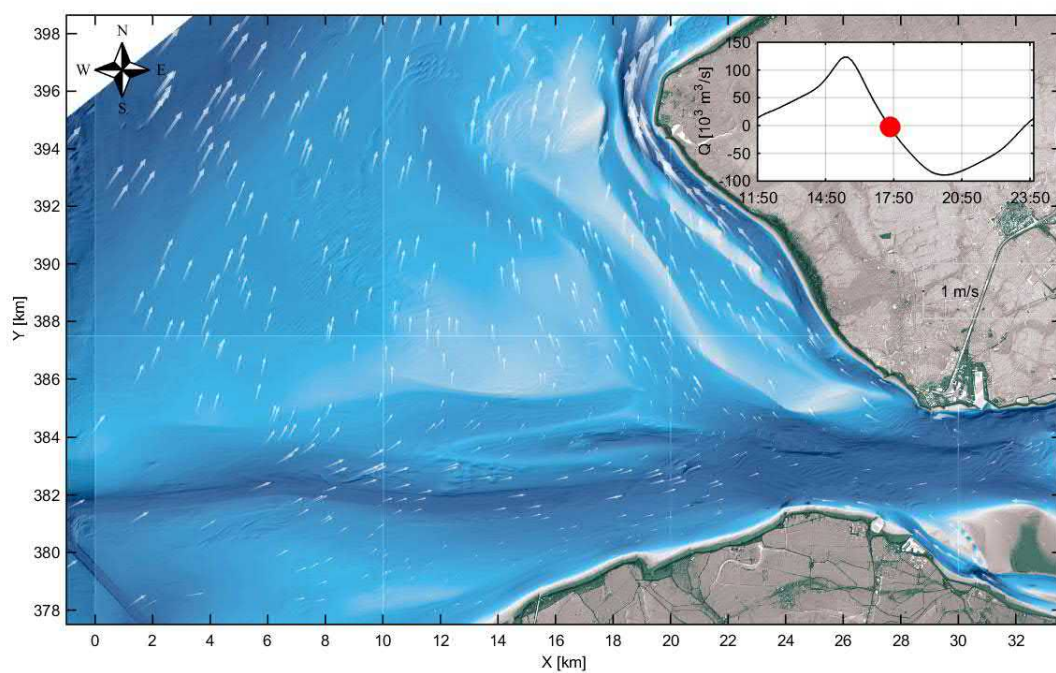
Steijn en Van der Spek (2005) geven een uitgebreide analyse van de waterbeweging ter plaatse van Walcheren. De waterbeweging is als volgt samen te vatten: In het noordelijke gedeelte van het Oostgat (bij Westkapelle) domineert de ebstroming, terwijl het zuidelijke gedeelte (nabij Zoutelande) door de vloed gedomineerd wordt. Deze tegenstelling komt door de relatief grote vloeddominante stroming over het Bankje van Zoutelande. De geulen Deurloo-Oost, Deurloo West en Geul van de Rassen zijn overwegend eb-dominant. In Hoofdstuk 4.1.1 worden de stromingen in het Oostgat en de aanliggende platen en geulen in meer detail beschreven.



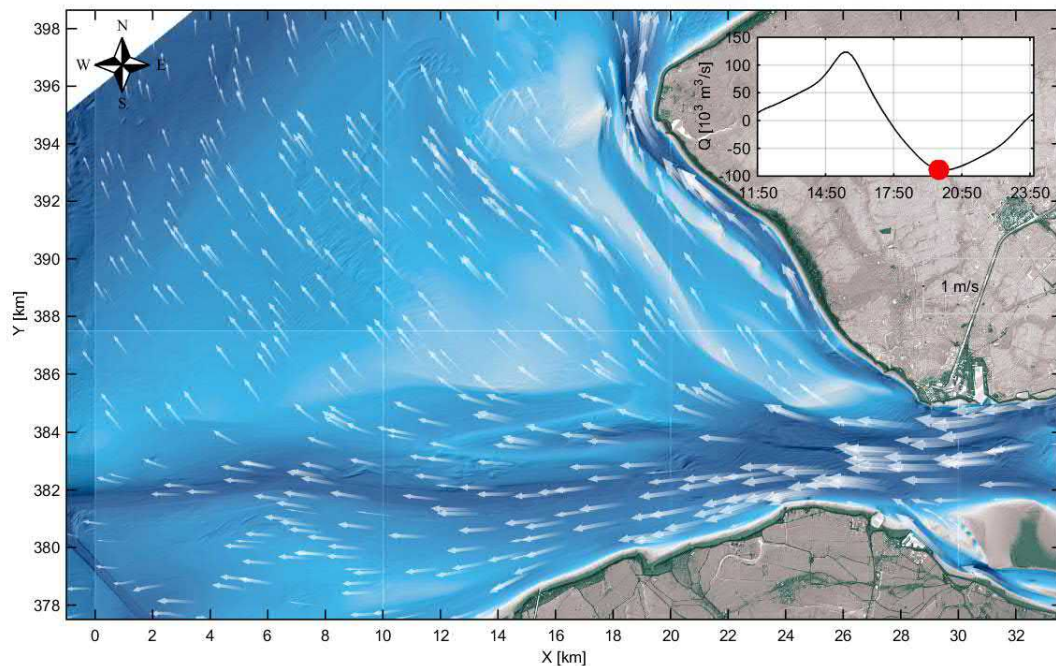
Figuur 2-3: Getijbeweging in de Westerscheldemonding op basis van de T0 modellering. Kentering naar vloedperiode met minimaal debiet in raai Vlissingen-Breskens. Zwarte en rode lijn geven de ligging van de debietraaien weer.



Figuur 2-4: Getijbeweging in de Westerscheldemonding op basis van de T0 modellering. Maximaal vloeddebiet in raai Vlissingen-Breskens.



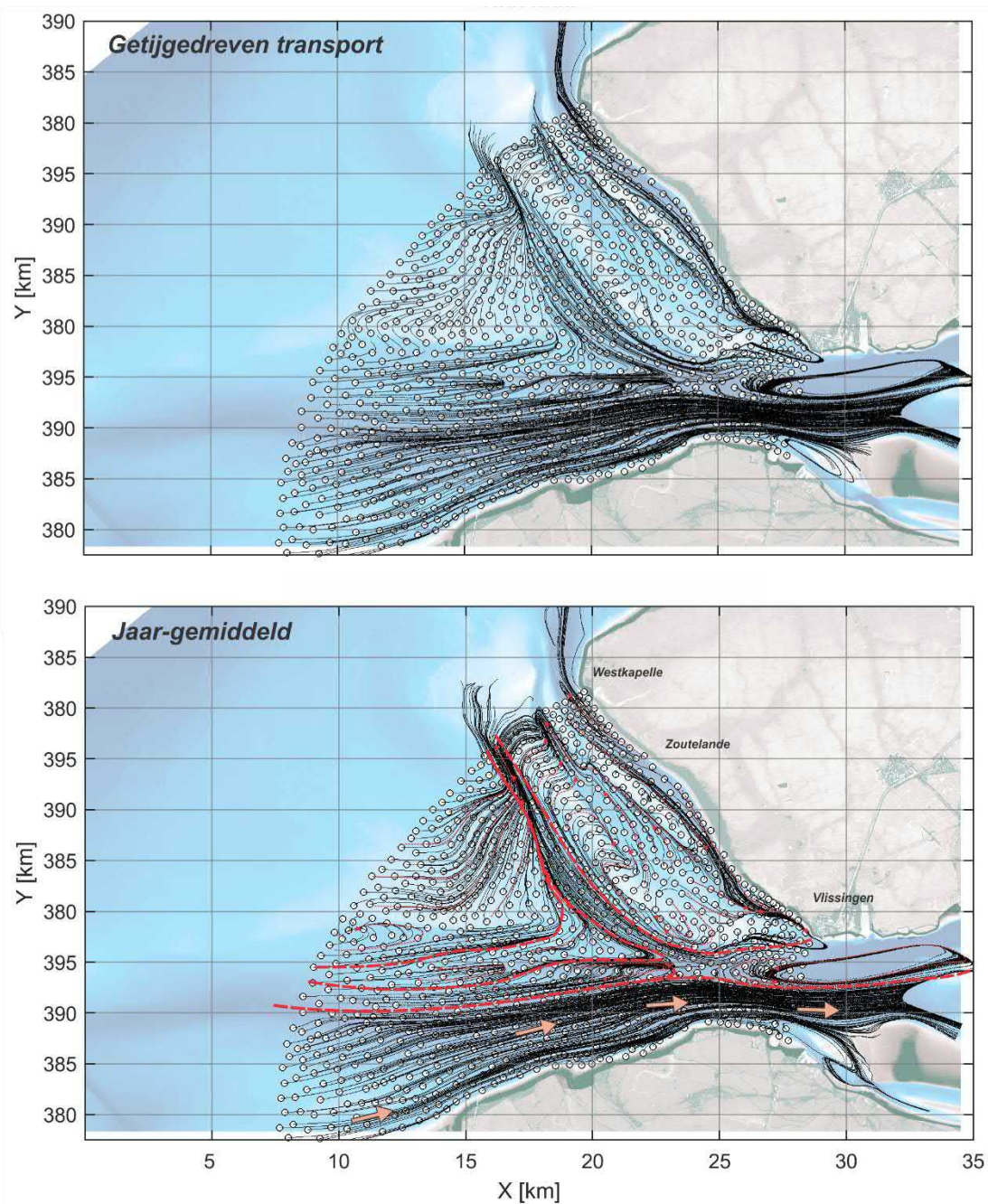
Figuur 2-5: Getijbeweging in de Westerscheldemonding op basis van de T0 modellering. Kentering van vloed naar eb, minimaal debiet in raai Vlissingen-Breskens.



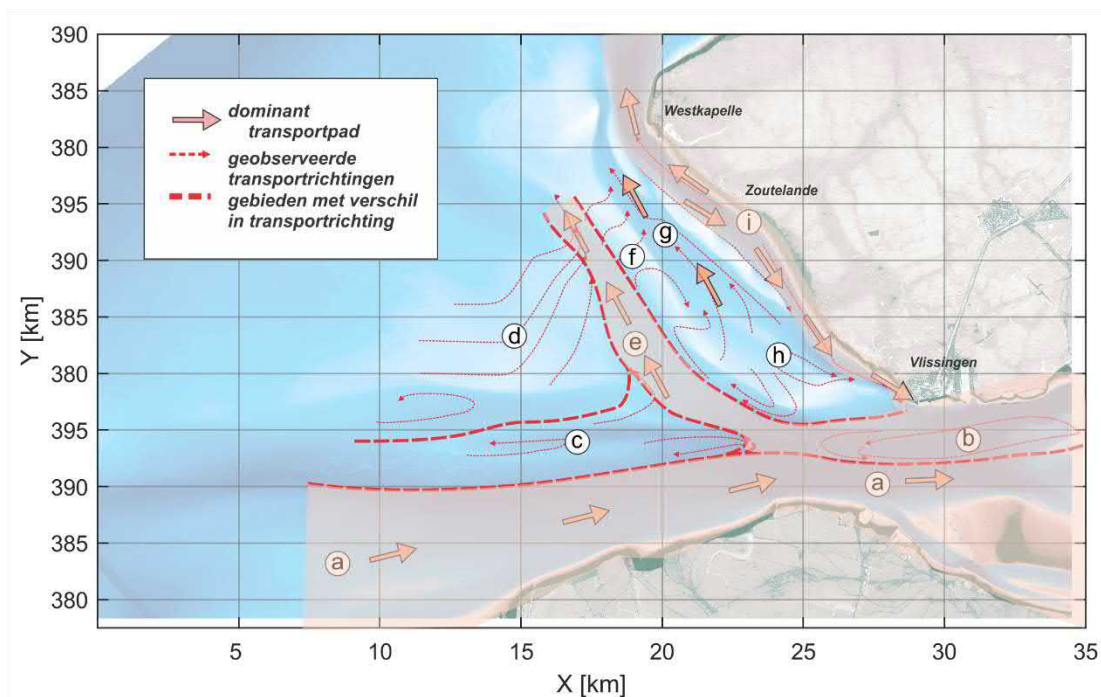
Figuur 2-6: Getijbeweging in de Westerscheldemonding op basis van de T0 modellering. Maximaal ebdebiet in raai Vlissingen-Breskens.

Omdat de buitendelta van de Westerscheldemonding relatief diep ligt, is onder gemiddelde condities het belang van golven beperkt tot vooral opwoeling. Tijdens stormen kunnen de golven wel breken op de buitendelta. De sedimenttransporten zijn vooral getijgedomineerd.

Het complexe stromingspatroon resulteert ook in een complex sedimenttransportpatroon. Deze sedimenttransportpatronen zijn in het verleden wel beschreven op basis van de geobserveerde bodemveranderingen (Elias en van der Spek, 2016) of aan de hand van residuele sediment transporten. De in deze studie uitgevoerde SedTRAILS analyse maakt het mogelijk de complexiteit van de transportpatronen in detail weer te geven (Figuur 2-7). Alhoewel dit niet het doel is van deze studie, is een beter begrip van de werking van het grootschalige systeem wel essentieel voor het goed begrijpen van het gedrag van het Bankje van Zoutelande. Aangezien het gebruikte model de gehele monding doorrekent lijkt het logisch dit ook te gebruiken om een betere beschrijving van het studiegebied te kunnen geven. Dit betekent wel dat de uitleg van de methode pas in het volgende hoofdstuk gegeven wordt.



Figuur 2-7: Een overzicht van sedimenttransportpatronen op basis van een SedTRAILS visualisatie van de getijgedreven transporten (boven) en op basis van de jaargemiddelde sedimenttransporten (onder). De jaargemiddelde transporten vormen de basis van het conceptuele model gepresenteerd in Figuur 2-8.



Figuur 2-8: Een conceptuele beschrijving van de jaargemiddelde sedimenttransporten op de Westerscheldemonding. Zie Figuur 2-7 voor de onderliggende SedTRAILS resultaten.

Figuur 2-8 geeft een conceptuele beschrijving van de werking van het sedimenttransportsysteem van de Westerscheldemonding. Op basis van de gemodelleerde transportpaden kan de monding in een aantal gebieden met verschillend gedrag worden onderverdeeld:

(a). *Hoofdgeul*. Transporten in de toegangsgeul tot de Westerschelde, de Scheur en Wielingen, zijn oostelijk gericht en getijgedomineerd. In de Westerschelde ontstaat een tweedeling in transporten. Het zuidelijke deel van de geul blijft vloedgedomineerd (oostelijk gericht). In het noordelijke deel van de geul, ten zuiden van Vlissingen, ontstaat echter een circulatiecel (b). Langs de kust zijn de transporten oostelijk gericht. In het midden van de geul zijn ze westelijk gericht.

(c). *Overgangsgebied Wielingen – Vlake van de Raan*. Ten noorden van de geulen Scheur en Wielingen ligt een gebied met complexe transportpatronen. Transporten staan over het algemeen landwaarts gericht, maar er treden diverse circulaties op. Deze complexe patronen zijn ook in de bodem zichtbaar. Hier bevinden zich een ebschaar en diverse langgerekte bankcomplexen.

(d). *Vlake van de Raan*. De grote ondiepte van de Vlake van de Raan wordt gedomineerd door een oostelijk transport aan de zeezijde en deze transporten draaien noordelijk in de richting van de Geul van de Walvischstaart (e). Dit patroon is zowel in de getijgedreven als in de jaargemiddelde condities zichtbaar. Wel zijn de transporten door alleen getij meer noordelijk gericht en door toevoeging van golven ontstaat een grotere westelijke component.

(e). *Geul van de Walvischstaart*. Deze geul vormt naast de Wielingen een dominant transportpad waar sedimentdeeltjes zich concentreren. De transporten staan hier in noordwestelijke (geul)richting. Aan de noordzijde, ten zuiden van de Rassen, treedt een tweedeling in transport pad op. Een deel gaat rechtdoor via Deurloo West de buitendelta op. Een ander deel steekt de bank Elleboog (f) over en verplaatst zich zo naar de landwaarts

gelegen geul Geul van de Rassen. Een analyse van de processen laat zien dat golven een belangrijke rol spelen in deze landwaartse transporten.

(g). *Geul van de Rassen*. De transporten over de Elleboog heen concentreren zich in de Geul van de Rassen. De transporten in deze geul zijn ook noordwestelijk gericht. Deze transporten dragen waarschijnlijk bij aan de vorming van de voorliggende plaat De Rassen. De Rassen wordt tevens gevoed door de transporten langs de zeewaartse zijde van het Bankje van Zoutelande.

(h). *Noord van de Nolleplaat*. In de Deurloo oost vindt een divergentie plaats van de transporten. Het merendeel van de geul vertoont een noordwestelijk gericht transport, maar het zuidelijke deel, boven de Nolleplaat, laat juist een zuidoostelijk gericht transport zien. Deze transporten splitsen zich. De eerste component is oostelijk gericht en voedt via de noordzijde van de Nolleplaat de Sardijngeul. De tweede component is westelijk gericht en voedt de Geul van de Walvischstaart.

(i). *Oostgat*. De transporten in het Oostgat laten een tweedeling in transportrichting zien. Langs het Bankje van Zoutelande zijn de transporten zuidoostelijk gericht. Langs de kust zien we een divergentiepunt net ten zuiden van Zoutelande. Transporten aan de noordzijde van dit divergentiepunt zijn noordelijk gericht en voeden uiteindelijk de Domburger Rassen. Transporten aan de zuidzijde van het divergentiepunt zijn zuidelijk gericht, in de richting van de Sardijngeul.

Grootschalig wordt de getijstroming en het transport gedreven door de waterstandsgradiënten. Het ontstaan van dit divergentiepunt heeft waarschijnlijk te maken met de lokale beïnvloeding van de getijstroming door enerzijds de knik in de kustlijn net ten zuiden van Zoutelande en anderzijds de versnelling van de stroming om Zoutelande heen. Deze versnelling van de stroming domineert de stromingen en transporten in het Oostgat ten noorden van Zoutelande. Ten zuiden hiervan wordt de stroming gedreven door de grootschalige verhangen en is de geul volgend.

Gedetailleerde weergaven van de sedimenttransporten in gebieden f tot h worden gegeven in Hoofdstuk 4.1.

2.3 Menselijk ingrijpen

Menselijk ingrijpen heeft een grote invloed gehad op de morfologie van de monding. Vooral in de afgelopen eeuw hebben vele ingrepen plaatsgevonden om de scheepvaart naar Zeebrugge en door de Westerschelde naar Antwerpen te bevorderen. Baggeren in de vaargeul en storten op aangewezen stortlocaties beïnvloedt niet alleen lokaal de morfologie. De verdiepte geulen beïnvloeden ook de grootschalige voortplanting van het getij en de door getij-asymmetrie bepaalde residuele sedimentimport of –export (Bolle, 2010). Naast ingrepen in de geulen zijn de kustlijnen van Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen vrijwel geheel versterkt met zeeweringen, strandhoofden en palenrijen.

Voor de kust van Zuidwest-Walcheren is vooral de uitwisseling van de geulen Oostgat en Sardijngeul met de kustbeschermingsconstructies van belang. Harde verdedigingswerken beschermen zowel de noord- als zuidzijde bij Westkapelle en Vlissingen. Deze harde constructies vormen ‘ophangpunten’ waaromheen, door de contractie van stroming, de geulen lokaal zeer diep zijn uitgeschuurd. In Figuur 2-1 zijn deze diepe ontgrondingskuilen ook goed zichtbaar. Tussen deze ‘ophangpunten’ wordt de kust grotendeels beschermd en in stand gehouden door strandhoofden c.q. palenrijen. Uitzondering hierop is een stuk kustlijn van 2 à 3 km halverwege (bij Zoutelande).

Verhagen en van Rossum (1989) geven een overzicht van de aanleg van de strandhoofden bij Walcheren. De constructie van de strandhoofden begon in 1865 pal ten noorden van Vlissingen. Het strandhoofdenveld werd uitgebreid in noordwestelijke richting tussen 1861 en 1866 en in 1916 werden de laatste hoofden in het zuiden toegevoegd. Ten zuiden van Westkapelle is een ongeveer 5 km lang strandhoofdenveld gebouwd tussen 1852 en 1894. Tezamen waren deze strandhoofden in staat om de kustlijn terugtrekking ten gevolge van de landwaartse migratie van het Oostgat aanzienlijk te verminderen. De erosiesnelheden bij Westkapelle namen af van 2 tot 3 m/jaar tot minder dan 1 m/jaar. Niettemin maakte de doorgaande migratie van het Oostgat uitgebreide beschermings- en onderhoudsmaatregelen van de strandhoofdpunten nodig, terwijl langs de kust regelmatig zandsuppleties nodig zijn om de stranden te onderhouden. Aanvankelijk werd dit gedaan door vervanging en toevoeging van steenbestorting, maar sinds 2005 worden zowel de hoofden als de kustlijn met succes onderhouden door geulwandsuppleties. In Lazar et al. (2017) en Mastbergen en Nederhoff (2018) worden de kustverdedigingswerken in meer detail beschreven.

Voor de volledigheid wordt hier een beknopt overzicht gegeven van de suppleties die zijn uitgevoerd op Zuidwest-Walcheren. In de periode 1952 -2017 is er ruim 25 miljoen m³ gesuppleerd tussen Westkapelle en Vlissingen (Tabel 2.2). De grootste suppletie is uitgevoerd in 2009. In het Oostgat, tussen raai 2180 en 2500 (zie Figuur 2-9) is er meer dan 6.2 miljoen m³ aangebracht in de vorm van een grote geulwandsuppletie. Deze suppletie lost niet alleen het veiligheidsprobleem op, maar verlegt het Oostgat tussen Westkapelle en Zoutelande iets zeewaarts, waardoor een geplande vooroeversteenbestorting niet nodig was.

Tabel 2.1 Uitgevoerde zandsuppleties Kustvak 16, Walcheren t/m 2017 tussen Westkapelle en Vlissingen. Zie Figuur 2-9 voor de ligging van de raaien.

Locatie	Datum	Begin raai	Eind raai	Type	Volume (situ) [10 ³ m ³]	Volume [m ³ /m]
Vlissingen	01-Apr-52	3400	3440	onderwatersuppletie	50	125
Zwanenburg	01-Jan-52	3260	3340	strandsuppletie	775	969
Vlissingen	01-Jan-66	3400	3440	onderwatersuppletie	32	80
Vlissingen	01-Jan-75	3400	3440	strandsuppletie	45	113
Westkapelle-Joossesweg	01-May-84	2275	2356	duinverzwaring	90	111
Westkappelse Zeedijk	01-Jan-86	1795	2300	duinverzwaring	1300	257
Dishoek 'Huvers'	01-Mar-87	2950	2970	duinverzwaring	30	150
Boerenhof	01-Jan-88	2255	2354	strandsuppletie	230	232
Joossesweg	01-Jan-88	2325	2354	duinverzwaring	75	259
Joossesweg	01-Jan-88	2325	2354	duinverzwaring	19	64
Westkapelle-Zoutelande	01-May-88	2245	2358	duinverzwaring	532	471
Zoutelande	01-Jan-88	2480	2580	duinverzwaring	153	153
Vijgeter-Vlissingen	01-Jan-92	3160	3463	strandsuppletie	169	56
Zoutelande-Vijgeter	01-Jan-92	2593	2783	strandsuppletie	192	101
Zoutelande-Vijgeter	01-Mar-93	2763	2957	strandsuppletie	619	319
Dishoek	01-Jan-95	2550	2602	strandsuppletie	54	104
Domburg-Valkenisse	01-Jan-95	1686	1889	strandsuppletie	550	271
Zoutelande	01-Jan-95	2983	3306	strandsuppletie	463	143
Vlissingen badstrand	01-Mar-97	3393	3470	strandsuppletie	125	162
Westkapelle-Zoutelande	01-Apr-97	2185	2706.5	strandsuppletie	700	134
Zuidwestkust Walcheren	01-Apr-98	2820	3395	strandsuppletie	564	98
Zoutelande	01-Mar-01	2540	2710	strandsuppletie	354	208
Westkapelle	01-Sep-01	2190	2380	strandsuppletie	393	207
Zoutelande-Vlissingen	01-Feb-02	2940	3475	strandsuppletie	1130	211
Westkapelle-Zoutelande	01-Jan-02	2380	2550	strandsuppletie	462	272
Dijk Duin Zwanenburg	01-Apr-04	3315	3375	strandsuppletie	67	112
zuidwest (prog 2006)	01-Sep-05	2475	2685	onderwatersuppletie	2411	1148
Zuid-west	01-Mar-06	2180	3470	strandsuppletie	1439	112
Oostgat	01-Apr-09	2180	2500	onderwatersuppletie	6254	1954
Nolle Westduin (Zw.Sch.)	01-Oct-09	3153	3380	duinverzwaring	217	96
Dishoek	01-Mar-11	2950	3460	strandsuppletie	654	128
Zoutelande	01-Oct-11	2195	2660	strandsuppletie	702	151
Westkapelle	01-Dec-14	2153	2165	strandsuppletie	94	782
Westkapelle	01-May-15	2153	2165	strandsuppletie	230	1918
Westkapelle-Zoutelande	01-May-16	2195	2694	strandsuppletie	805	161
Dishoek-Vlissingen	01-Apr-16	2950	3458	strandsuppletie	650	128
Westkapelle	01-Apr-16	2153	2165	strandsuppletie	126	1047
Westkappelse Zeedijk	01-Jan-17	1735	2215	onderwatersuppletie	2400	500
Totaal					25155	

2.4 Kustlijnindicatoren

In dit hoofdstuk wordt een beknopte analyse gegeven van de kustlijnindicatoren van het kustvak gelegen achter het Bankje van Zoutelande (raai 2180 tot 3198). In de Beheerbibliotheek (Mastbergen en Nederhoff, 2018) wordt een uitgebreid overzicht getoond. Figuur 2-9 geeft een bovenaanzicht van de achterliggende kustlijn. De kustlijn vertoont een duidelijk knikpunt net ten zuiden van Zoutelande. Hier verandert de oriëntatie van NW-ZO voor het stuk Westkapelle- Zoutelande naar een meer N-Z oriëntatie voor het stuk kust tussen Zoutelande en Dishoek.

Het diepe Oostgat ligt hier direct langs de kustlijn met zeewaarts daarvan het Bankje van Zoutelande. Tussen het Oostgat en de duinen ligt een smal strand. Dit smalle strand zorgt ervoor dat de MKL slechts binnen een beperkte bandbreedte mag fluctueren. Een bovenaanzicht van de MKL-posities sinds 1965 geeft op deze schaal geen duidelijk beeld van de kustlijnontwikkelingen (Figuur 2-9, rechts). De erosieproblematiek van de kustlijn wordt wel goed weergegeven door het verloop van de TKL. In Figuur 2-10 zijn een aantal typische jaren toegevoegd. Voor de aanleg van de grote onderwater- of geulwandsuppleties in 2005 en 2009 vertoont de TKL een overwegend erosieve trend met een positie die alleen door veelvuldig suppleren gehandhaafd kan worden. Desondanks lag de TKL veelvuldig landwaarts van de BKL. Het probleem is dat er in de smalle strandzone slechts een beperkt zandvolume kan worden aangebracht. Een groot zandvolume kan wel worden aangebracht op de geulwand. Na de geulwandsuppleties van 2005 en 2009, samen bijna 9 miljoen m³, vindt er nog steeds een terugtrekking van de kustlijn plaats.

De kustlijnontwikkelingen worden hieronder voor een aantal geselecteerde raaien in meer detail beschreven. Bijbehorende figuren staan in Appendix A.

Raai 2484:

Raai 2484 ligt centraal tussen Westkapelle en Zoutelande. Deze raai doorsnijdt het Oostgat en het voorliggende Bankje van Zoutelande. Het Oostgat is hier zo'n 700 m breed. Tussen 1965 en 2005 is er een steile geulwand die via een smal strand overgaat in de duinenrij. Over de gehele periode vertoont het profiel slechts kleine veranderingen. Het meest in het oog springend is de verflauwing van de geulwand door aanbrengen van de onderwatersuppletie (Figuur A-1 en A-2). De profielontwikkeling sinds 2008 laat zien dat de onderwatersuppletie iets onderuitzakt. Tussen de -5 m en -20 m trekt de suppletie terug. De geulbodem, onder de -20 m, neemt iets in hoogte toe.

Op het strand zijn veel suppleties uitgevoerd. Na een suppletie schuift de MKL zeewaarts (Figuur A-3). Na de 1992 strandsuppletie duurde het 6 jaar voor de BKL weer bereikt werd. De 2002 suppletie legt de MKL ver zeewaarts. Herhaald suppleren, inclusief de twee geulwandsuppleties, zorgen ervoor dat de MKL sinds 2002 zeewaarts van de BKL blijft. Na een suppletie neemt de MKL gemiddeld 3 tot 4 m/jaar af.

Raai 2694

Net ten zuiden van Zoutelande verandert de richting van de kust en ligt een knikpunt. Het Oostgat ligt hier iets verder van de kust en de geulwand is minder steil. Tussen raai 2750 en 2910 neemt het strand iets in hoogte toe en heeft de MKL een positieve trend. Vanwege de negatieve trend in de jaren 1975-1990 is nog wel tot 2001 gesuppleerd. Ook is hier 'morfologisch gebaggerd'. Onderzoek van RWS Zeeland wees uit dat het baggeren van de geul aan de zeezijde, ca. 1.5 miljoen m³ een positief effect had op de landzijde (groter doorstroomprofiel = minder druk op de vooroever). Sindsdien is de trend daar ook niet meer negatief. Raai 2694 geeft een representatief beeld van de ontwikkelingen rond het knikpunt in de kust. Het voorliggende bankje van Zoutelande is hier op zijn hoogst. Deze raai vertoont, met uitzondering van een stabiele ligging tussen 1977 en 1990, een vrijwel continue toename

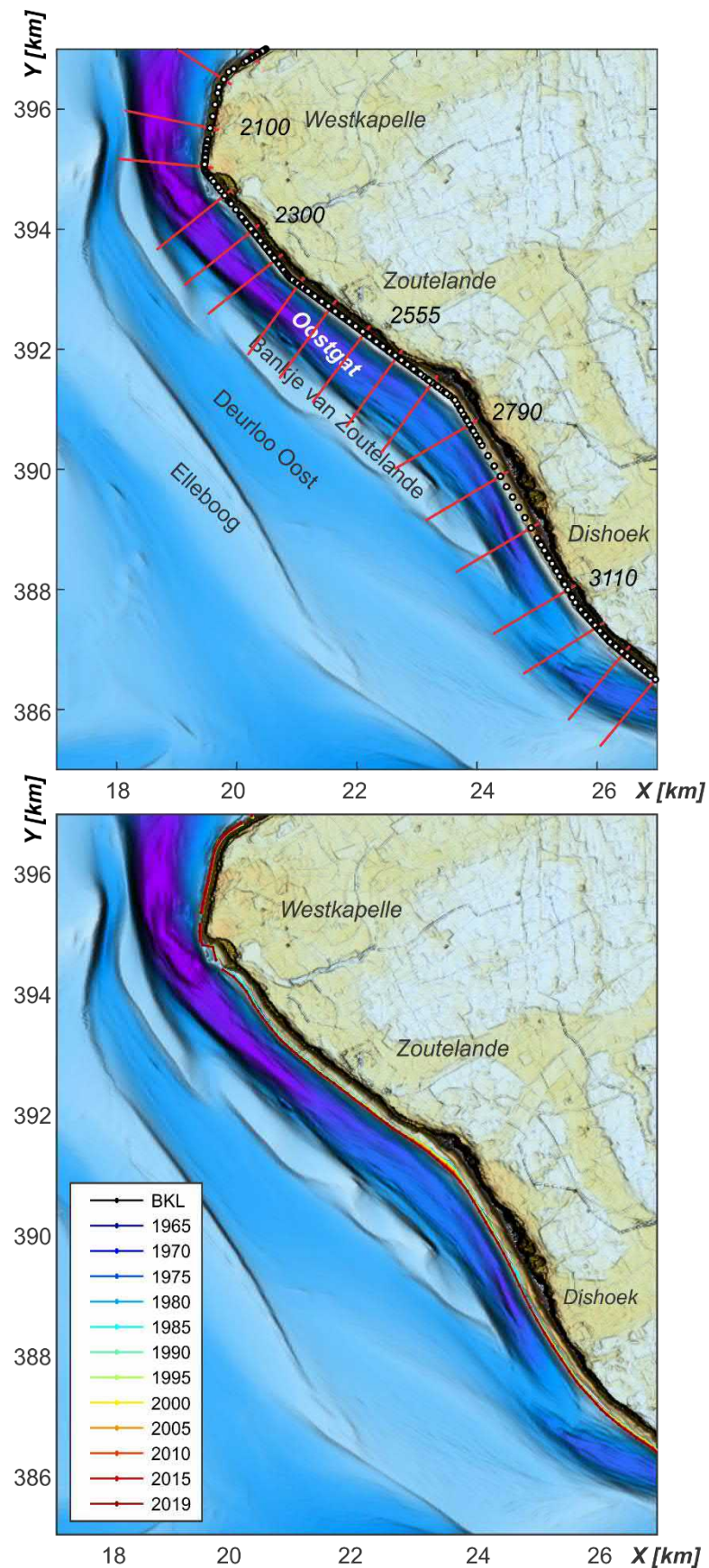
van het MKL-volume (Figuur A-6). Deze toename is mede gerelateerd aan de vele suppleties die hier zijn uitgevoerd. Na suppletie is er een zeewaartse sprong in MKL-ligging van gemiddeld 10 m. Er zijn wel periodes met terugtrekking, maar over het algemeen overheerst een zeewaartse verplaatsing. Tussen 1990 en 2020 is de MKL met ruim 60 m zeewaarts verplaatst. Wat vooral opvalt is dat het diepere deel van het profiel (beneden de -8 m) iets in diepte toeneemt of landwaarts verplaatst. Het ondiepe deel (boven de -8m) vertoont juist een zeewaartse uitbouw. De geulwand was in 1970 nog meer een continue lijn, maar vertoont in 2020 juist een duidelijk knikpunt (Figuur A-4 en A-5). Waarschijnlijk komt deze ontwikkeling door het veelvuldig suppleren. Dit zand wordt in kustlangse richting verspreid, maar door het knikpunt in de kust ontstaat hier een lokaal gebied met geconcentreerde aanzanding. Wat in het profiel ook opvalt is de erosie van het Bankje van Zoutelande. De zeewaartse geulwand van het Oostgat is tussen 1970 en 2010 zo'n 200 m zeewaarts verplaatst. Hierdoor is het Bankje in breedte afgenomen. De hoogte van het bankje is iets toegenomen (Figuur A-5).

Raai 2990

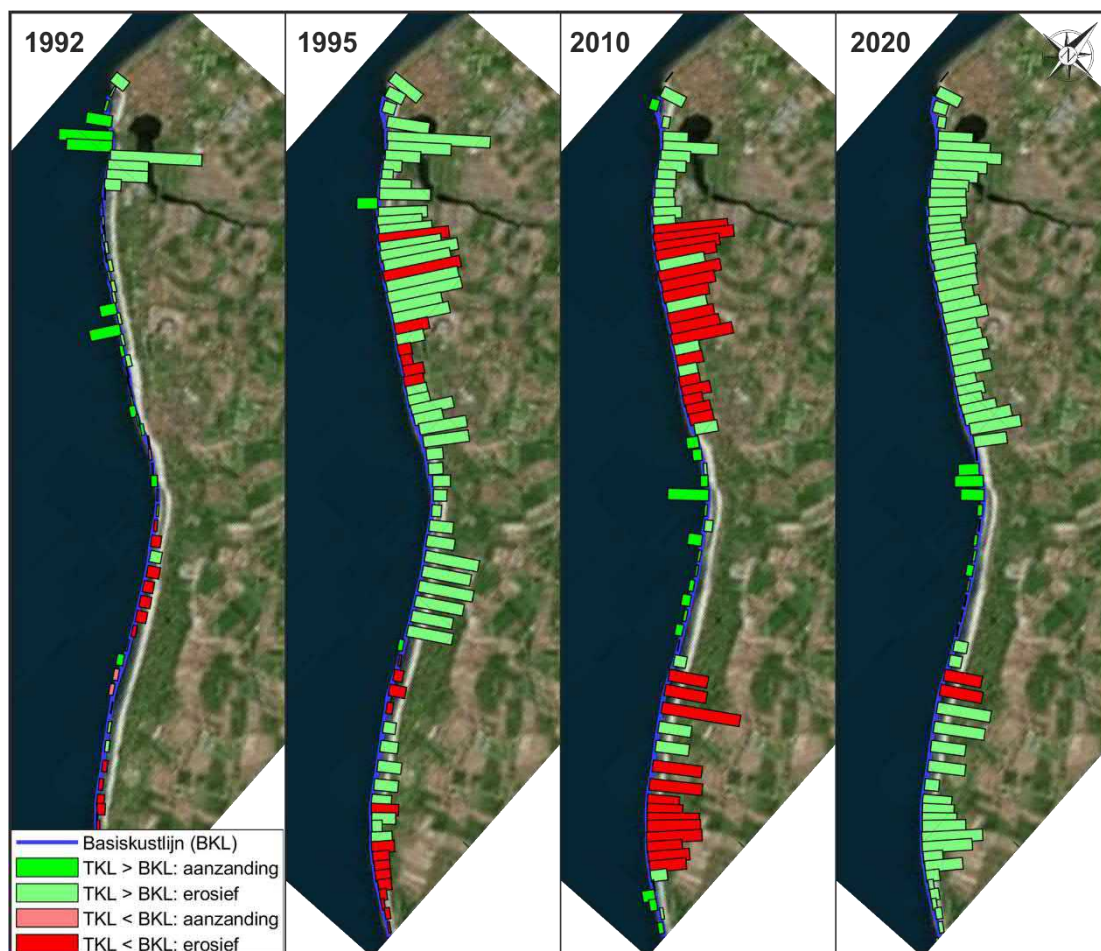
Deze raai ligt net op het zuidelijke uiteinde van het Bankje van Zoutelande. Het Oostgat is hier weer diep (meer dan 20 m) en met een steile geulwand verbonden met de smalle strandzone (Figuur A-7 en A-8). Deze raai wordt gekenmerkt door grote fluctuaties in MKL-ligging (Figuur A-9). Voor 1990 lag de MKL tot 100 m landwaarts van de BKL, maar is dan wel overwegend zeewaarts gericht. In 1990 lag de MKL rond de BKL. Er is een sterke terugtrekking tussen 1990 en 1992. De suppletie van 1995 zorgt ervoor dat de MKL zeewaarts van de BKL komt te liggen. Sindsdien worden hier elke 3 tot 5 jaar nieuwe suppleties uitgevoerd en blijft de MKL-zone 5 tot 10 m zeewaarts van de BKL liggen. Na suppletie verplaatst de MKL zeewaarts en neemt gemiddeld met 2 tot 3.5 m/jaar terug af tot de volgende suppletie weer plaatsvindt. In het profiel is te observeren dat de geuldiepte van het Oostgat hier sinds 1970 is toegenomen van -18 naar -21 m NAP. Het profiel boven de -5 m NAP is juist in hoogte toegenomen. Ook de duinenrij (tot 15 m NAP) is zeewaarts verplaatst. Het merendeel van deze veranderingen vond plaats tot 2008. Het profiel is over de periode 2008-2020 vrijwel gelijk gebleven.

Raai 3189

Raai 3189 ligt al ten zuiden van het Bankje van Zoutelande op een ondiepe drempel die de overgang vormt van het Oostgat naar Sardijngeul. Het dwarsprofiel ziet er duidelijk anders uit dan de voorgaande profielen (Figuur A-10 en Figuur A-11). De landwaartse geulwand is relatief flauw en de diepte is met maximaal -17 m ondieper dan voorgaande profielen. Sinds 1970 is de drempel in hoogte toegenomen. Een maximale hoogte werd bereikt rond 2005 en sindsdien is de hoogte weer iets afgenomen (Figuur A-11). De MKL-volumes namen in de periode 1970-1990 structureel af en lagen rond 1989 landwaarts van de BKL. De MKL kan door veelvuldig suppleren zeewaarts van de BKL worden gehandhaafd. De laatste jaren ligt de MKL zo'n 20 tot 30 m zeewaarts. Ook hier neemt na suppletie de MKL-positie weer af met gemiddeld 2.5 – 4 m/jaar.



Figuur 2-9 Links: Overzicht van het interessegebied met de ligging van de BKL en geselecteerde raaien. Rechts: ligging van de MKL tussen 1965 en 2019 op basis van de kustlijnbeoordeling 1-1-2020 en de ligging van de twee geulwandsuppleties.



Figuur 2-10: Een overzicht van de TKL-positie ten opzichte van de BKL-positie en de trend in TKL-positie voor een aantal geselecteerde jaren (van links naar rechts: 1992, 1995, 2010 en 2020).

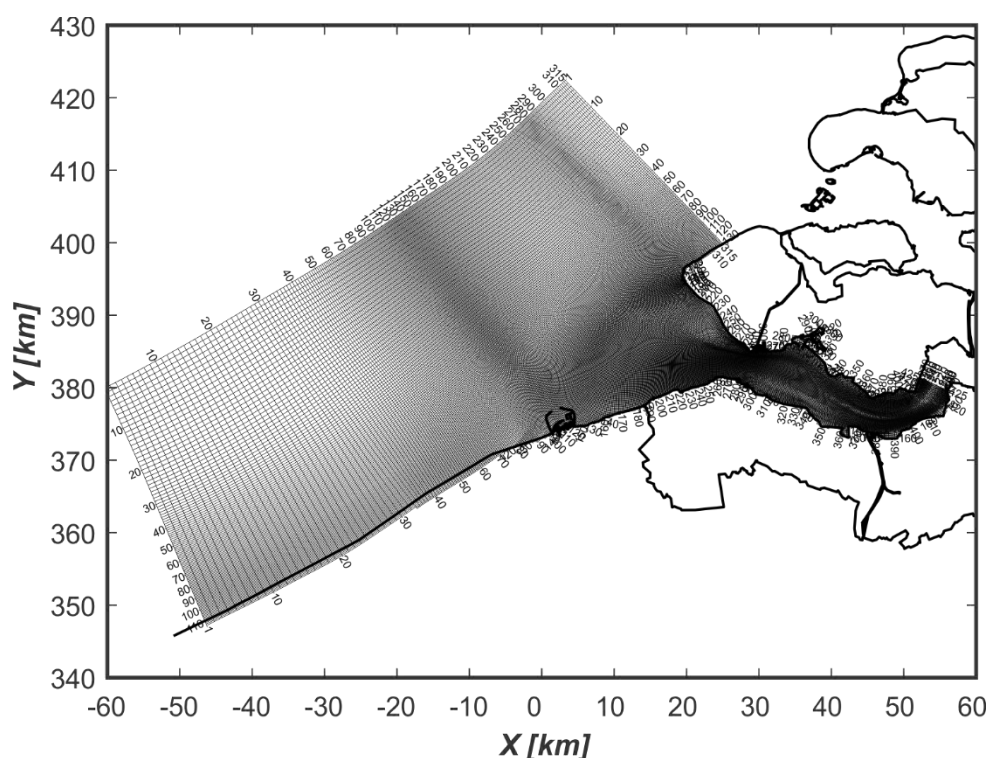
3 Modelling

In dit hoofdstuk wordt een beknopte samenvatting gepresenteerd van het in deze studie gebruikte numerieke model. Dit Delft3D 4 model is ontwikkeld in samenwerking met het project voor de Pilotsuppletie Westerscheldemonding. Voor een aanvullende beschrijving van het model met een focus op de modellering van de gehele monding wordt verwezen naar een studie in het kader van dat project (Van Weerdenburg en Van der werf, 2020).

3.1 Het Delft3D model

De hier gepresenteerde simulaties zijn uitgevoerd met Delft3D 4 met het Zeebrugge en Westerschelde Monding (ZWeM) model als basis (Vroom et al., 2016). Het rekenrooster van het ZWeM (Zeebrugge en Westerschelde Monding) model is weergegeven in Figuur 3-1. De waterbeweging en sedimenttransporten die dit model berekent zijn uitgebreid gevalideerd met beschikbare velddata in eerdere studies. ZWeM is recentelijk toegepast in onderzoek naar sedimentdynamiek rond de haven van Zeebrugge en in de Scheldemonding. Het rekenrooster is voor deze studie geoptimaliseerd voor toepassing op het Nederlandse deel van de monding. Overtollige resolutie nabij Zeebrugge is verwijderd en een gelijkmatigere resolutieverdeling op de Vlakte van de Raan is gerealiseerd (Van Weerdenburg en Van der Werf, 2020).

De modelresolutie varieert over het domein. In de monding van de Westerschelde en langs de kust ligt de resolutie zo tussen de 50 en 100 m. In zeewaartse richting neemt de resolutie af. Op het centrale deel van de Vlakte van de Raan ligt de resolutie rond de 100 m. De suppleties zijn geïmplementeerd in een lokaal domein met een hogere resolutie van 50-60 m. In de Noordzee ligt de resolutie rond de 250 m. Door gebruik te maken van een ruimtelijk variërende resolutie worden zowel numerieke efficiënte als nauwkeurige resultaten behaald.



Figuur 3-1: Grootschalige stromingsrooster van het ZWeM model zoals gebruikt in deze studie.

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, kustparallelle, rand is een waterstandsrand opgelegd. Op de zuidwestelijke en noordoostelijke, kustdwarse, randen worden Riemann invarianten (waterstandsgradiënten) opgelegd. De randvoorwaarden in de Westerschelde zijn debieten. Deze debieten worden opgelegd voor twee segmenten, namelijk het Gat van Ossensisse en het Middelgat. De debieten 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-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. Het model wordt dieptegemiddeld doorgerekend.

De golven worden berekend met het gekoppelde spectrale golfmodel SWAN. Het stromingsgrid wordt rechtstreeks gebruikt in het SWAN golfmodel. De golven worden dus op gelijke resolutie als het stromingsmodel opgelost. Hierdoor kunnen de interacties tussen stroming en golven efficiënt meegenomen worden.

Golfgedreven stromingen zijn vooral van belang langs de aanliggende kusten en op de ondieptes van de buitendelta waar golven breken. Voor een nauwkeurige weergave van de golf-stroom interactie wordt het golvenmodel elk uur opnieuw berekend. Elke 60-minuten is er dus een uitwisseling tussen het golf- en stromingsmodel waarbij het stromingsmodel de waterstanden, stromingen etc. doorgeeft aan SWAN. SWAN berekent vervolgens het bijbehorende golfveld (stationair) en de golfinformatie wordt weer teruggegeven aan FLOW en meegenomen in de volgende 60 minuten van de stromingsberekening. SWAN is gerund in 3-generatie modus waarin alle relevante processen zijn geactiveerd (wind input, quadruplet interacties en whitecapping). De bodemruwheid gebruikt een default waarde van $0.038 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$. Golfbreking is gebaseerd op de brekerformulering van Salmon & Holthuijsen (2011). In deze formulering is de brekerindex gerelateerd aan bodemhelling en diepte. De numerieke nauwkeurigheid is vastgezet op een strikt criterium van 2 % voor relatieve en absolute golfhoogte verschillen in 98% van de natte roostercellen. De golfcondities zijn parametrisch opgelegd door de significante golfhoogte, periode en richting voor een standaard JONSWAP spectrum en gebaseerd op een schematisatie zoals uitgewerkt in hoofdstuk 3.3.

De sedimentformuleringen Van Rijn (2007) in Delft3D FM zijn gebruikt voor de sedimenttransporten. Lesser et al. (2004) geven een uitleg hoe de formuleringen zijn geïmplementeerd in Delft3D 4. Deze aanpak geldt ook voor Delft3D FM. In de Van Rijn formulering worden zowel de bodemtransporten als de suspensieve transporten berekend en bij elkaar opgeteld. De bodemtransporten zijn gebaseerd op een parametrische formulering die ook het effect van golven meeneemt. De suspensietransporten worden berekend met een advectie-diffusie vergelijking. De modelsommen gaan uit van een bodemsamenstelling met onbeperkte hoeveelheid sediment met een mediane (d_{50}) korreldiameter van $200 \mu\text{m}$. Deze korreldiameter is een representatief gemiddelde voor de buitendelta. In werkelijkheid zal er een gradering van sediment aanwezig zijn. In de geulen is de korreldiameter over het algemeen wat groter en op de platen en banken iets kleiner. Bij een onderlinge vergelijking van simulaties waarin steeds dezelfde korreldiameter wordt gebruikt, is dit echter van ondergeschikt belang.

In deze studie wordt de bodemhoogte gedurende de simulatie niet aangepast, maar wordt er een morfostatische berekening uitgevoerd. De aldus verkregen sedimenttransporten worden ook wel de “potentiële sedimenttransporten” genoemd. In werkelijkheid zou de convergentie of

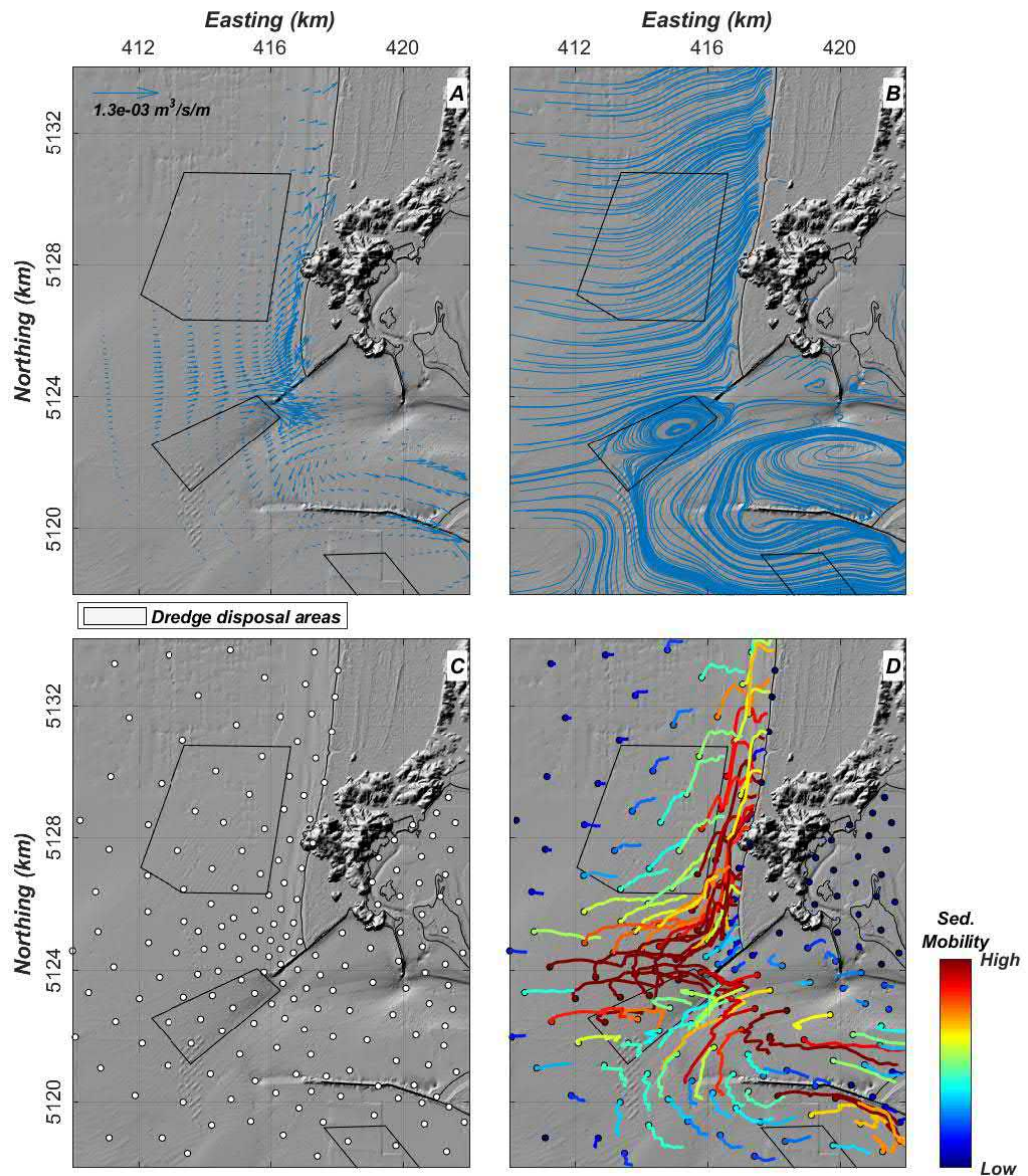
divergentie van de transporten een bodemaanpassing veroorzaken. Hierdoor varieert de bodem en dus ook de transporten door de tijd. Door in het model de bodem constant te houden, kan juist de verandering in sedimenttransport onder verschillende hydrodynamische forcering (de verschillende golfcondities) en voor verschillende bodemconfiguraties (de suppletievarianten) nauwkeurig in kaart worden gebracht. Deze methode maakt het mogelijk om lange-termijn transportschattingen te verkrijgen zonder dat zeer rekenintensieve modelsommen voor gemaakt moeten worden. Hiervoor worden de transporten over de verschillende golfcondities berekend en de resultaten gewogen (met de kans van voorkomen) bij elkaar opgeteld. Op deze manier kunnen op eenvoudige en efficiënte wijze schattingen van de transporten worden verkregen voor bijv. de jaarlijkse of 5-jaarlijkse of 10-jaarlijkse condities. Het enige verschil is hier de wegingsfactor die mogelijk iets afwijkt over de verschillende periodes.

Een bijkomend voordeel van de morfostatische simulaties is dat de golfcondities onafhankelijk van elkaar kunnen worden gedraaid. De bodem blijft immers gelijk. Door gebruik te maken van een rekencluster kunnen de sommen efficiënt in termen van numerieke rekentijd worden opgelost.

3.2 Toepassing van SedTRAILS

Berekend sedimenttransporten geeft inzicht in het morfologische systeem en de impact of verstoring van de verschillende suppletievarianten erop. Een veel gebruikte analysemethode is het afleiden van de residuele transporten. Veranderingen in de residuele patronen geven inzicht in de toekomstige morfologische veranderingen. Doordat de suppletie lokaal de bodem verstoort zullen hier lokaal, ongeacht de grootte van de ingreep, de transporten veranderen. Als de veranderingen beperkt zijn ten opzichte van de omliggende sedimentdynamiek is het op basis van de residuele transporten lastig een inschatting te maken van eventuele grootschalige effecten. Hiervoor zouden lange morfologische simulaties gemaakt moeten worden. Deze simulaties zijn rekenintensief en de resultaten vaak discutabel. Het is lastig om numerieke fouten en natuurlijke veranderingen te onderscheiden.

Een nieuwe, alternatieve methode om een beter inzicht te krijgen in de grootschalige effecten van een ingreep is de SedTRAILS methode. *SedTRAILS* (*Sediment TRANsport vlsualization & Lagrangian Simulator*) is geen nieuwe of apart uit te voeren modelsimulatie maar een nabewerking op de resultaten van al uitgevoerde sedimenttransportmodellering. Op basis van de berekende (instantane) sedimenttransportvectoren worden transportpaden berekend. De transportpaden visualiseren de beweging van de deeltjes door het morfologische systeem. Door analyse van de transportpaden vóór en ná suppletie kan inzicht worden verkregen hoe de transportpaden veranderen en hoever die veranderingen zich uitstrekken. Als de transportpaden alleen lokaal beïnvloed worden is het niet waarschijnlijk dat de suppletie een grootschalige invloed uitoefent. Als de transportpaden in de omliggende morfologische gebieden wel veranderen na suppletie geeft dit aan dat de suppletie het systeem wel grootschalig kan beïnvloeden. In dat geval zou er aanvullend onderzoek met bijvoorbeeld uitgebreide morfologische modellering noodzakelijk zijn om deze beïnvloeding te onderzoeken. Een voorbeeld van hoe de SedTRAILS methode werkt wordt gegeven in Figuur 3-2 en een aanvullende beschrijving kan worden gevonden in Elias en Pearson (2020).



Figuur 3-2: Een voorbeeld van de SedTRAILS methode. Door Delft3D wordt het sedimenttransport vectorveld berekend. Deze vectoren kunnen we ook als stroomlijnen weergeven (B). Een veld met sedimentbronnen wordt opgelegd (C). In deze sedimentbronnen worden sedimentdeeltjes losgelaten die op basis van de stroomlijnen propageren door het rekenrooster. Het stroomlijnveld varieert door de tijd (met het getij en de golven) hierdoor ontstaan complexe sedimenttransportpaden (D). De transportpaden tonen de verplaatsing en de relatieve verplaatsingssnelheid van het sediment. De cirkel is de plaats van loslating en de lengte van de staart is een mate van verplaatsing. Let op, SedTRAILS is niet afgeregeld op de werkelijke verplaatsingssnelheid van het sediment. De lengte van de staart vertoont daarom de relatieve mate van verplaatsing. Een langere staart betekend meer verplaatsing dan een kortere staart. De resultaten van SedTRAILS vertonen een "spaghetti" aan banen. Door gebruik te maken van slimme vragen "queries" en statische methodes zoals connectiviteit, kan deze spaghetti ontward worden en kunnen verbanden tussen de verschillende morfologische gebieden in kaart worden gebracht.

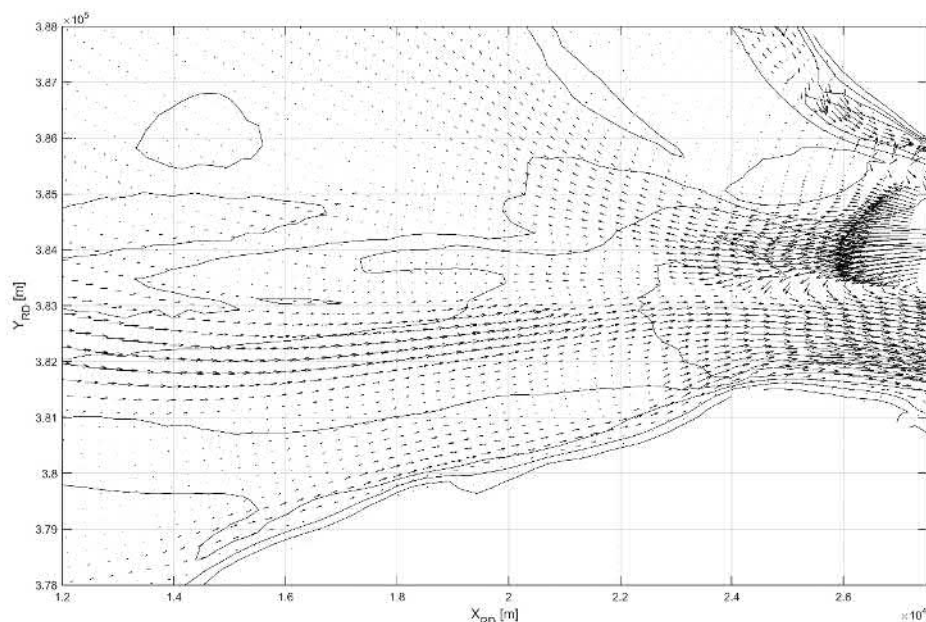
3.3 Randvoorwaarden; Morfologisch Getij en Golfklimaat

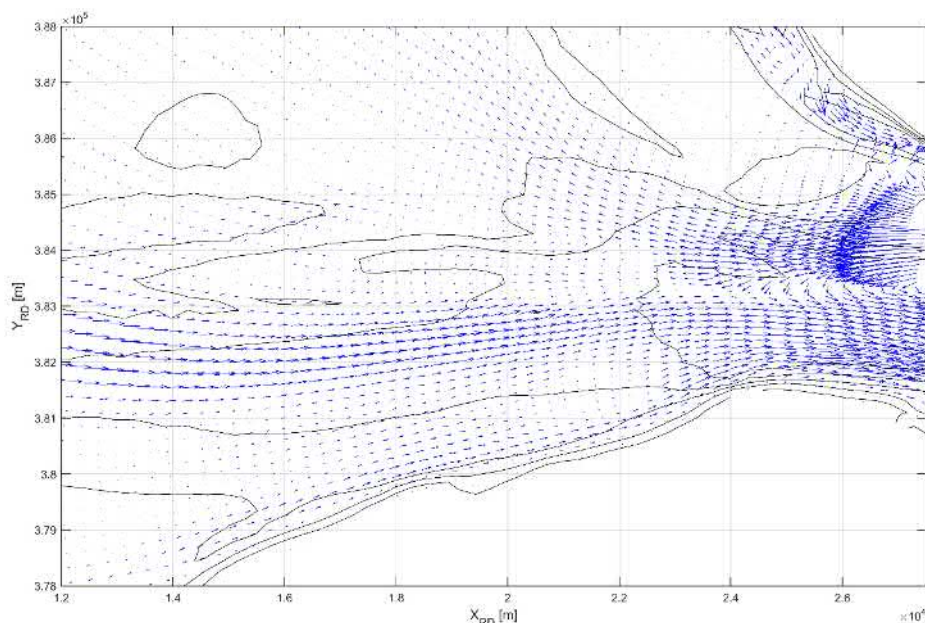
Het volledig berekenen van transportpatronen die representatief zijn voor de lange termijn trends vereist zeer lange modelsimulaties. De modelsimulaties moeten immers een grote en representatieve spreiding van getij, wind en golfcondities doorrekenen. Met proces-gebaseerde modellen zoals Delft3D zijn dergelijke simulaties eigenlijk niet mogelijk gezien de benodigde rekeninspanning. Een benadering van representatieve transportpatronen kan wel gemaakt worden door gebruik te maken van geschematiseerde condities. Deze geschematiseerde condities noemen we het morfologisch getij- en het representatieve golfklimaat. In deze studie zijn het morfologisch getij- en golfklimaat afgeleid voor het jaar 2014. Hieronder volgt een beknopte samenvatting van de afleiding van deze condities (zie Van Weerdenburg en van der Werf, 2020 voor een uitgebreidere beschrijving)

3.3.1 Keuze van het morfologische getij

Een afgewogen keuze voor het morfologisch representatief getij is verkregen door een tweetal stappen te doorlopen. Als eerste stap zijn de jaargemiddelde getijtransporten bepaald. Hiervoor is het jaar 2014 gesimuleerd en de sedimenttransporten weggeschreven. Op basis van de sedimenttransporten wordt de maand waarin de maandgemiddelde transportpatronen het beste overeenkomen met de jaargemiddelde transporten geselecteerd. De tweede stap bestaat uit het in detail doorrekenen van deze morfologisch representatieve maand. Binnen deze tijdserie wordt het dubbeldaags getij geselecteerd waarvan de transportpatronen het beste overeenkomen met de gemiddelde transportpatronen van de morfologische maand. Door een dubbeldaags getij te kiezen wordt de dagelijkse ongelijkheid in het getijsignaal meegenomen. Een kwadratische fout (RMSE) is gebruikt om te bepalen welke periode het meest representatief is voor de transportpatronen in de morfologische maand. De getrapte aanpak met eerst een afleiding van een morfologische maand en dan pas de afleiding van het morfologische getij is noodzakelijk vanwege de grote uitvoerfiles van Delft3D. Voor afleiding van het morfologische getij is een hoge resolutie van wegschrijven nodig (per uur). Het per uur wegschrijven van een geheel jaar resulteert in onhanteerbare uitvoerfiles.

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. Een uitgebreide analyse van de stromingen en transporten is weergegeven in Hoofdstuk 4.





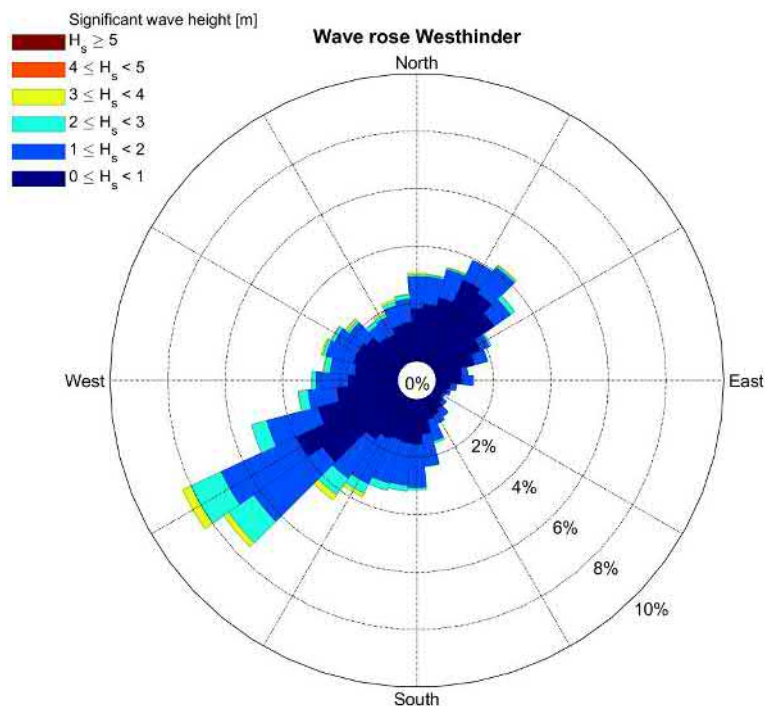
Figuur 3-3 Vectorveld van tijdsgemiddelde residuele transporten in de Schelde-monding op basis van een modelberekening voor de gehele maand maart 2014 (boven) en voor de morfologische getijperiode van 5 maart 23:50 tot 07 maart 00:40 (onder) (uit Van Weerdenburg en Van der Werf, 2020).

3.3.2 Bepaling van een representatief golfklimaat

Het afleiden van een morfologisch representatief golfklimaat is geen triviale zaak. In morfologische simulaties zijn de rekentijd en het aantal golfcondities direct aan elkaar gekoppeld. Meer golfcondities betekent een aanzienlijk langere simulatie. De uitdaging in het afleiden van het morfologische golfklimaat ligt in het vinden van het minimaal aantal representatieve golfklassen. Zo'n morfologische schematisatie bestaat typisch uit drie tot tien golfklassen. In morfostatische simulaties speelt het probleem van rekentijd een veel kleinere rol. Omdat de modelbodem constant blijft kan iedere golfconditie afzonderlijk worden gedraaid. Op een rekencluster kunnen dan meerdere golfcondities tegelijk draaien, waardoor de rekentijd beperkt blijft. Dit maakt het afleiden van het representatieve golfklimaat eenvoudiger. Omdat we meer golfcondities kunnen gebruiken is een strikte optimalisatie niet nodig.

Het golfklimaat afgeleid voor de Westerscheldemonding bestaat uit 16 golfklassen en is gebaseerd op het gemeten golfklimaat bij Westhinder (Figuur 3-4). Het golfklimaat is opgedeeld in vier hoogteklassen (0- 1 m, 1-2 m, 2-3 m en groter dan 3 m) en 6 golfrichtingen van 60°. 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. Voor iedere golfklasse wordt ook de kans van voorkomen bepaald. In theorie levert deze aanpak een schematisatie met 24 golfklassen op. Dit aantal kan worden gereduceerd om de golfklassen met zeer kleine kans van voorkomen (0.5%) niet mee te nemen, maar te herverdelen in de bestaande klassen. Het eindresultaat is een representatief golfklimaat dat bestaat uit 16 golfklassen zoals weergegeven in Tabel 3.1.

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.



Figuur 3-4 Golfroos van de gemeten golfcondities bij Westhinder in 2014. Onderliggende data is afkomstig uit het Meetnet Vlaamse Banken (zie <https://meetnetvlaamsebanken.be/>).

Tabel 3.1: Overzicht van de golf- en windcondities gebruikt voor de modellering van de westerscheldemonding.

Conditie	Hsig [m]	Tp [s]	Dir [deg]	Prob [%]	Wvel [m/s]	Wdir [deg]
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	6.7	324	0.7
16	3.27	225	7.49	15.10	218	0.8

3.4 Een overzicht van de modelsimulaties en suppletievarianten

Het ZWeM model is gebruikt om een *T0* simulatie, de 2019 bodem vóór suppletie door te rekenen evenals drie identieke simulaties met verschillende suppletievarianten (V1, V2, V3).

Na het uitvoeren van een eerste serie gevoeligheidssimulaties kon al snel worden geconcludeerd dat de effecten van alle suppletieontwerpen zeer beperkt zijn. De analyse van de modelresultaten is hierop aangepast en richt zich op het uitvoerig in kaart brengen van de *T0* om het morfologische systeem beter te begrijpen en een wat beperktere analyse van de effecten van de suppletievarianten op golven en sediment transport.

De *T0* simulaties bestaan uit een berekening van de getijgedreven transporten en de berekening van de transporten voor ieder van de condities van het representatieve golfklimaat. In deze simulaties wordt zowel de invloed van getij, wind en golven meegenomen. In totaal zijn dit dus 17 simulaties (eenmaal alleen getij en zestienmaal getij en golven voor elke golfklasse). Door iedere tijdstap (elke 10 minuten) de resultaten van de golfsimulaties gewogen bij elkaar op te tellen wordt een tijdserie van jaarlijks gemiddeld transport verkregen. Deze tijdserie vormt de basis van de uitgevoerde analyses. De jaargemiddelde transporten worden op een standaard manier (instantane stromings- en transportvectoren en residueel transport geanalyseerd) en de SedTRAILS transportpaden worden bepaald.

De analyse van de suppletieontwerpen richt zich op twee aspecten. Ten eerste de beïnvloeding van het golfklimaat en ten tweede de grootschalige beïnvloeding van het omliggende morfologische systeem. Voor deze laatste analyse is SedTRAILS gebruikt.

3.4.1 Suppletieontwerpen

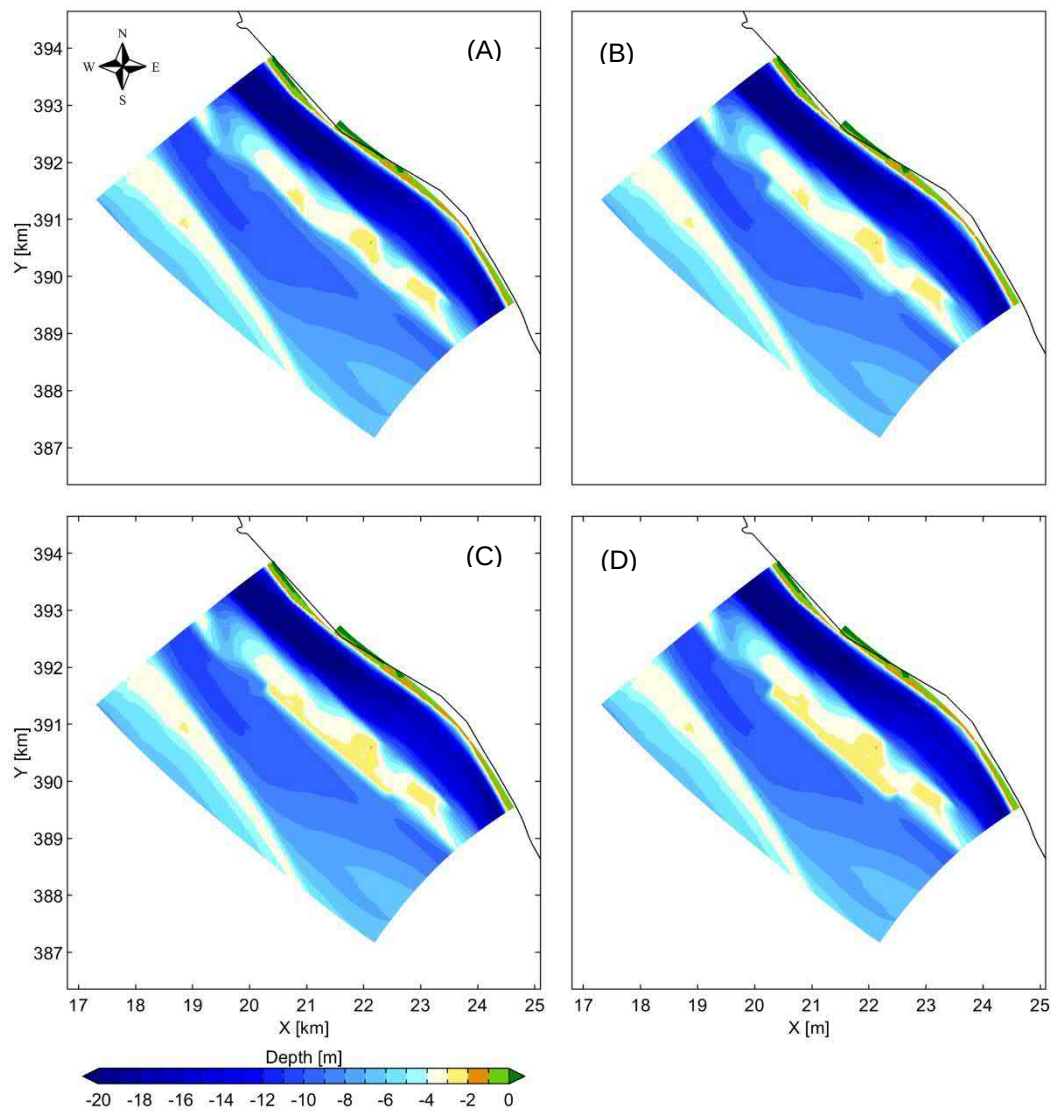
Figuur 3-5 geeft een overzicht van de vier onderliggende modelbodems, ingezoomd op het suppletiegebied. De *T0* bodem is gebaseerd op de 2019 meting van het Bankje van Zoutelande. Op basis daarvan zijn drie suppletievarianten aangebracht. Deze varianten zijn gebaseerd op de rekenontwerpen zoals gepresenteerd in Pluis (2020) die allen tussen raaien 2443 en 2730 liggen. Het suppletiegebied is daarmee een 3 km lang vak. Alle ontwerpen hebben een gelijk oppervlakte, maar de kruinhoogte varieert tussen -5 m en 0 m NAP.

Suppletieontwerp 1 is gebaseerd op de aangeleverde rekenontwerpen volgens het memo Rijkswaterstaat (2020). Deze suppletie is grotendeels gebaseerd op het originele ontwerp van Lazar (2017). De suppletie wordt aan de zeewaartse zijde van het Bankje van Zoutelande aangelegd met een kruinhoogte van -5 m. Het suppletievolume bedraagt 1.51 miljoen m³.

Suppletieontwerp 2 heeft een hogere kruinhoogte van -2.5 m. Hierbij is de suppletie aangesloten op de kruin van het Bankje van Zoutelande. Dit geeft een beperkte toename van het volume naar 1.72 miljoen m³.

Suppletieontwerp 3 verhoogt de kruinhoogte over het gehele suppletiegebied tot 0 m NAP. Om deze hoogte te bekijken moet ook het Bankje van Zoutelande in hoogte toenemen. Het suppletievolume neemt ook sterk toe, tot 3 miljoen m³.

Suppletieontwerp 3 wijkt met een aanleghoogte tot 0 m NAP iets af van het initiële rekenontwerpen zoals opgesteld in Pluis (2020). In de initiële suppletieontwerpen 2 en 3 varieert de brede en daarmee ook het ontwerpvolume van de suppletie, maar blijft de aanleghoogte van -2.5m gelijk. Uit initiële testsimulaties blijft dat dit in het model geen verschil in resultaat geeft. Door de ligging van de suppletie geeft een verbreding van het suppletieontwerp geen verschil in stroming in de brede voorliggende Deurloo, daarnaast zorgt dit niet voor extra golfdissipatie. Na overleg is daarom besloten om niet het oppervlakte maar de kruinhoogte te variëren. In het derde ontwerp is de kruinhoogte zelfs tot 0 m NAP opgehoogd. Naast een verwacht effect op de golfbreking heeft dit ontwerp ecologische voordelen. Een quick scan uitgevoerd door Tauw (2020) identificeert dat een aanleghoogte van 0 m NAP extra areaal creëert dat droogvalt tijdens laagwater.



Figuur 3-5 Een overzicht van de T0 bodem (A) en de drie suppletievarianten. De suppleties hebben een gelijk oppervlakte maar de kruinhoogte varieert van (B) -5 m NAP, (C) -2.5 m NAP en (D) 0 m NAP.

3.4.2 Een afbakening van kansen en risico's

De afweging van de voorkeursvariant van de suppletie is gebaseerd op het in kaart brengen van de kansen en risico's van de suppletieontwerpen. Een overzicht van de geïdentificeerde kansen en risico's is samengevat in Tabel 3-1. De uitwerking van deze kansen en risico's is gedeeltelijk gebaseerd op de bodemdata, expert judgement en modellering.

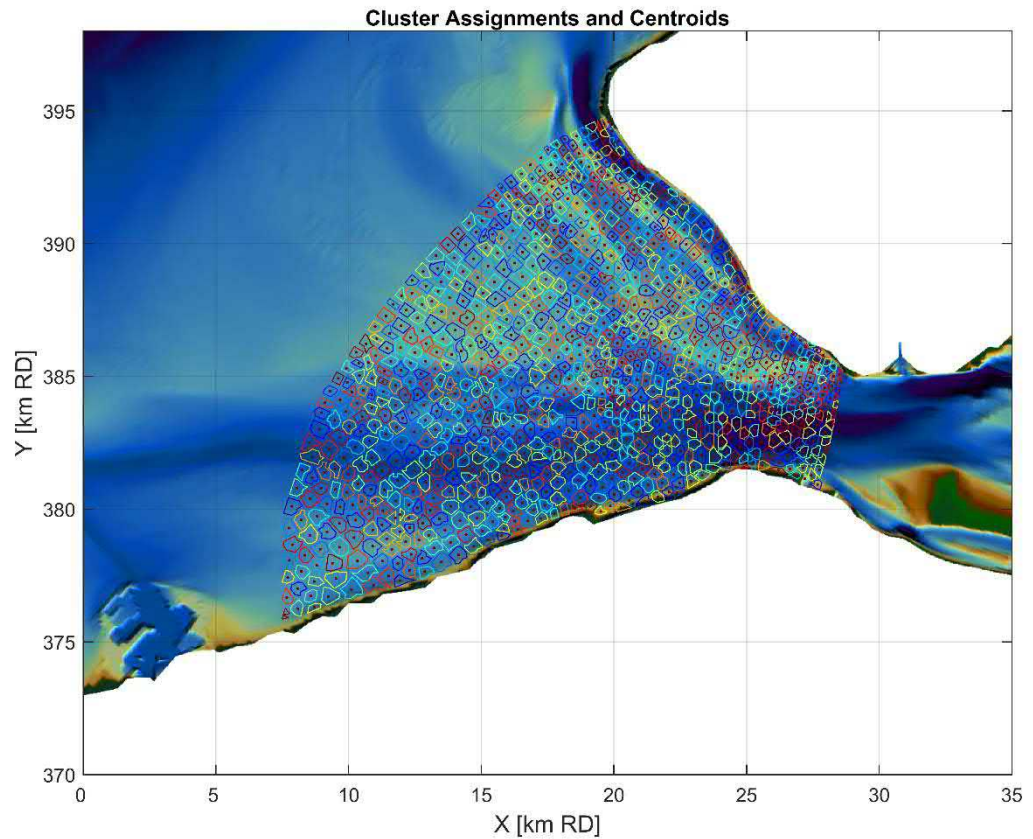
Tabel 3-1: Een overzicht van alle kansen en risico's.

Kansen	Risico's
• Reductie van golfbelasting op de kust. • Vergroting zandvolumes kustzone door beïnvloeding van de transportpaden. • Langere levensduur dan traditionele strandsuppletie • Stabilisatie van het Bankje van Zoutelande, reduceren van landwaartse migratie.	• Onverwachte effecten van geulbeïnvloeding op het zeegatsysteem • Korte levensduur (omdat morfologie te veel afwijkt van de morfologie van het systeem) • Vergroten van de sedimenttransporten richting de drempel met Sardijngeul • Beperkt effect m.b.t. handhaving kustlijn • Beïnvloeding van de omliggende banken.

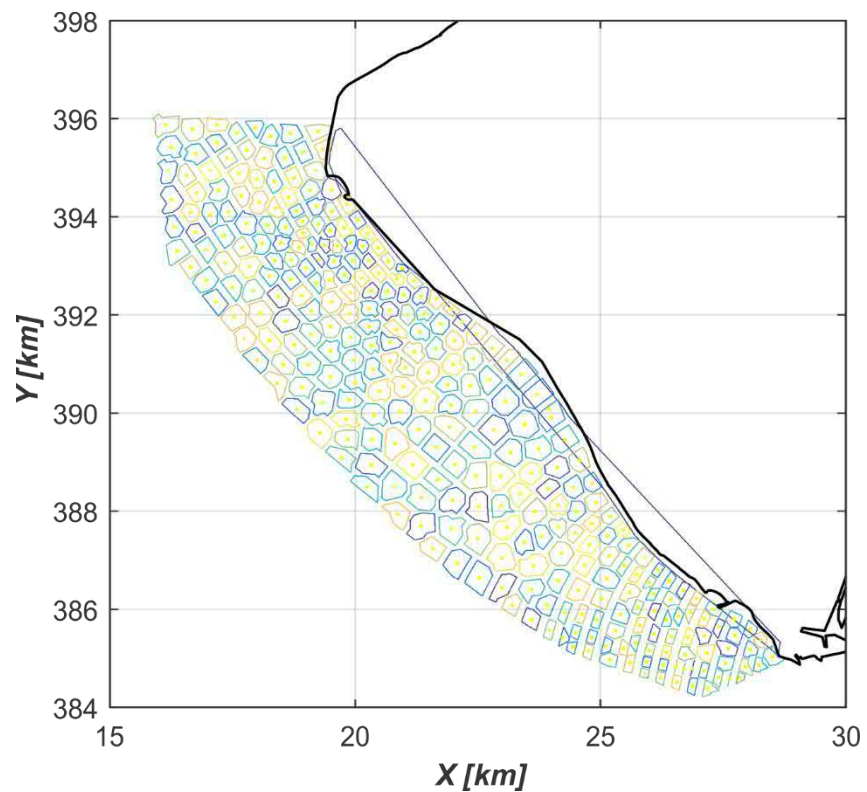
3.4.3 SedTRAILS instellingen

De SedTRAILS-analyse is zowel uitgevoerd op de gehele Westerscheldemonding als op de vooroever van Walcheren. De analyse van de gehele monding was strikt genomen niet noodzakelijk, maar omdat het rekendomein dit gebied al beslaat is ervoor gekozen deze simulaties extra uit te voeren. Op basis van deze simulaties kan een veel beter beeld van de grootschalige patronen verkregen worden en kunnen de op de literatuur gebaseerde inzichten worden getoetst. Karakterisering van de grootschalige transportpaden is gebaseerd op het aanbrengen van 1000 sedimentbronnen verdeeld over de gehele monding (Figuur 3-6) en deze voor lange tijd door te rekenen zodat voldoende ontwikkelde transportpaden ontstaan. Naast deze grootschalige analyse zijn de sedimentverplaatsingen rond het Bankje van Zoutelande in detail bepaald door hier 300 sedimentbronnen te gebruiken (Figuur 3-7).

Met behulp van SedTRAILS worden de *near-field* en *far-field* effecten van de drie suppletievarianten in kaart gebracht. De verplaatsing van de sedimentdeeltjes wordt over 1 jaar gevolgd door het jaarlijks-gemiddeld morfologische getij 365 keer te herhalen. Deze tijdsduur is voldoende lang om voldoende ontwikkelde transportpaden te creëren. De *far-field* effecten beschrijven de invloed van de suppletie op zeegatschaal. Deze analyse wordt door middel van de sedimenttransportpaden in kaart gebracht. Door middel van een gedetailleerde analyse van de verspreiding van het suppletiesediment kunnen ook de lokale verspreiding (*near-field* effecten) in kaart worden gebracht.



Figuur 3-6 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.



Figuur 3-7 Locaties van 300 sedimentbronnen langs de kust van Walcheren.

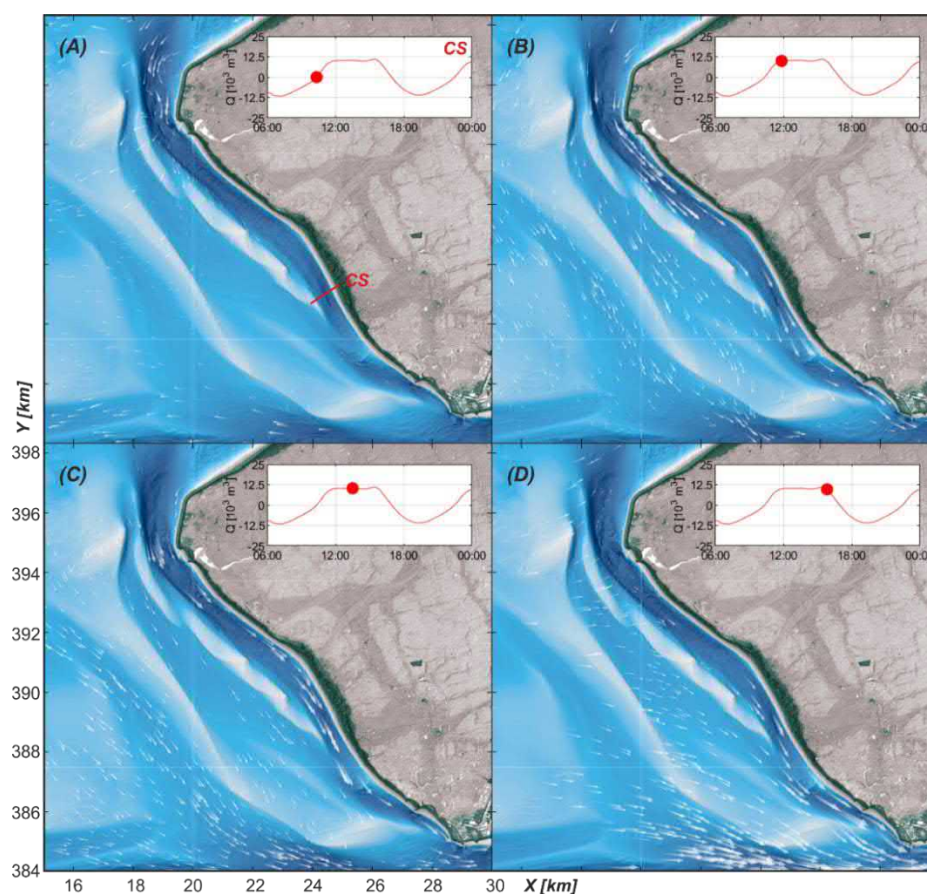
4 Modelresultaten

De analyse van de modelresultaten bestaat uit twee delen. Het eerste deel (H. 4.1) beschrijft de processen op de T0 (2019) bodem. Een goed begrip van de autonome processen helpt in de interpretatie van de modelresultaten van de suppletievarianten (H. 4.2). De keuze was om de T0 uitvoerig te analyseren. Dit helpt niet alleen het Bankje van Zoutelande beter te begrijpen, maar ook de omliggende morfologische eenheden. Dit kan helpen in de afbakening van eventuele alternatieve locaties mocht dat later wenselijk zijn. In H2.2 zijn de transportpaden voor de gehele monding weergegeven en beknopt beschreven.

4.1 T0 model resultaten

4.1.1 Stromingen en transporten door het getij

Figuur 4-1 en Figuur 4-2 geven een overzicht van de getijstromingen door het Oostgat en over het Bankje van Zoutelande. Tijdens kentering van de stroming (Figuur 4-1 [A]) vindt er nog uitstroming uit het Westerschelde estuarium plaats. Op de Noordzee is het getij dan al gekenterd en de stroming begint bij Westkapelle het Oostgat al binnen te dringen. In het Oostgat is de stroming nog beperkt, maar op het noordelijke deel van het Bankje staat een stroming die vanuit het Oostgat via het Deurloo West de Vlake van de Raan op is gericht. Vanaf 12:00 [B] volgt een langdurige, 4-uur durende periode waarbij maximale vloeddominante transporten optreden in het Oostgat. De dominante stromingen volgen de noordwest-zuidoost oriëntatie van de geul. De stroming over het Bankje is beperkt [B,C].

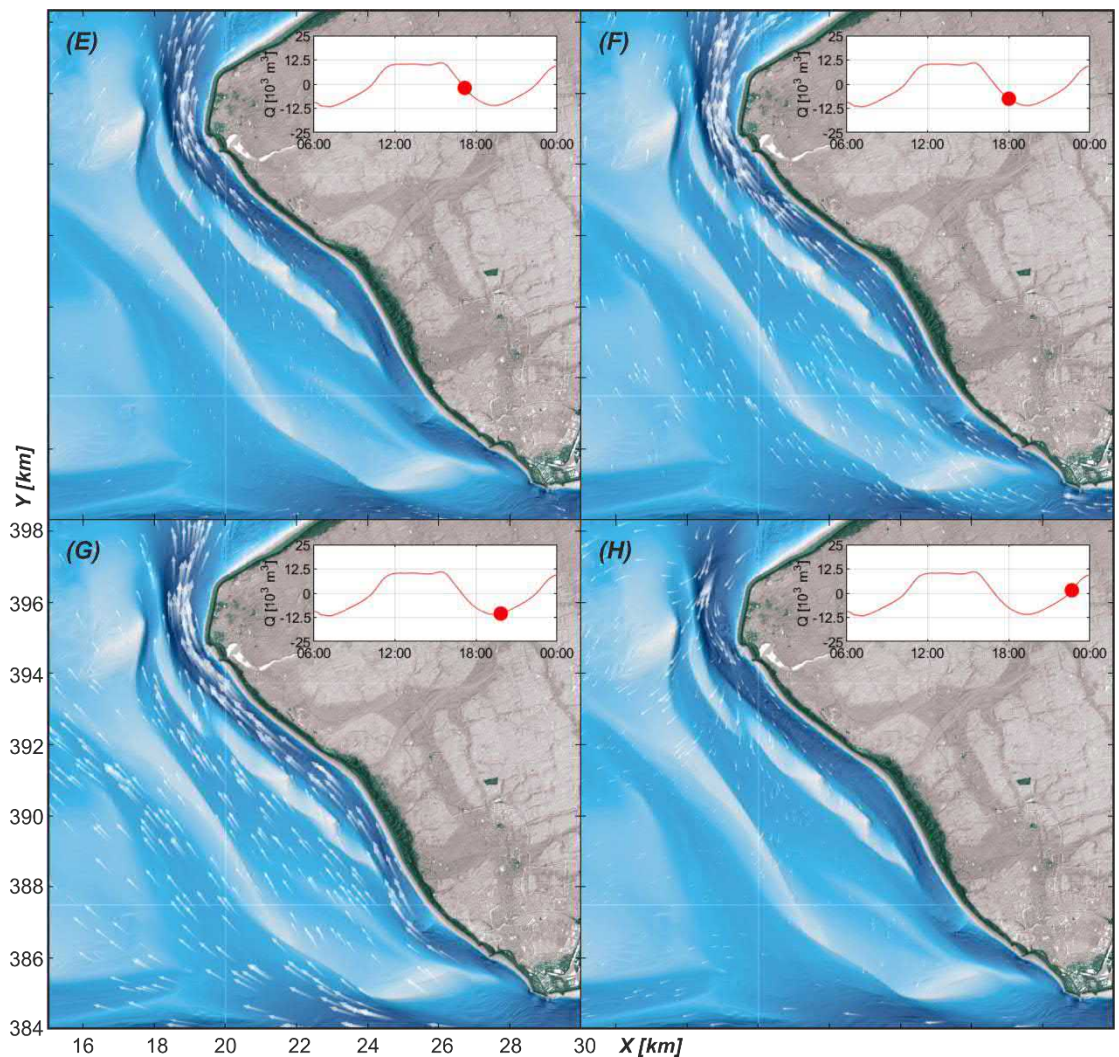


Figuur 4-1: Enkele karakteristieke snapshots van de stromingen in het Oostgat. De tijdserie is gebaseerd op de raai CS in het Oostgat (zie deelfiguur A voor ligging).

Rond 16:00 begint de stroming in het Oostgat duidelijk af te nemen. Op de Vlakte van de Raan is de stroming west-oost gericht. Ook over het noordelijke deel van het bankje staan de stromingen in deze richting (naar het Oostgat) [D]. Bij Westkapelle is de stroming dan al gekenterd en zeewaarts gericht, terwijl in de Sardijngeul nog een sterke stroming in tegenovergestelde richting, naar de Westerschelde, staat.

Rond 17:00 uur kentert de stroming in de debietraai [E]. Bij Westkapelle staan al grote zeewaartse stromingen (~ 0.5 m/s). De stromingen en debieten nemen daarna verder toe (F,G). Bij Westkapelle wordt rond 18:00 een maximale stroming van 0.7 m/s geobserveerd. De ebstroming volgt het Oostgat, maar is over het Bankje van Zoutelande noordelijk, naar het Oostgat toe, gericht. Om 21:30 kentert de stroming bij Westkapelle [H] en het proces herhaalt zich.

Merk op dat de stroming in het Oostgat wel netjes de geul volgt, maar dat er over het Bankje gedurende bepaalde fasen van het getij een duidelijke dwarscomponent staat.



Figuur 4-2: Enkele karakteristieke snapshots van de stromingen in het Oostgat. De tijdserie is gebaseerd op de raai CS in het Oostgat (zie Figuur 4-1A voor ligging).

4.1.2 Getijgedreven transporten

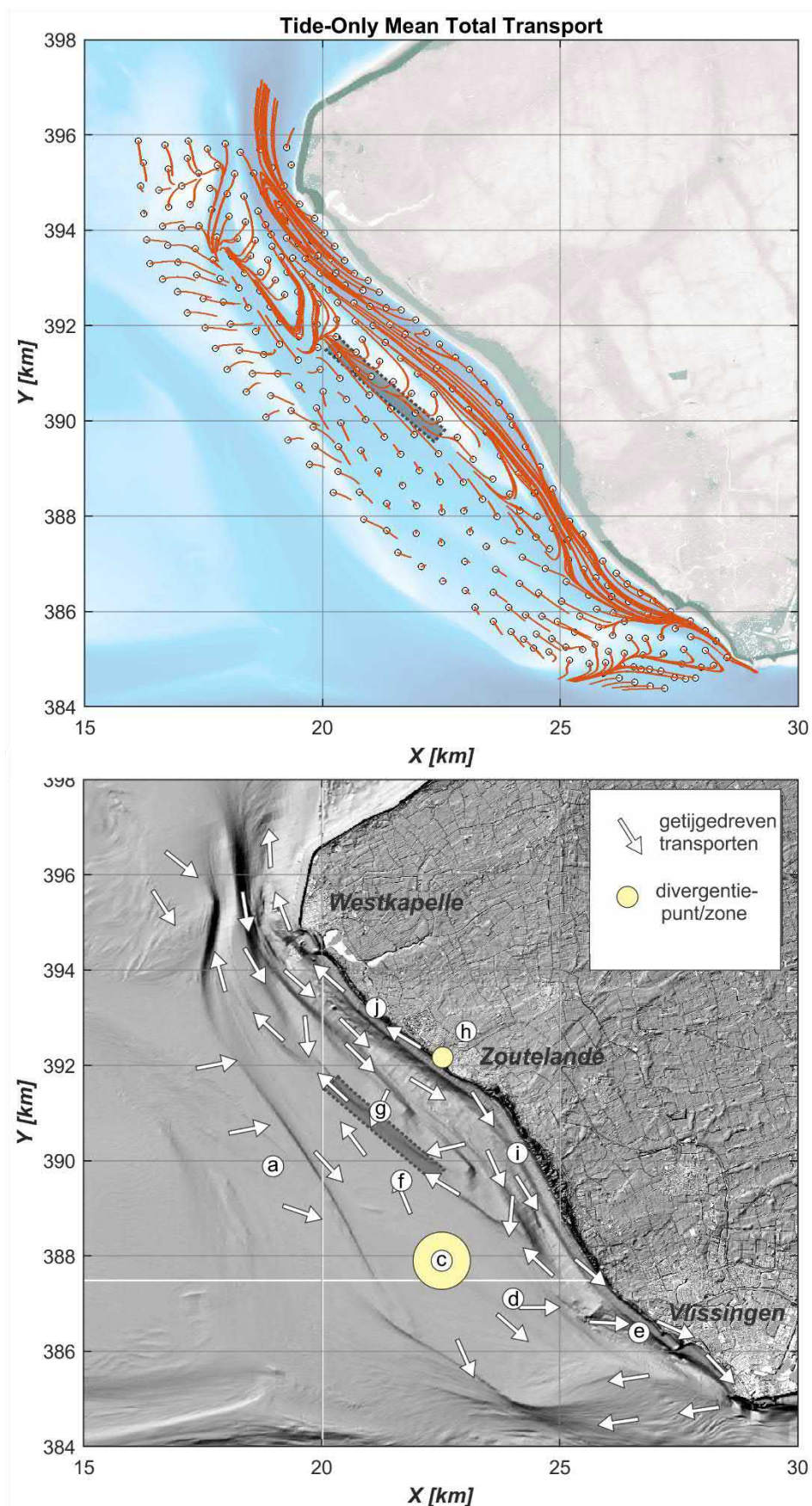
De invloed van het getij op de sedimenttransporten wordt geïllustreerd met de instantane transporten (zie bijvoorbeeld Appendix B.1) of het residuele transport. Een probleem in deze Figuren is het grote verschil in de grootte van de sedimenttransportvectoren tussen de geulen en de banken. Hierdoor is het lastig een duidelijk beeld van de dominante transporten te verkrijgen. SedTRAILS biedt een oplossing hiervoor. De verplaatsing van de deeltjes op basis van vectorvelden is veel makkelijker te volgen.

De getijgedreven transporten resulteren in een complex transportbeeld in het gebied voor de kust van Walcheren (Figuur 4-3). In de onderste deelfiguur zijn de patronen conceptueel samengevat, de notatie [a] t/m [f] refereert naar de labels in deze deelfiguur.

Vanaf de Vlakte van de Raan staat een westelijk gericht resttransport over de Elleboog [a] richting de geul Deurloo-Oost in. In de Deurloo-Oost is een groot gebied met kleine transporten zichtbaar net ten noorden van de Nolleplaat. Dit gebied vertoont ook een divergentiepunt [c]. Ten zuiden hiervan zijn de transporten richting de Nolleplaat gericht. Langs de Nolleplaat vindt een transport plaats langs de oostzijde van de bank richting de Sardijngeul en de Wielingen in. Een deel van het sediment wordt via de westzijde van de Nolleplaat rechtstreeks de Wielingen in getransporteerd. Noordelijk van het divergentiepunt zijn de transporten noordelijk gericht. Langs de zeewaartse zijde van het Bankje van Zoutelande bewegen de deeltjes de Rassen in [f]. Over het Bankje van Zoutelande vindt getijgedreven zeewaarts transport plaats: deeltjes bewegen vanaf het Oostgat over het Bankje van Zoutelande richting de Deurloo oost [g]. De deeltjes bewegen via de zeewaartse zijde van het Bankje noordwaarts en dragen bij aan de vorming van de bankgebieden hier (zoals De Rassen).

In het Oostgat zijn de transportpaden veel langer dan in het zeewaartse gebied van het Bankje, Deurloo en Elleboog. Deze lange transportpaden geven aan dat de netto transporten hier vele malen groter zijn. De transporten in het Oostgat zijn over het algemeen zuidelijk gericht [i]. Een doorgaand zuidwaarts transport vindt plaats langs het Bankje van Zoutelande. Een uitzondering vormt de kustzone tussen Zoutelande en Westkapelle. Ongeveer ter hoogte van Zoutelande, waar de knik in de kustlijn zit, ontstaat een divergentiepunt in het sediment transport [h]. Noordelijk hiervan zijn de transporten noordelijk gericht, richting Westkapelle en de Domburger Rassen op [j]. Ten zuiden van het divergentiepunt zijn de transporten juist zuidelijk gericht [i].

Een belangrijke conclusie is dat het Bankje van Zoutelande op basis van getij alleen geen landwaartse maar een zeewaartse verplaatsing vertoont. Het Bankje van Zoutelande oefent geen directe (getijgedreven) invloed op de kustlijn uit. De structurele erosie van de kustlijn van Walcheren komt mede door de vorming van een divergentiepunt, hierdoor is er een structureel, getijgedreven sedimentverlies ter hoogte van Zoutelande.



Figuur 4-3: SedTRAILS visualisatie van de sedimenttransportpatronen ten gevolge van de getijstrooming (boven) en (onder) conceptuele samenvatting van de belangrijkste transportrichtingen.

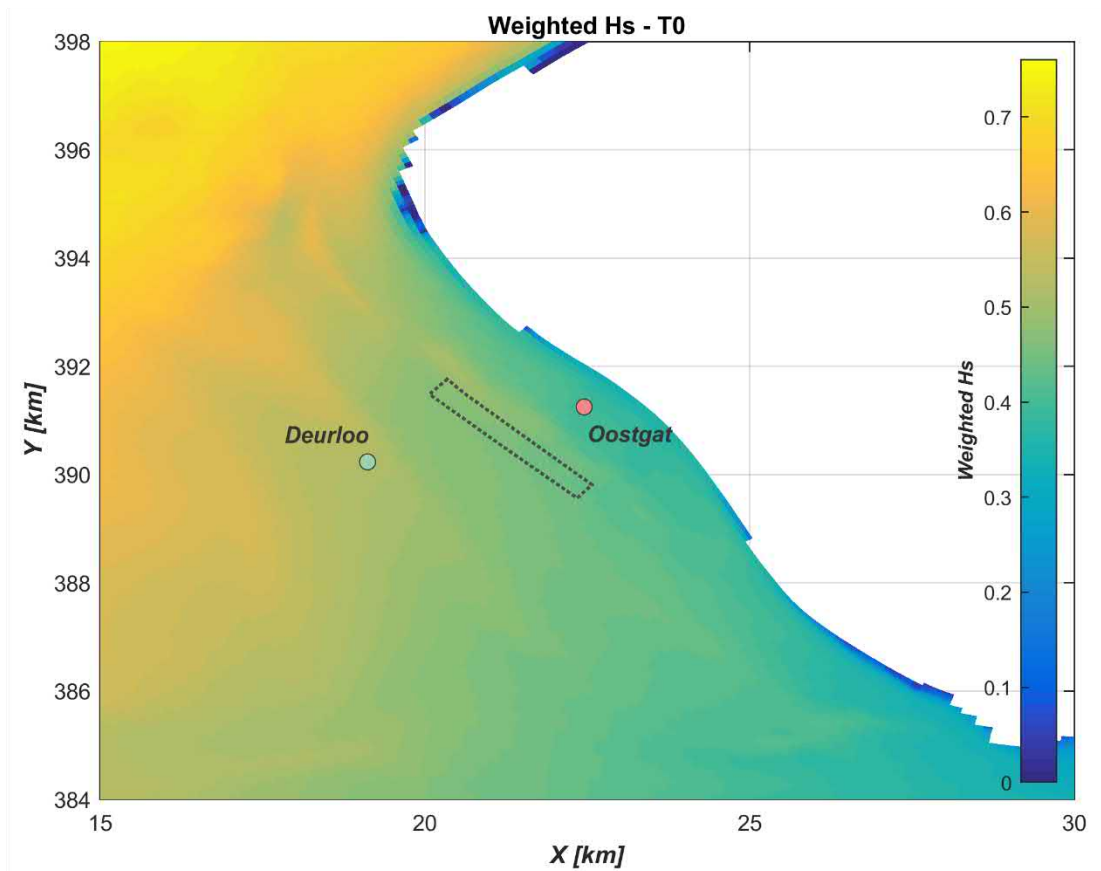
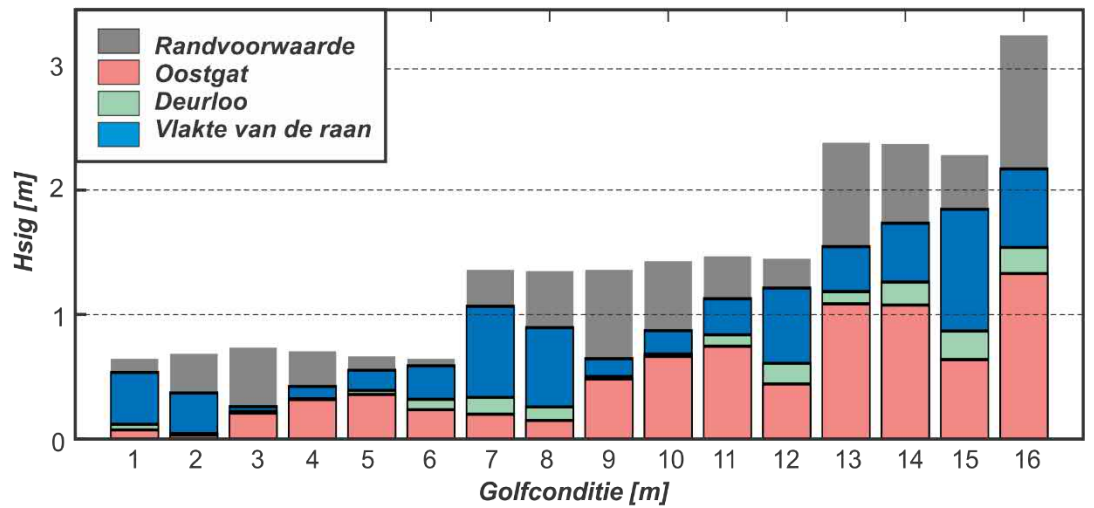
4.1.3 Invloed van de buitendelta op het golfklimaat

Naast het getij spelen ook golven een belangrijke rol in de sedimenttransporten. Het golfklimaat langs de kust van Walcheren en op het Bankje van Zoutelande wijkt sterk af van bijvoorbeeld de golven die aan de Hollandse kust voorkomen. Langs de Hollandse kust ligt de gemiddelde golfhoogte op 1,4 m. Langs de kust van Walcheren is dat rond de 0,40 m (Figuur 4-4, onder). Deze figuur is geconstrueerd door de individuele golven van de 16 golfklassen uit het representatief golfklimaat gewogen bij elkaar op te tellen. De lage golfhoogte kan verklaard worden door ten eerste de ligging van de kustlijn. Walcheren schermt de kustzone effectief af van golven uit noordelijke richtingen. Deze golven komen ongeveer 28% van de tijd voor (golfcondities 1, 2, 7, en 8). Ten tweede speelt de ondiepe monding een rol. Golfdissipatie op de banken en door bodemwrijving reduceert de golfhoogte sterk voordat ze de kustlijn en het Bankje van Zoutelande bereiken.

De gemiddelde golfhoogte (Figuur 4-4, onder) geeft al inzicht in het belang van het Bankje van Zoutelande voor de golfhoogte op de achterliggende kustlijn. Opvallend is dat er geen duidelijke reductie in golfhoogte optreedt. Direct op het Bankje is de golfhoogte wel iets lager, maar deze reductie is niet zichtbaar langs de kustlijn. Het merendeel van de reductie treedt al op voordat het Bankje bereikt wordt. Vanaf Deurloo tot Oostgat is de reductie eerder beperkt. Deze beperkte reductie wordt beter geïllustreerd in de bovenste deelfiguur van Figuur 4-4. In deze deelfiguur is voor drie meetstations (Vlakte van de Raan, Deurloo en Oostgat) per golfklasse de getijgemiddelde golfhoogte bepaald. Het merendeel van de afname in golfhoogte vindt plaats op de Vlakte van de Raan (grijs en blauw). Hier speelt verlies van golfenergie ten gevolge van de bodemwrijving waarschijnlijk een belangrijke rol. De maximale golfhoogte die optreedt op het Bankje van Zoutelande ligt op 1,2 m. Met deze golfhoogte treedt golfbreking op het bankje vrijwel niet op. Dit is ook duidelijk zichtbaar in het kleine verschil in golfhoogte tussen Deurloo en Oostgat. Ook bij de hoogste golven (conditie 16) is de afname nog beperkt.

In Appendix B.2 zijn de gemodelleerde golfhoogtevelden (gemiddeld over het getij) voor alle condities weergegeven. Deze figuren bevestigen dat de meeste golfbreking optreedt op de voorliggende banken. Bij golfconditie 16 vindt golfbreking vooral plaats op de Elleboog. Hier reduceren de golfhoogten van 2 m naar minder dan 1 m. Een tweede verschil is dat de golfhoogte direct in de luwte van het Bankje wel iets afneemt, maar dat de golfhoogte langs de kust weer iets hoger is. Dit is waarschijnlijk het gevolg van golf-stroom interactie.

Een belangrijke conclusie die we op basis van deze golfhoogte velden kunnen trekken is dat een suppletie zeer ondiep aangelegd moet worden wil er een duidelijke invloed (golfbreking) op het golfklimaat kunnen optreden.



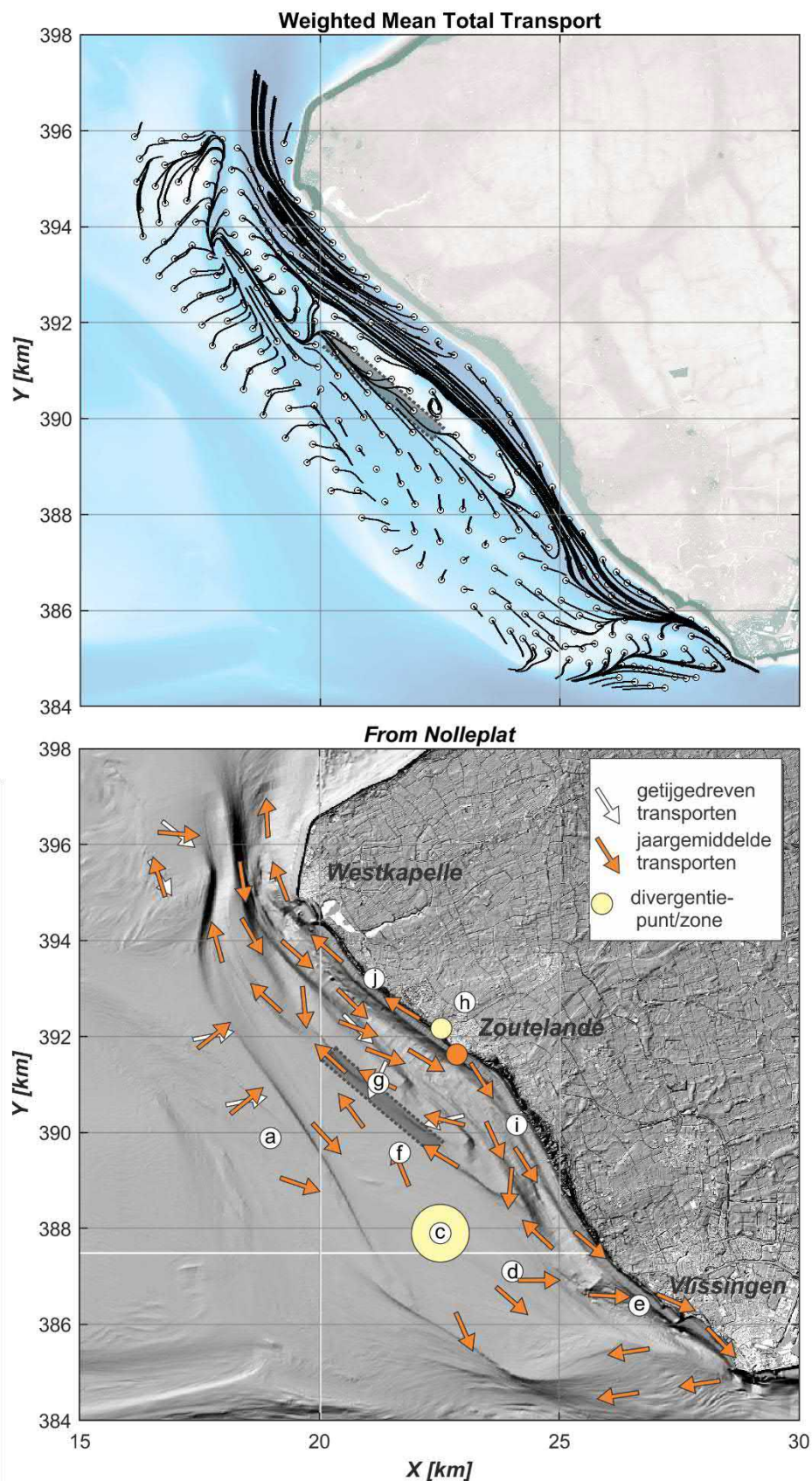
Figuur 4-4 (boven): Overzicht van de golfhoogte zoals opgelegd op de modelrand (Randvoorwaarde) en de locaties Oostgat, Deurloo en Vlake van de Raan. Onder: Overzicht van het jaarlijks-gemiddelde golfhoogte voor de T0 variant. De zwarte polygoon geeft de locatie van het suppletiegebied. Station Vlake van de Raan ligt zeewaarts van Deurloo op X: 6.2km en Y: 392.7 km.

4.1.4 Jaargemiddelde sediment transporten (getij en golven)

De analyse van de jaargemiddelde transporten is ook gebaseerd met SedTRAILS. Deze analyse kan op twee manieren uitgevoerd worden. Ten eerste kan voor elke individuele golfconditie de verplaatsing van de sedimentdeeltjes worden berekend. Er ontstaan zo 16 individuele voorspellingen van de sedimenttransportpaden. Deze worden weergegeven in Appendix B.3.1. Deze individuele transportpatronen geven een goed inzicht in de werking van het morfologische systeem onder verschillende golfcondities. De bijbehorende transportpaden kunnen vervolgens op verschillende manieren worden geanalyseerd.

De tweede manier is het berekenen van de jaargemiddelde transporten en op basis daarvan de verplaatsing van de deeltjes visualiseren. Voor ieder van de 16 golfcondities zijn de sedimenttransporten als 10-minuten gemiddelde berekend en deze waarden worden gewogen bij elkaar opgeteld. Dit geeft een representatieve tijdserie van het jaargemiddelde getij inclusief de invloed van golven. Na toepassing van SedTRAILS ontstaat zo één representatieve voorspelling van de sedimenttransportpatronen (Figuur 4-5). De belangrijkste conclusie is dat het geobserveerde sedimenttransportpatroon grote overeenkomsten vertoont met die van het getij alleen (Figuur 4-3). De in Hoofdstuk 4.1.2 gepresenteerde analyse is ook geldig voor de jaargemiddelde patronen en wordt hier niet herhaald.

Getij is blijkbaar het dominante transportmechanisme op de vooroever van Walcheren. Golven dragen vooral bij tot het beschikbaar maken van sediment dat door het getij verder getransporteerd wordt. Voor de kustzone van Walcheren betekent dit dat golven sediment vanaf de kustzone richting het Oostgat transporteren. In het Oostgat wordt dit sediment snel kustlangs afgevoerd. De patronen wijzigen hierbij niet. Grote golven kunnen een ander sedimenttransport genereren, maar deze condities komen weinig voor, waardoor deze het jaargemiddelde transport nauwelijks wijzigen. Alleen lokaal, bijvoorbeeld op De Rassen treden andere transporten op door toevoeging van golven op. Hier breken de golven op de ondiepten waardoor er een golfgedreven stroming wordt gegenereerd die de getijstroming overheerst.



Figuur 4-5: SedTRAILS visualisatie van de sedimenttransportpatronen ten gevolge van de jaargemiddelde transporten (boven) en conceptuele samenvatting van de belangrijkste transportrichtingen (onder). De getijgedreven transportpijlen zijn identiek aan Figuur 4-3.

Invloed van verschillende golfcondities op de sedimenttransporten

De analyse van de 16 individuele transportpatronen voor de verschillende golfklassen verschaft meer inzicht in de werking van het morfologische systeem onder verschillende golfcondities. In Figuur 4-6 zijn de patronen voor een hoge golfhoogte en een lage golfhoogte weergegeven. De meest in het oog springende kenmerken zijn:

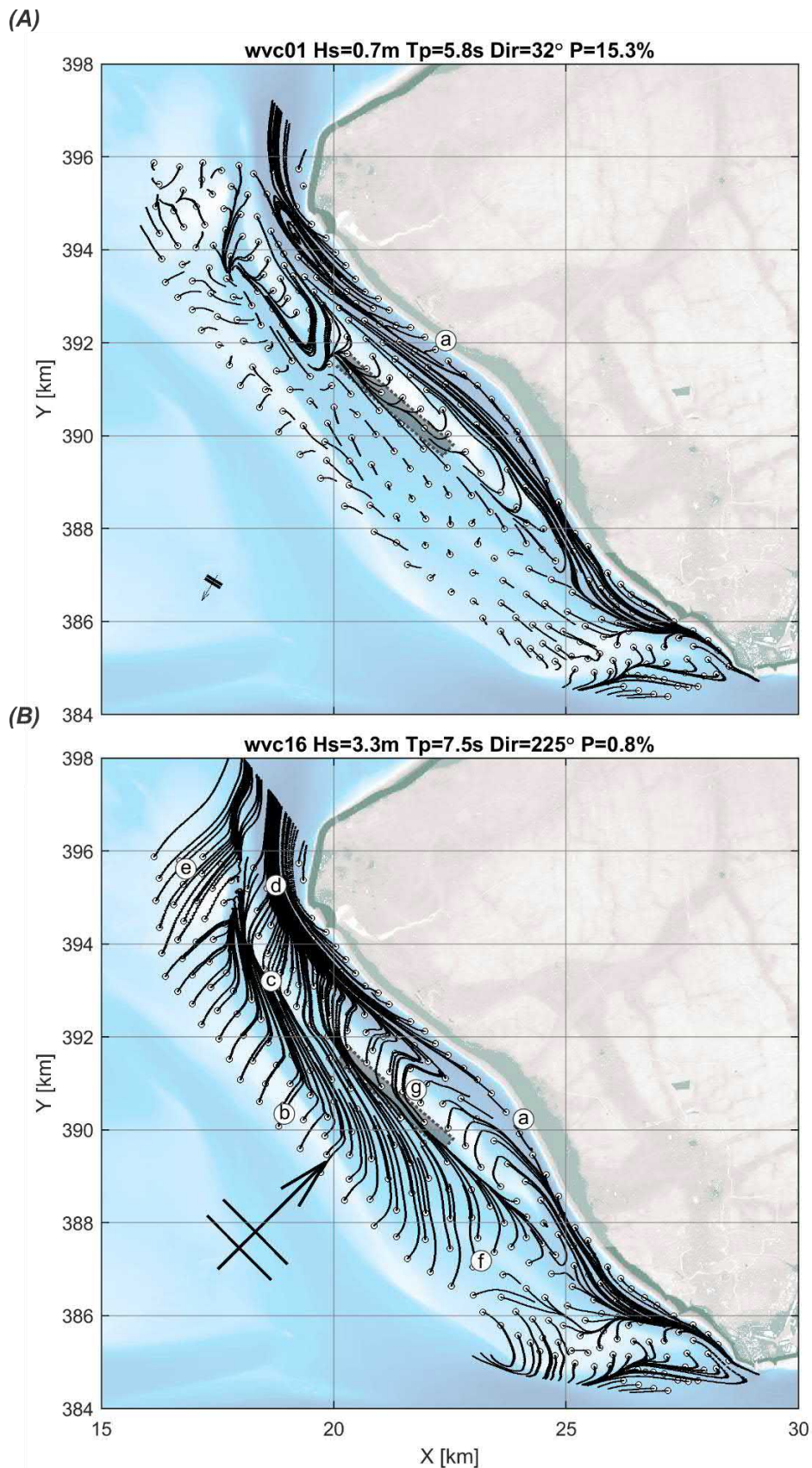
[a]. Een verplaatsing van het divergentiepunt. Op basis van de getijsimulaties is geconstateerd dat er ongeveer ter hoogte van Zoutelande een divergentiepunt in de kustlangse sedimenttransporten optreedt. Dit divergentiepunt is zowel tijdens lage als hoge golven aanwezig. Alleen verplaatst het tijdens de hoge golven duidelijk zuidelijk. Hieruit kan geconcludeerd worden dat golven niet de oorzaak zijn, maar wel een rol spelen in de ligging van dit punt langs de kust en dus mede de erosie aansturen.

[b]. Toename van de landwaartse transporten vanaf de Vlake van de Raan. De getijgedreven toevoer vanaf de Vlake van de Raan richting Deurloo-Oost is beperkt. Door de toevoeging van golven nemen deze transporten echter sterk toe. Er ontstaat een grote aanvoer over de Elleboog heen. Vanuit Elleboog verplaatsen deze deeltjes zich noordwaarts via de Deurloo-Oost/ Geul van de Rassen [c] en dan over het Noordelijke gedeelte van het Bankje van Zoutelande richting het Oostgat [d]. In het noordelijke deel van het Oostgat zijn de transporten van richting veranderd en voornamelijk noordelijk gericht.

[e]. Noordelijk gerichte transporten op de Rassen. Getijgedreven transporten op de Rassen waren eerder beperkt. Door toevoeging van golven ontstaan grote noordelijk gerichte transporten. Deze dragen bij aan de geobserveerde sedimentatie van de Domburger Rassen.

[f]. Toename van de transporten in Deurloo Oost. Ook in het zuidelijke deel van de Deurloo Oost nemen door toevoeging van golven de transporten toe. Er blijft een divergentiepunt in de transporten aanwezig, maar zowel de noordelijk als de zuidelijk gerichte transporten nemen hier sterk toe.

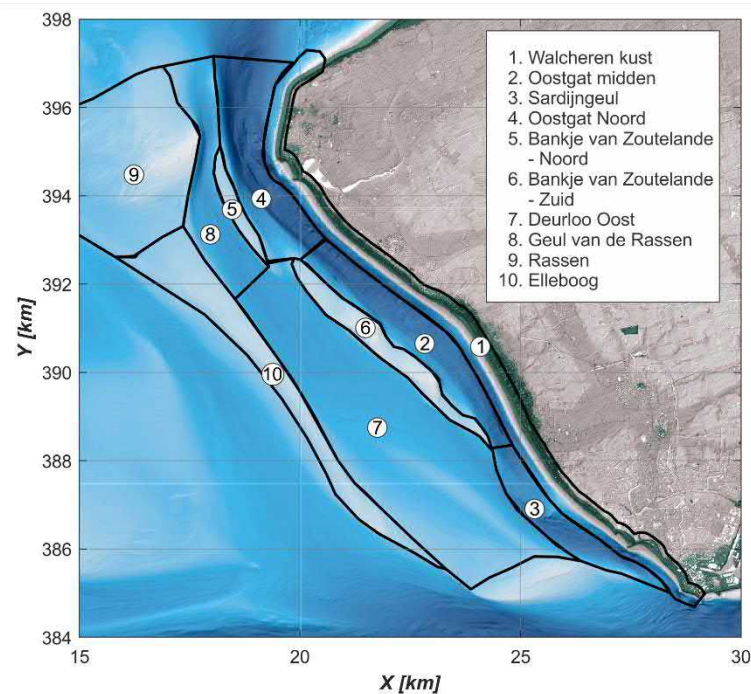
[g]. Landwaartse transporten op het Bankje van Zoutelande. Voor de suppleties is met name het verschil in transporten op het Bankje van Zoutelande van belang. Getijgedreven ontstaat een transport vanuit het Oostgat het Bankje van Zoutelande op. Door toevoeging van de golven worden deze transporten juist omgedraaid. Er ontstaat een transport vanaf het centrale deel van het Bankje van Zoutelande het Oostgat in. Transport van het noordelijke deel van het Bankje wordt via het Oostgat richting Westkapelle afgevoerd. Transport vanaf het zuidelijke deel wordt via het Oostgat richting de Sardijngeul verplaatst. Het splitsingspunt in deze twee richtingen ligt ongeveer ter hoogte van het suppletiegebied.



Figuur 4-6: (A) transportpaden voor een simulatie gedomineerd door getij (als gevolg van een laag-energetische golfklasse) en (B) transportpaden voor een simulatie gedomineerd door golven (als gevolg van een hoogenergetische golfklasse).

Het gedrag van verschillende morfologische eenheden

Het is ook mogelijk om over de gehele dataset te kijken waar de deeltjes per deelgebied naar toe verplaatsen. Op basis van de begrenzingen van de platen en geulen is een indeling gemaakt in tien morfologische eenheden (Figuur 4-7). Voor iedere eenheid zijn de verplaatsingen van de deeltjes gevisualiseerd (Figuur 4-8 en Figuur 4-9). De hier beschreven ontwikkeling overlappen met de eerdere analyses. Dit geeft een herhaling van feiten, maar bevestigt wel dat de resultaten van de uitgevoerde analyses robuust zijn.



Figuur 4-7: Een overzicht van de deelgebieden ten behoeve van de SedTRAILS analyse

(1) Kustzone Walcheren

Een overzicht van de transporten uit de kustzone is weergegeven in Figuur 4-8 (1). De deeltjes uit de kustzone worden snel via het Oostgat afgevoerd. In het Oostgat is een duidelijke tweedeling te zien. Tussen Zoutelande en Westkapelle worden deeltjes in noordelijke richting afgevoerd. Ten zuiden van Zoutelande worden deeltjes juist oostwaarts afgevoerd richting Vlissingen. Zodra deeltjes in het Oostgat belanden vindt er geen uitwisseling meer plaats met de voorliggende banken of terug richting de kustzone. Alle deeltjes worden geullangs afgevoerd.

(2) Oostgat (midden)

Een analyse van de deeltjes uit het centrale deel van het Oostgat wordt getoond in Figuur 4-8 (2). Ook in deze figuur is de eerder geobserveerde tweedeling in transporten terug te zien. Ten zuiden van Zoutelande bewegen de transporten in oostelijk richting en ten noorden hiervan in noordelijke richting. Deze observatie geldt echter alleen voor de deeltjes aan die zich aan de landwaartse zijde van de geul beginnen. De deeltjes die zich aan de zeewaartse zijde bevinden vertonen een verschillend gedrag. Deze deeltjes bewegen zuidelijk, maar interacteren ook met het voorliggende bankje. Deeltjes bewegen vanaf de geul het bankje op.

(3). Sardijngeul

De uitwisseling van de deeltjes in de Sardijngeul wordt getoond in Figuur 4-8 (3). De deeltjes in de Sardijngeul vertonen over het algemeen een verplaatsing in zuidelijke richting. Deze deeltjes verplaatsen door het centrale deel van de geul, om de Nolleplaat heen, en de

Wielingen in. In de Wielingen worden de deeltjes zeewaarts getransporteerd. Alleen de meest noordelijke deeltjes (net ten zuiden van het Bankje van Zoutelande) vertonen een tegenovergestelde trend. Deze deeltjes verplaatsen zeewaarts en noordwaarts langs de zeezijde van de meest zuidelijke punt van het Bankje van Zoutelande.

(4) Oostgat (noord)

Deeltjes uit het noordelijke deel van het Oostgat, ter hoogte van Westkapelle, vertonen een complex gedrag (Figuur 4-8 (4)). De deeltjes die aan de landwaartse zijde losgelaten worden propageren door de geul zeewaarts. Deze bewegen zich richting de Domburger Rassen. Deeltjes die in het centrale deel en aan de zeewaartse zijde worden losgelaten bewegen juist in zuidelijke richting. Deeltjes die zich op de geulwand bevinden migreren ver zuidwaarts. Een aantal deeltjes beweegt zich over het Bankje van Zoutelande zeewaarts richting de Geul van de Rassen. In de Geul van de Rassen bewegen de deeltjes zich noordwaarts.

(5). Bankje van Zoutelande (noord)

De transporten vanaf het noordelijke deel van het Bankje van Zoutelande worden weergegeven in Figuur 4-8 (6). Deze transporten vertonen ook een tweedeling in paden. Het merendeel van de deeltjes verplaatst landwaarts, het Oostgat in. In het Oostgat verplaatsen de deeltjes zich in langsrichting, waarbij het merendeel richting het noorden gaat. Langs de zeewaartse zijde van het Bankje verplaatsen deeltjes zich in zuidelijke richting.

(6). Bankje van Zoutelande (zuid)

Figuur 4-9 (7) geeft een overzicht van de deeltjes vanaf het Bankje van Zoutelande. Het hier geobserveerde gedrag is van direct belang voor de suppletie. Deze deeltjes vertonen een complex patroon. Het merendeel van de deeltjes migreert landwaarts en wordt door het Oostgat opgenomen. Deeltjes die losgelaten worden op het noordelijke deel van dit gebied verplaatsen via het Oostgat in noordelijke richting. Het merendeel van de deeltjes verplaatst zich via de zeewaartse geulwand van het Oostgat in zuidelijke richting. Uiteindelijk belanden deze tot in de Sardijngeul. Een aantal van de deeltjes beweegt van het Bankje van Zoutelande juist zeewaarts. Deze worden via de Deurloo Oost in noordelijke richting afgevoerd. Uiteindelijk belanden ze op de Rassen.

(7). Deurloo Oost

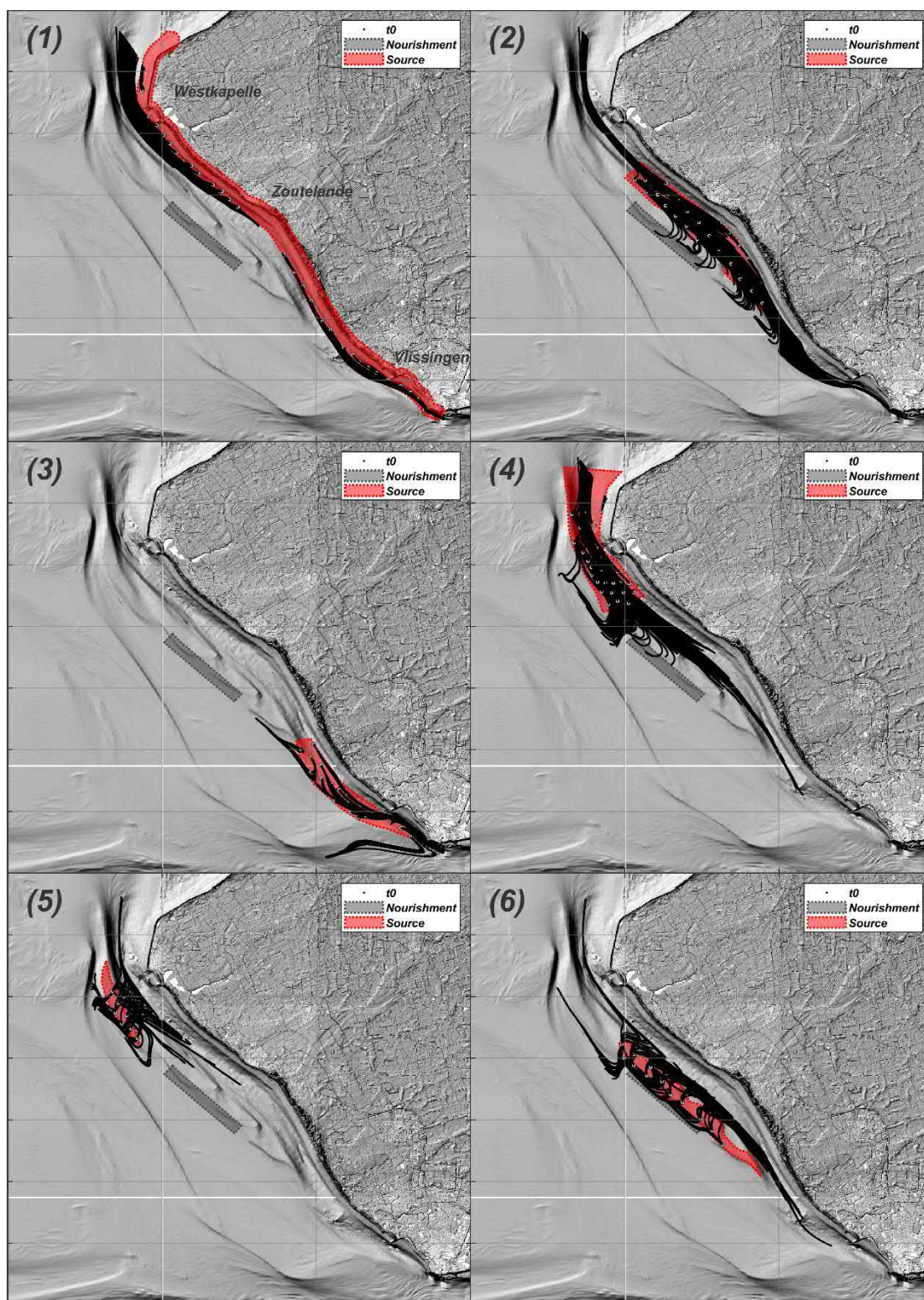
Vanuit de Deurloo Oost vertonen de deeltjes de grootste verspreiding (Figuur 4-8 (5)). Deeltjes geplaatst in het zuidelijke deel van de polygoon verplaatsen zich richting de Wielingen. De Nolleplaat splitst de paden in een deel dat zich zuidelijk richting de Wielingen (a). Deze deeltjes buigen de Geul van de Walvisstaart in. Een ander pad beweegt zich langs de noordzijde van de Nolleplaat, de Sardijngeul in en uiteindelijk de Wielingen in (b). Het merendeel van de deeltjes (c) verplaatst zich via de Deurloo oost in noordelijke richting de Geul van de Rassen in (f). Een geconcentreerd transportpad is zichtbaar langs de zeewaartse geulwand van het Bankje van Zoutelande (d). Het merendeel van de deeltjes blijft de zeewaartse rand van de bank volgen en gaat dan de Geul van de Rassen in. Tussen het zuidelijke en noordelijke deel van het Bankje van Zoutelande ligt een kleine kortsluitgeul. Via deze geul gaat ook een deel van de deeltjes het Oostgat in (e).

(8) Geul van de Rassen

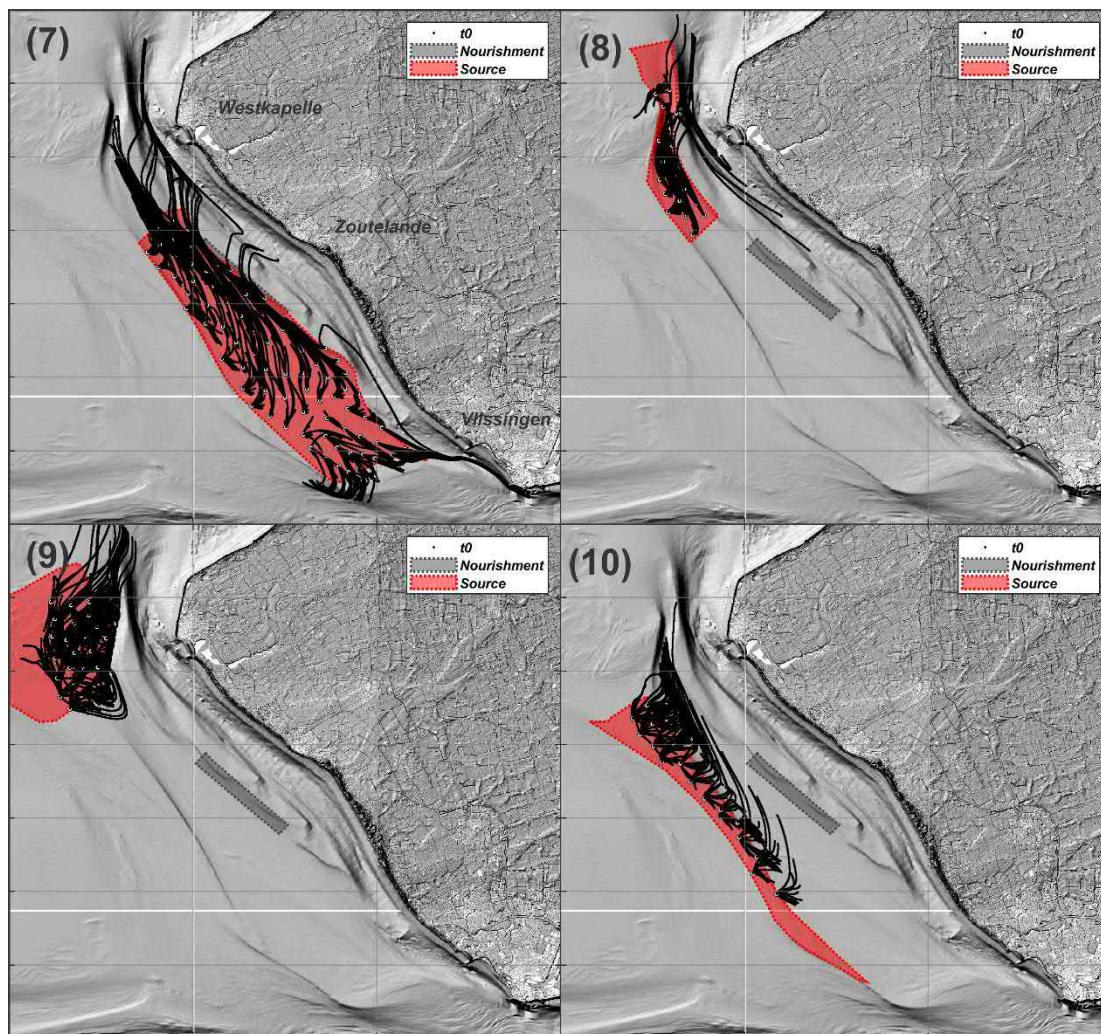
Vanaf de Geul van de Rassen gaan de transporten noordwaarts (Figuur 4-9 (8)). Ook hier blijven de paden vooral de geul volgen. De uitwisseling naar de Rassen is beperkt. Transporten bewegen wel het Oostgat in waar ze voornamelijk bijdragen aan de noordwaartse transporten. Vanaf de Rassen staan de transporten vooral landwaarts gedreven (Figuur 4-9 (9)). In het noordelijke deel is er een transport noordwaarts.

(10) Elleboog

De transporten van Elleboog zijn initieel golfgedreven (Figuur 4-9 (9)). Zodra ze in de Geul van de Rassen terecht komen volgen ze de daar eerder beschreven transportrichtingen.



Figuur 4-8: Een overzicht van de sedimentdeeltjes die losgelaten worden in verschillende deelpolygonen (zie Appendix B.3.3 voor grote figuren).

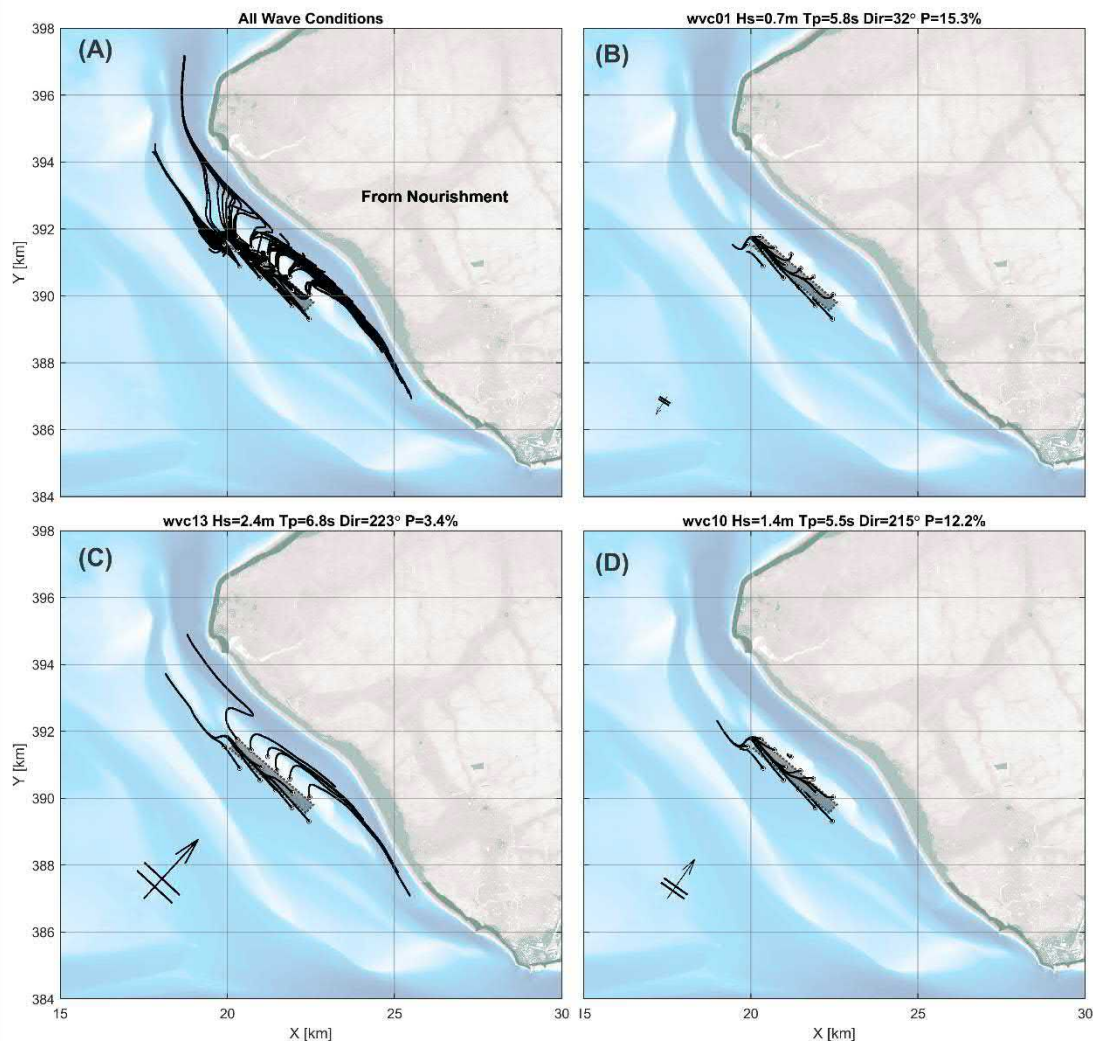


Figuur 4-9: Een overzicht van de sedimentdeeltjes die losgelaten worden in polygonen 7-10 (zie Appendix B.3.3. voor grote figuren).

4.1.5 Sediment transport vanaf de suppletielocatie

In bovenstaande figuren is steeds heel het kustgebied beschouwd. Met behulp van de SedTRAILS-resultaten kan ook alleen het sedimenttransport vanaf de suppletielocatie inzichtelijk gemaakt worden (Figuur 4-10 en Appendix B.3.2.). In deze figuur zijn de bijdragen van de individuele condities weergegeven zonder deze te schalen met de kans van voorkomen. Dit geeft dus een indicatie of transport kan optreden, maar zegt niet of dit een belangrijke bijdrage vormt tot de totale transporten. Wat opvalt is dat transporten afhankelijk van de golfhoogte een divers transportpatroon vertonen. Er treedt zowel transport op aan de landwaartse zijde als aan de zeewaartse zijde van het Bankje op en transport vanaf het Bankje kan zowel zuidelijk als noordelijk gericht zijn.

Transporten aan de landwaartse zijde van het Bankje van Zoutelande treden op onder alle golfcondities. Deze transporten zijn getijgemiddeld altijd noordelijk gericht. Door toevoeging van golven worden deze transporten iets hoger. Onder kalme of gemiddelde golfcondities treedt er een zeewaarts gericht transport op over het Bankje. Alleen tijdens hoge golven treedt er transport op vanaf de kruin van het Bankje het Oostgat in. In het Oostgat worden de sedimentdeeltjes voornamelijk in zuidelijke richting afgevoerd. Een rechtstreekse uitwisseling met de kustlijn van Walcheren treedt onder geen enkele conditie op.



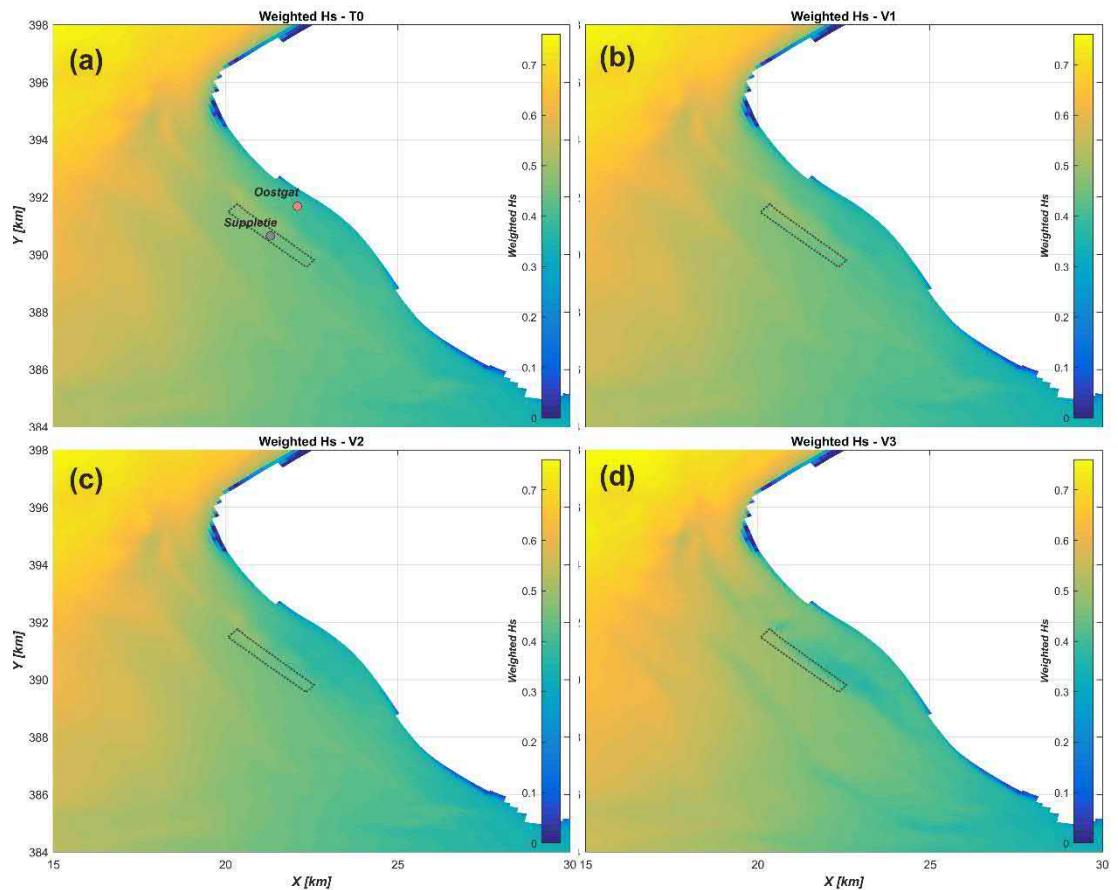
Figuur 4-10: Een overzicht van de sedimentuitwisseling vanaf het deelgebied Elleboog voor: (A) alle golfcondities, (B) voor wvc01 (kalm, uit noordelijke richting), (C) wvc10, (gemiddeld uit zuidwestelijke richting) en (D) wvc13 (hoog uit zuidwestelijke richting).

4.2 Resultaten modellering suppletievarianten

Gezien de geringe invloed van de suppletievarianten op de stromingen en transporten is de analyse beperkt. De T0 simulaties laten al zien dat er geen rechtstreeks transport vanaf het Bankje van Zoutelande naar de kust van Walcheren optreedt. Tijdens kalme omstandigheden is het transport van het bankje zeewaarts gericht en tijdens ruwe omstandigheden fungeert het Oostgat als een 'transportband' en wordt sediment effectief kustlangs afgevoerd. Dit hoofdstuk richt zich vooral op (1) het in kaart brengen van de beïnvloeding van het golfklimaat (4.2.1) en (2) het kwantificeren van de invloed op de jaargemiddelde sedimenttransporten (4.2.2).

4.2.1 Invloed van de suppleties op het golfklimaat

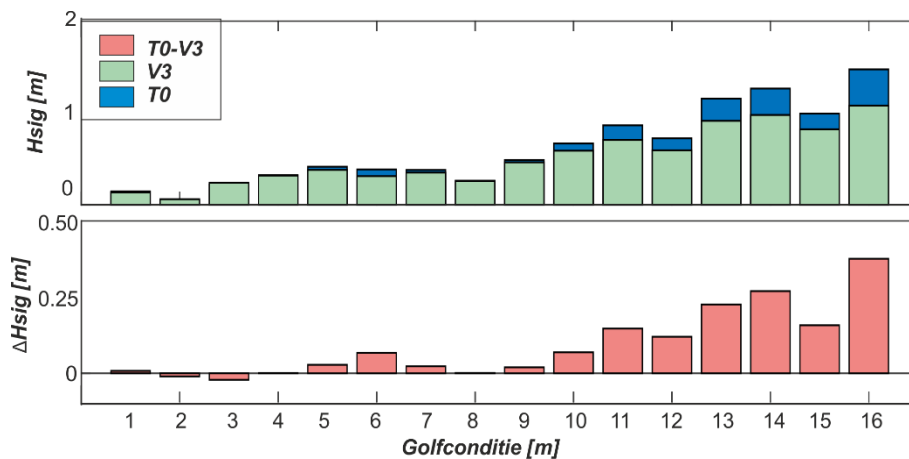
Figuur 4-11 tot en met Figuur 4-14 geven inzicht in het effect van de suppletievarianten op het golfklimaat. In Figuur 4-11 geeft voor alle suppletievarianten de jaargemiddelde golfhoogte. De drie suppletievarianten (aangeduid als V1 voor suppletieontwerp 1, V2 voor suppletieontwerp 2 en V3 voor suppletieontwerp 3) vertonen een gelijkwaardig beeld aan de T0 (Figuur 4-11a). Er is geen sterke beïnvloeding van het golfklimaat door de suppleties te observeren. Zelfs in de 0 m variant blijft de golfhoogte nog gelijkwaardig. Dit wil niet zeggen dat er geen verschillen optreden, maar de verschillen lijken jaargemiddeld beperkt t.o.v. de T0 situatie. Ongeacht de aanleghoogte van de suppletie verandert het ruimtelijk beeld van het golfklimaat niet ingrijpend.



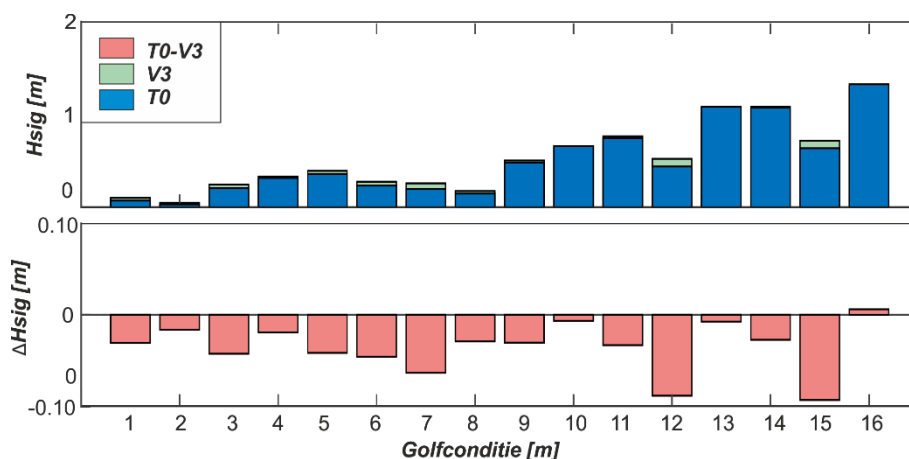
Figuur 4-11: Jaarlijks-gemiddelde golfhoogte voor de (a) T0, (b) V1, (c) V2 en (d) V3

Dit wil niet zeggen dat er geen veranderingen optreden. Om deze veranderingen te kwantificeren is in detail gekeken naar de verandering van de golfhoogte voor iedere individuele golfklasse. Hiervoor zijn twee punten in detail beschouwd, weergegeven in Figuur 4-11a. Resultaten van meetpunt 'suppletie' staan in Figuur 4-12 en die van meetpunt 'Oostgat' (achter de suppletie, in het Oostgat, net voor de kust) staan in Figuur 4-13. Op de locatie van de suppletie is te zien dat de golfhoogte voor de hoge golven wel degelijk afneemt met gemiddeld 10 tot 20%. Deze reductie heeft echter weinig effect op de golfhoogte langs de kust. De golfhoogte op de locatie Oostgat vertoont zelfs een kleine toename in hoogte (tot 10 cm). Het is niet geheel duidelijk waar deze toename vandaan komt. Het is ook mogelijk dat dit veroorzaakt wordt door de numerieke oplossing van SWAN. Swan heeft een iteratieve solver die stopt bij 98% nauwkeurigheid. Afhankelijk van het iteratie proces kan de eindoplossing van de verschillende varianten iets afwijken. Het is mogelijk dat de eindoplossing van suppletievariant V3 net iets afwijkt van die van de T0 situatie.

De belangrijkste conclusie die getrokken kan worden met deze resultaten is dat geen van de suppletievarianten een duidelijk golfreductie voor de achterliggende kust geeft.

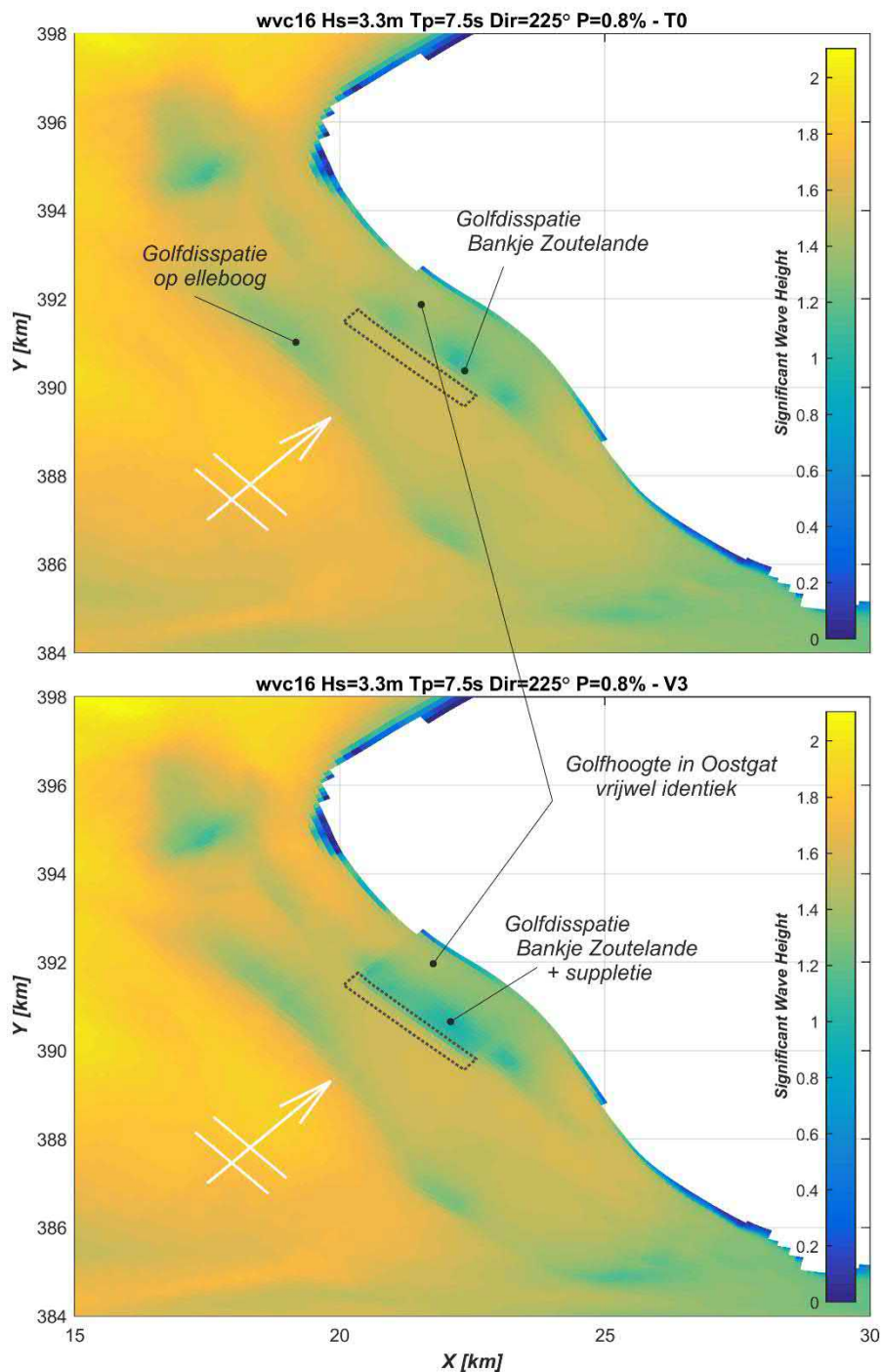


Figuur 4-12: Golfhoogte en verschil in golfhoogte tussen de T0 en suppletievariant 3 (V3) voor de locatie suppletie (zie Figuur 4-11).



Figuur 4-13: Golfhoogte en verschil in golfhoogte tussen de T0 en suppletievariant 3 (V3) voor de locatie Oostgat (zie Figuur 4-11).

Figuur 4-14 illustreert de beperkte invloed van de suppletie op de golfhoogte nog verder aan de hand van golfconditie 16 voor de T0 (boven) en suppletievariant V3 (onder). In de luwte van de suppletie treedt wel degelijk extra golfafscherming op na aanleg van de suppletie. Er is een duidelijk gebied met afgenomen golfhoogtes in de luwte van de suppletie. De golfhoogte is hier 30-40 cm lager. Deze verlaging is echter zeer lokaal. In het Oostgat herstelt de golfhoogte en is er vrijwel geen verschil tussen de twee simulaties. Dit herstel wordt veroorzaakt door golfstroom interactie. Deze domineert hier de golfhoogte.



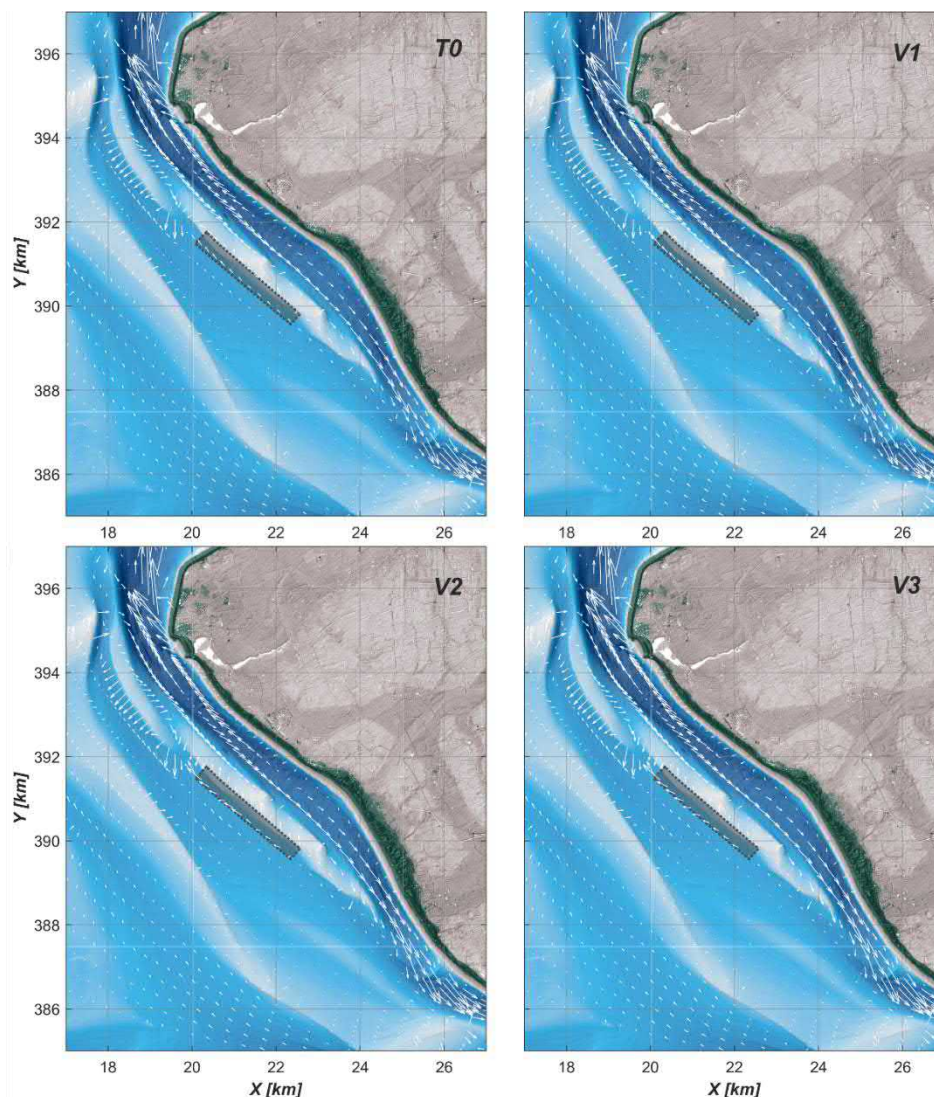
Figuur 4-14: Gemiddelde golffhoogte voor golfconditie 16 voor de T0 (boven) en suppletievariant 3 (onder).

De geringe invloed van de suppletievarianten op het golfklimaat is verklaarbaar vanuit een model-oogpunt, maar wel enigszins verassend. Een beperking van de modelaanpak is dat er gerekend is met een morfologisch representatief getij. Dit getij representeert het jaargemiddeld transport, maar ook een gemiddelde waterhoogte. Het getij is voor alle golfcondities gelijk waardoor ook de waterstand tijdens hoge en lage golven identiek is. In werkelijkheid treden hoge golven vaak op met een grote setup van de waterstand. Deze setup zou ervoor kunnen zorgen dat de golfdissipatie op de Vlake van De Raan afneemt, waardoor het golfbrekkende effect van de suppleties op het Bankje van Zoutelande kan toenemen.

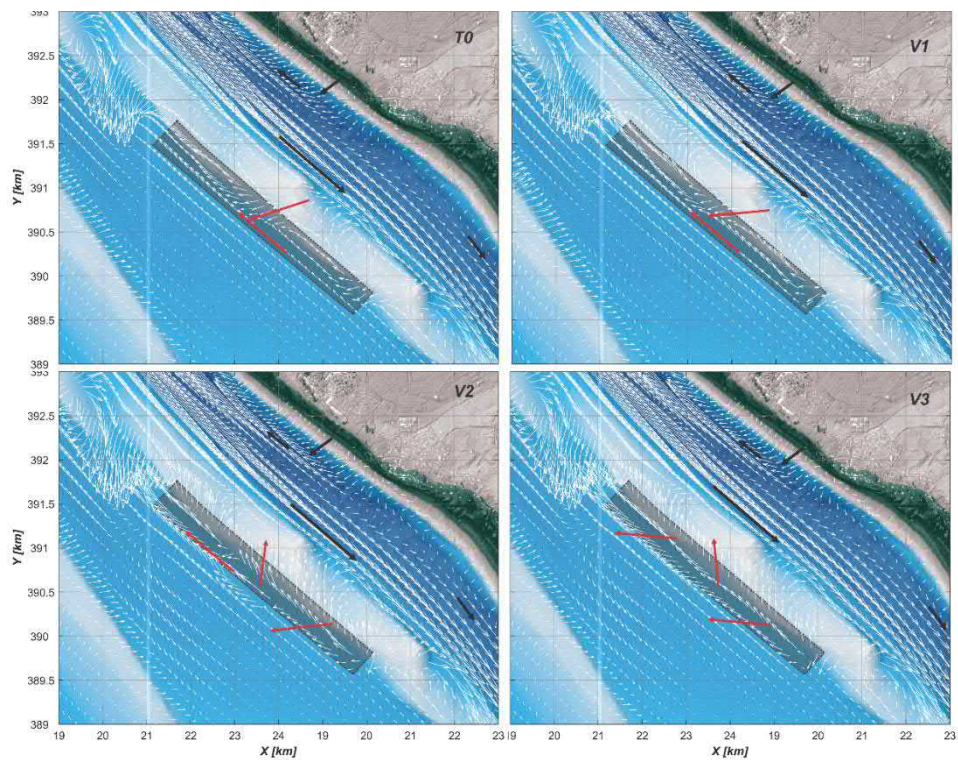
4.2.2 Invloed op de sedimenttransporten

De invloed van de suppletievarianten op de sedimenttransporten is, middels jaargemiddelde transporten, weergegeven in Figuur 4-15 en Figuur 4-16. De verschillen tussen de vier varianten zijn klein. Alleen lokaal lijkt er een kleine verandering in sedimenttransportvector op te treden. De dominante transportvectoren zijn geïllustreerd in Figuur 4-16 met de rode pijlen op de suppletie en de zwarte pijlen in het Oostgat en langs de kust. De transporten langs de kust blijven voor alle varianten een identiek beeld geven aan de T0.

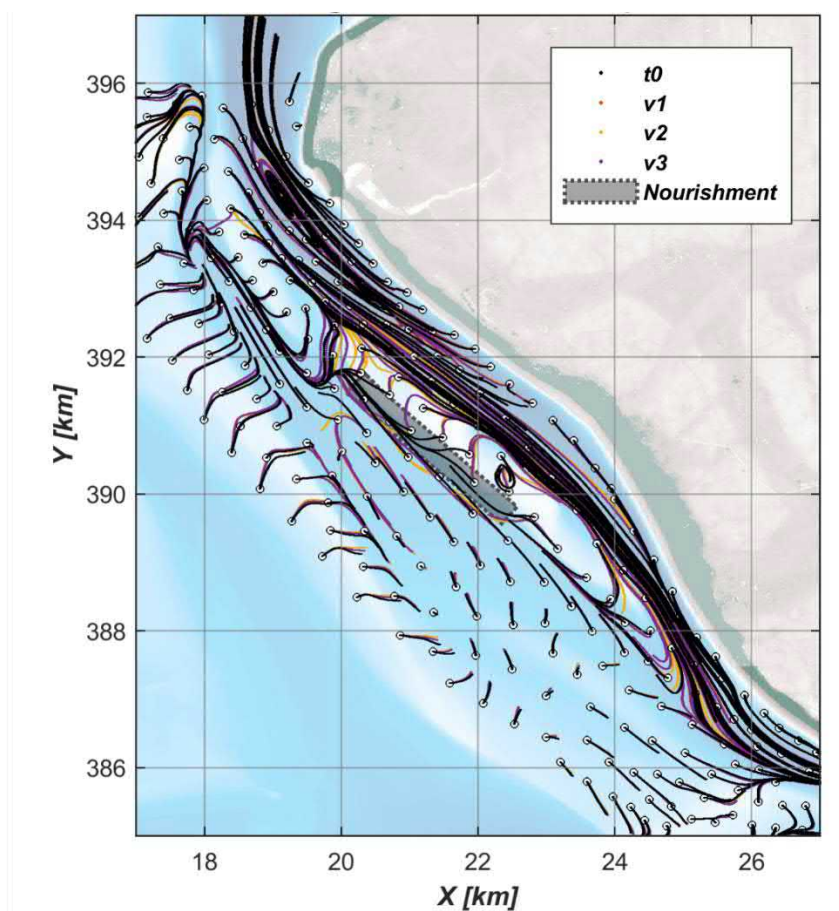
Suppletievarianten V2 en V3 zorgen wel voor een lokale verandering van de transportrichtingen op de suppletielocatie. Door golfbreking op de suppletie worden zowel landwaartse als zeewaartse transporten gegenereerd. Buiten de suppletielocatie zijn geen verschillen te onderscheiden. De resulterende transportpatronen zijn vrijwel identiek (Figuur 4-17). Aanvullende analyses van de suppletievarianten lijken niet nodig. De conclusies op basis van de T0 simulaties lijken ook voor ieder van de suppletievarianten relevant.



Figuur 4-15: Jaarlijks-gemiddeld sediment transport voor de T0 en de drie suppletievarianten.



Figuur 4-16: Jaarlijks-gemiddeld sediment transport voor de T0 en de drie suppletievarianten ingezoomd op het Bankje. De rode pijlen illustreren de dominante transportrichtingen op de suppletie en de zwarte vectoren in het Oostgat.



Figuur 4-17: Totaaloverzicht van de berekende transportpaden voor de verschillende T0 en suppletievarianten.

5 Conclusies & Aanbevelingen

5.1 Conclusies

In deze studie zijn de sedimenttransporten in de kustzone van Walcheren en de invloed van drie varianten van een systeemsuppletie op het Bankje van Zoutelande uitvoerig bestudeerd. Met behulp van Delft3D simulaties gekoppeld aan SedTRAILS is een goed begrip van de werking van het morfologische systeem verkregen en zijn de onderliggende processen geïdentificeerd. Uit deze modellering volgt dat de erosie van de kustlijn samenhangt met de wisselwerking tussen het Oostgat en de kustlijn. De getijstroming door het Oostgat resulteert in een divergentiepunt in sedimenttransport ter hoogte van Zoutelande. Dit divergentiepunt is een mogelijke oorzaak van de structurele verliezen die hier optreden. Op basis van de geobserveerde MKL-volumeveranderingen wordt de terugtrekkende trend in MKL-positie geschat worden op 2 tot 4 m/jaar.

Op basis van de uitgevoerde modellering kan geen direct verband tussen het Bankje van Zoutelande en de kustlijnerosie van Zuidwest-Walcheren worden gelegd. Onder kalme condities zijn de netto sedimenttransporten over het Bankje zelfs zeewaarts gericht. Alleen tijdens hoge golven treedt er transport op vanaf de kruin van het Bankje, het Oostgat in. Echter, het Oostgat vormt een efficiënt afvoerkanaal of transportband. Sediment wordt voornamelijk in zuidelijke richting afgevoerd. Een rechtstreekse uitwisseling met de kustlijn van Walcheren treedt onder geen enkele conditie op.

De geobserveerde kustlijnerosie kan wel een verband hebben met het golfklimaat. Golven zorgen ervoor dat sediment van de kust richting het Oostgat wordt getransporteerd en vandaar snel verder afgevoerd. Het Oostgat vertoont een duidelijke tweedeling. Tussen Zoutelande en Westkapelle wordt sediment in noordelijke richting afgevoerd ten gevolge van een dominante eb-stroming. Ten zuiden van Zoutelande wordt sediment juist oostwaarts afgevoerd richting Vlissingen door een dominante vloedstroming. Zodra sediment in het Oostgat belandt is de uitwisseling met de voorliggende banken of terug richting de kustzone beperkt. Het merendeel van het sediment wordt kustlangs afgevoerd. Het divergentiepunt kan langs de kust opschuiven onder verschillende golfcondities. Het Bankje van Zoutelande heeft slechts een zeer beperkte invloed op het golfklimaat. De afscherming door de kustlijnoriëntatie van Walcheren en golfdissipatie op de voorliggende Vlakte van de Raan zijn hierin dominant. Zelfs onder stormcondities zijn de golven op het Bankje van Zoutelande beperkt waardoor golfbreking op het Bankje vrijwel niet optreedt. De suppletievarianten brengen hierin geen verandering.

De belangrijkste inzichten met betrekking tot de drie suppletievarianten zijn in Tabel 5.1 nader uitgewerkt door benoemen van geïdentificeerde kansen en risico's. De gepresenteerde inzichten zijn geldig voor alle drie varianten. Een belangrijke conclusie is dat geen van de suppletievarianten een significante beïnvloeding van de processen (getij en golven) geeft. Zelfs met een aanleghoogte van 0 m NAP neemt de golfhoogte van de achterliggende kust niet af. Dit geringe effect komt vooral omdat de voorliggende monding al een hele effectieve golfbreker vormt. Alleen lokaal ter plaatse van de suppletie neemt de golfhoogte iets af en worden de lokale sedimenttransporten beïnvloedt. Dit resulteert echter niet in een vergroting van de zandvolumes van de kustzone, een beïnvloeding van de sedimenttransportpaden of een stabilisatie van het Bankje van Zoutelande.

Vanwege de kleine beïnvloeding van de processen door de suppleties zijn ook de risico's beperkt. Een beïnvloeding van het grootschalige systeem is niet waarschijnlijk. Door de geringe

verschillen in sedimenttransporten zal ook sedimenttransport vanaf de suppletie richting de Sardijngeul niet significant toenemen.

Tabel 5.1: Een samenvatting van de kansen en risico's van de suppletievarianten voor het Bankje van Zoutelande.

Kansen	
1. Reductie van golfbelasting op de kust.	Geen waarneembare reductie.
2. Vergroting zandvolumes kustzone door beïnvloeding van de transportpaden.	Geen waarneembaar transport richting de kustzone
3. Langere levensduur dan traditionele strandsuppletie	Aangetoond. Zeer kleine sedimenttransporten vanaf de suppletie waardoor de verliezen beperkt zullen zijn. De suppletie draagt echter niet bij aan het verlengen van de levensduur van de suppleties die uitgevoerd worden langs de kust.
4. Stabilisatie van het Bankje van Zoutelande, reduceren van landwaartse migratie.	Niet aantoonbaar. Zeer kleine effecten op de sedimenttransporten ter plaatse van het Bankje
Risico's	
1. Onverwachte effecten van geul beïnvloeding op het zeegatsysteem	Niet waarschijnlijk
2. Korte levensduur (omdat morfologie te veel afwijkt van de morfologie van het systeem)	Niet aantoonbaar. Er zijn slechts kleine verschillen in sedimenttransporten te onderscheiden. Het is niet waarschijnlijk dat de suppletie een ander gedrag vertoont dan het Bankje van Zoutelande.
3. Vergroten van de sedimenttransporten richting de drempel met Sardijngeul	Niet aantoonbaar
4. Beperkt effect m.b.t. handhaving kustlijn	Aangetoond. Geen waarneembaar effect voor kustlijnhandhaving
5. Beïnvloeding van de omliggende banken.	Geen beïnvloeding aangetoond.

5.2 Aanbevelingen

Dit onderzoek laat zien dat gradiënten in de getijgedreven transporten dominant zijn voor kustlijnerosie. Als de erosieve gradiënt beïnvloed kan worden via de getijstrooming is dit een kans voor het kustbeheer. Verandering in de getijstrooming kan door natuurlijke processen optreden, bijv. de verplaatsing van banken en geulen, maar ook door menselijke ingrepen zoals bijv. geulverleggingen of dammen. Onderzoek naar de gevoeligheid van de gradiënten kan aldus interessante uitkomsten opleveren.

In deze studie is SedTRAILS toegepast om de sedimenttransportpatronen in de monding van de Westerschelde (beperkt) en rond het Bankje van Zoutelande (uitgebreid) in kaart te brengen. De SedTRAILS resultaten geven hierbij veel aanvullend inzicht in de dominante processen die hier spelen. Deze inzichten zijn niet te verkrijgen door alleen de residuele transporten of de instantane transporten te analyseren. Het uitvoeren van soortgelijke analyses in complexe gebieden wordt aanbevolen voor toekomstig onderzoek.

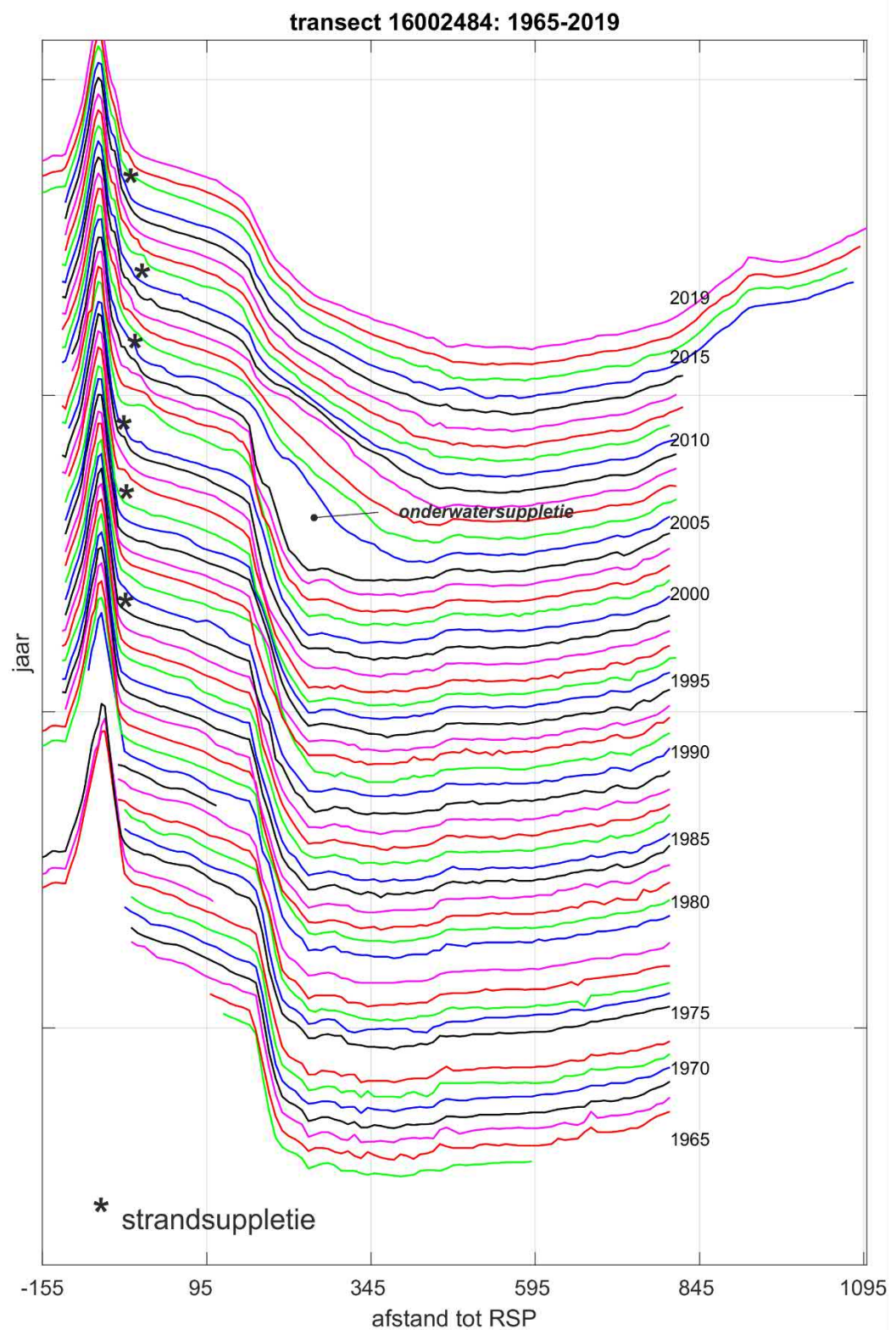
6 Referenties

- Bolle, A., Wang, ZB, Amos, De Ronde, J. (2010). The Influence of Changes in Tidal Asymmetry on Residual Sediment Transport in the Western Scheldt, Continental Shelf Research, doi:10.1016/j.csr.2010.03.001.
- Elias, E., & Pearson, S. (2020). *SedTRAILS - Sediment TRANsport vizualization & Lagrangian Simulator*. Rapport 11205236-003-ZKS-0002, Deltares, Nederland.
- Elias, E.P.L. en Spek, A.J.F. van der, 2015, Uitwerking sedimentbudget van de Westerscheldemonding, Deltares 1210301-012
- Elias, E.P.L., Spek, A.J.F. van der, Lazar, M., 2016, The 'Voordelta', the contiguous ebb-tidal deltas in the SW Netherlands: large-scale morphological changes and sediment budget 1965–2013; impacts of large-scale engineering, Netherlands Journal of Geosciences, Geologie en Mijnbouw, <https://doi.org/10.1017/njg.2016.37>.
- Lazar, M. (2017). Advies kustfundamentsuppleties KLZ tav baggerwerken Nieuwe Sluis Terneuzen (memo).
- Lazar, M., Elias, E., Van der Spek, A., 2017, Coastal Maintenance and Management of the "Voordelta", The contiguous ebb-tidal deltas in the SW Netherlands, Coastal Dynamics, Paper No. 206
- Lesser, G. R., J. A. Roelvink, J. A. T. M. Van Kester, and G. S. Stelling (2004), Development and validation of a three-dimensional morphological model, Coastal Eng., 51, 883–915, doi:10.1016/j.coastaleng.2004.07.014
- Mastbergen, D en Nederhoff, K (2018). Beheerbibliotheek Walcheren en Noord-Beveland/Veerse Dam. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning. Rapport 11202190-000-0004, Deltares, Delft, 200 p.
- Gerritsen, F., de Jong, H., 1983. Stabiliteit van doorstroomprofielen in de Westerschelde. Report WWKZ-83.V008. Rijkswaterstaat adviesdienst Vlissingen, Vlissingen, 36 pp. (in Dutch)
- Haecon (2006). Actualisatie van de zandbalans van de Zee- en Westerschelde. Rapport 1249760008/lvp.
- Pluis, S. (2020). Rekenontwerpen systeemsuppletie Bankje van Zoutelande t.b.v. KPP B&O onderzoek. Memo Rijkswaterstaat WVL, 8p.
- Sha, L.P., en J.H. van den Berg, 1993. Variation in ebb-delta geometry along the coast of the Netherlands and the German Bight. J. Coastal Research, 9, 3: 730-746.
- Shore Protection Manual. (1984). CERC, Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.
- Steijn, R.C., van der Spek, A.J.F. (2005). Mogelijkheden voor geulwandversterking of verlegging Oostgat/Sardijngeul. Verslag van bureaustudie. Rapport Alkyon A1431.

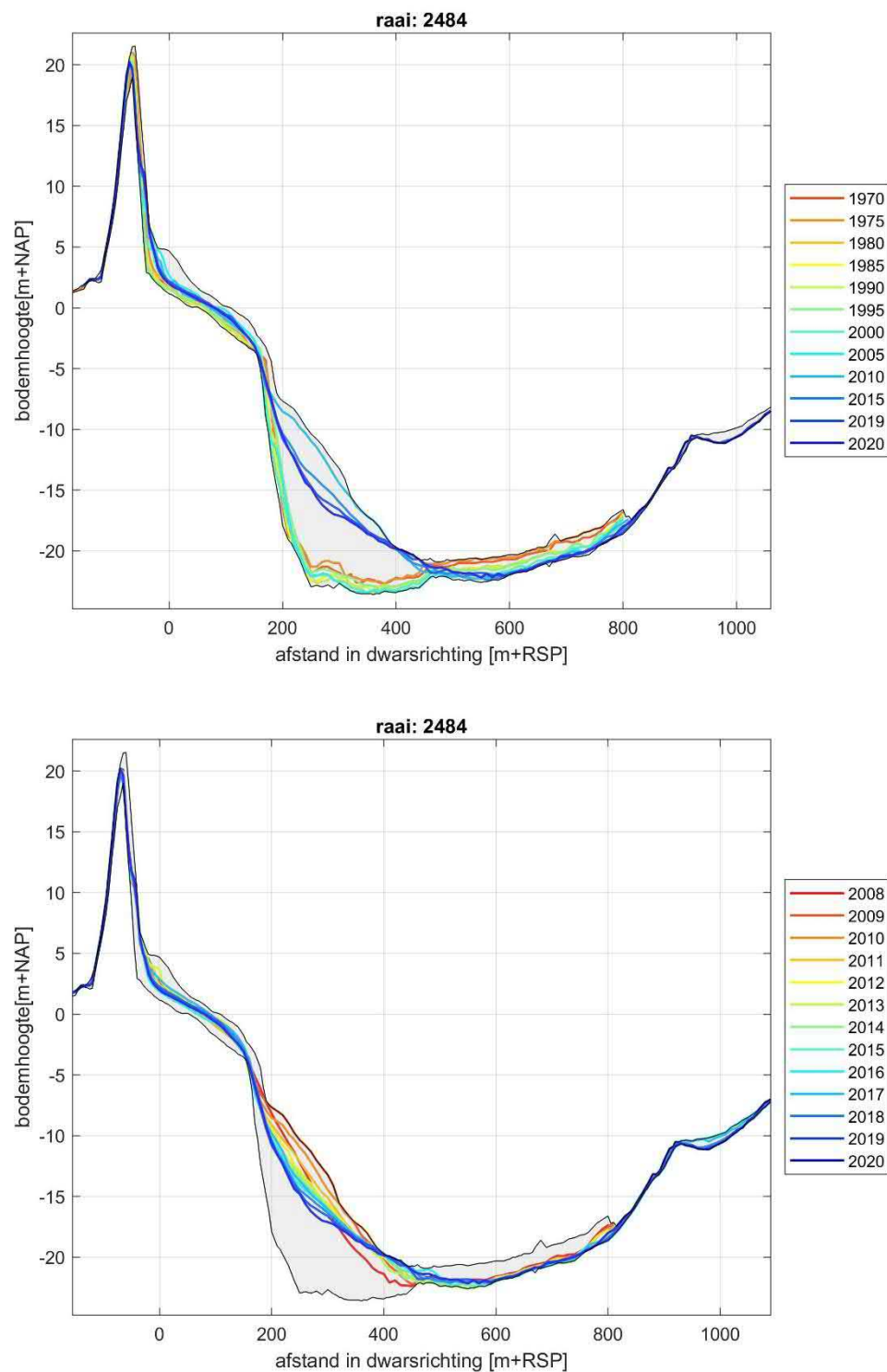
- Spek, A.J.F. van der, 1997. De geologische opbouw van de ondergrond van het mondingsgebied van de Westerschelde en de rol hiervan in de morfologische ontwikkeling. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, rapport NITG 97-284-B.
- Van Rijn, L. (2007). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 649:667.
- Van Weerdenburg, R., Van der Werf, J., (2020). Transportpaden in de Schelde-monding. SedTRAILS modellering ter voorbereiding op pilotsuppletie Schelde-monding. Rapport, Deltares, Delft, 46 p.
- Verhagen, H.J. en Van Rossum, H. (1989) Technisch Rapport 12, Strandhoofden en Paalrijen, Evaluatie van hun werking, Rijkswaterstaat
- 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.
- Bolle, A., Wang, ZB, Amos, De Ronde, J. (2010). The Influence of Changes in Tidal Asymmetry on Residual Sediment Transport in the Western Scheldt, Continental Shelf Research, doi:10.1016/j.csr.2010.03.001.

A Kustindicatoren

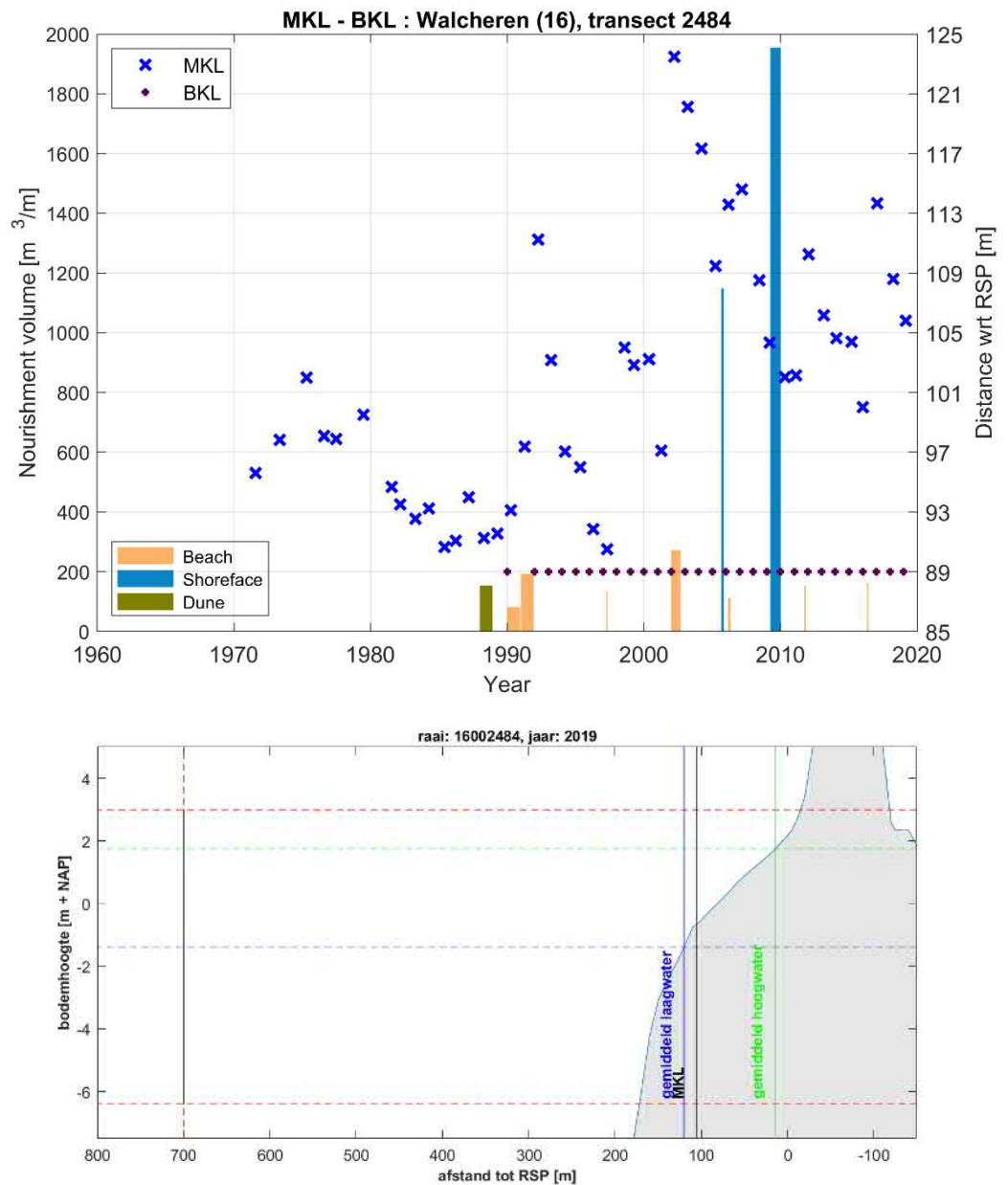
A.1 Raai 2484



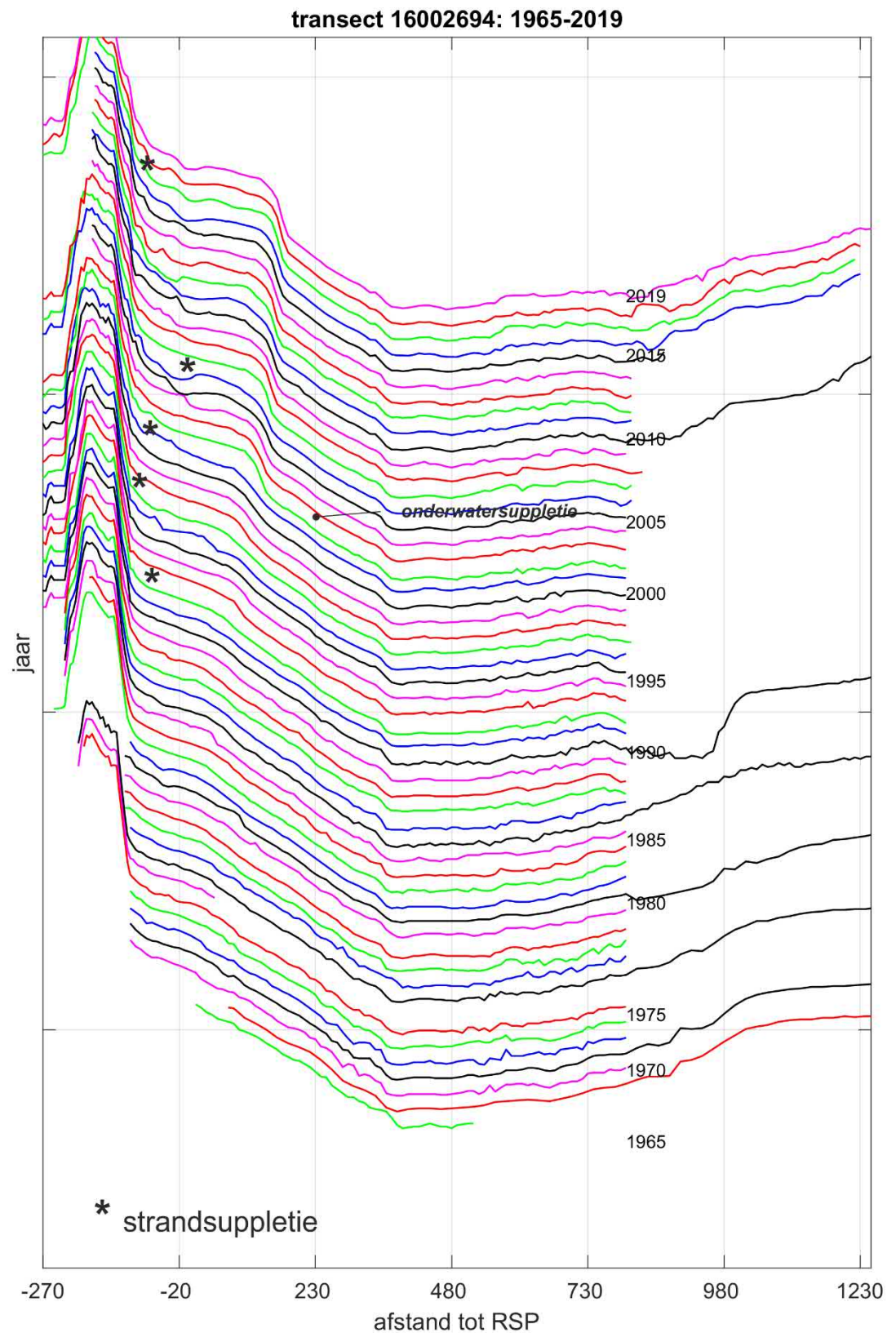
Figuur A-1: Een overzicht van de profielontwikkeling van raai 2484.



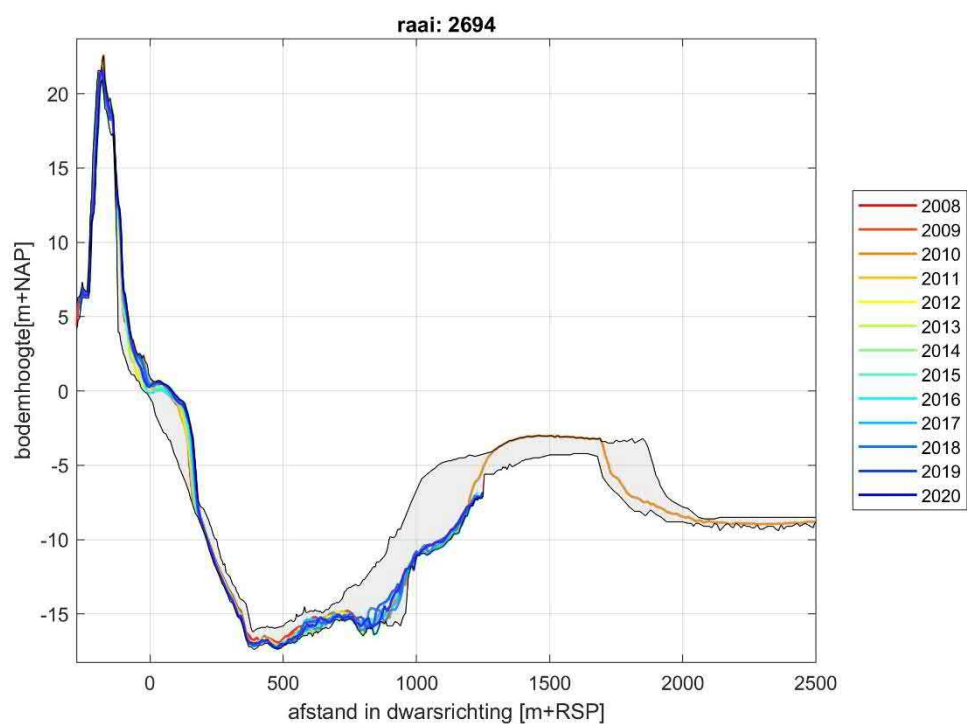
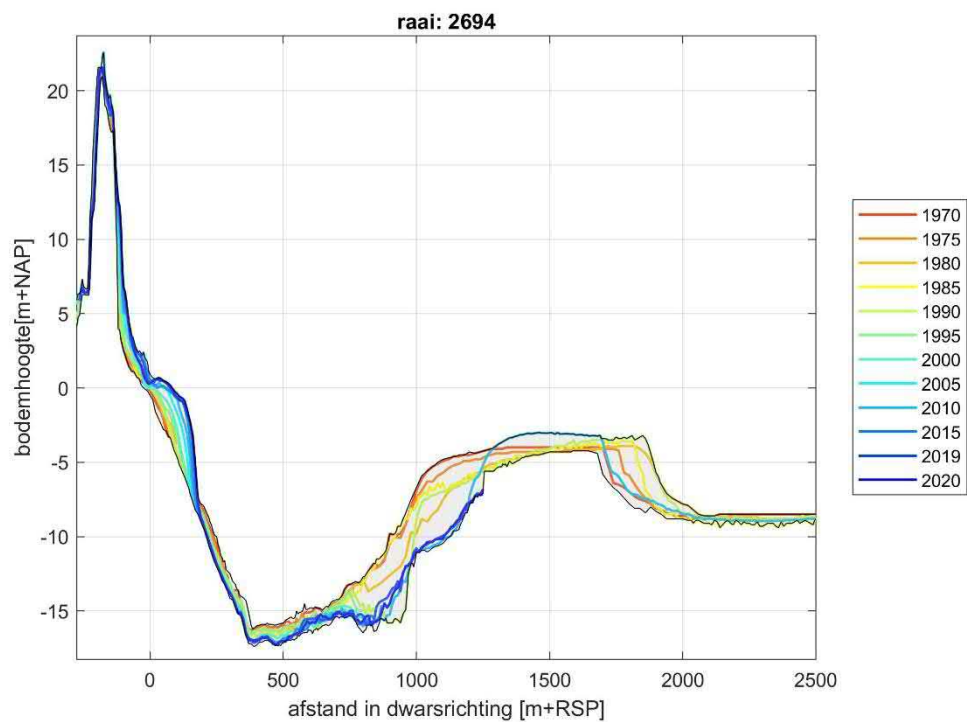
Figuur A-2: Gemeten dwarsprofiel van raai 2484 over de periode 1970-2020 in 5-jaarlijks interval (boven) en over de periode 2008-2020 in jaarlijks interval (onder). Het grijze vlak geeft de omhullende over alle metingen.



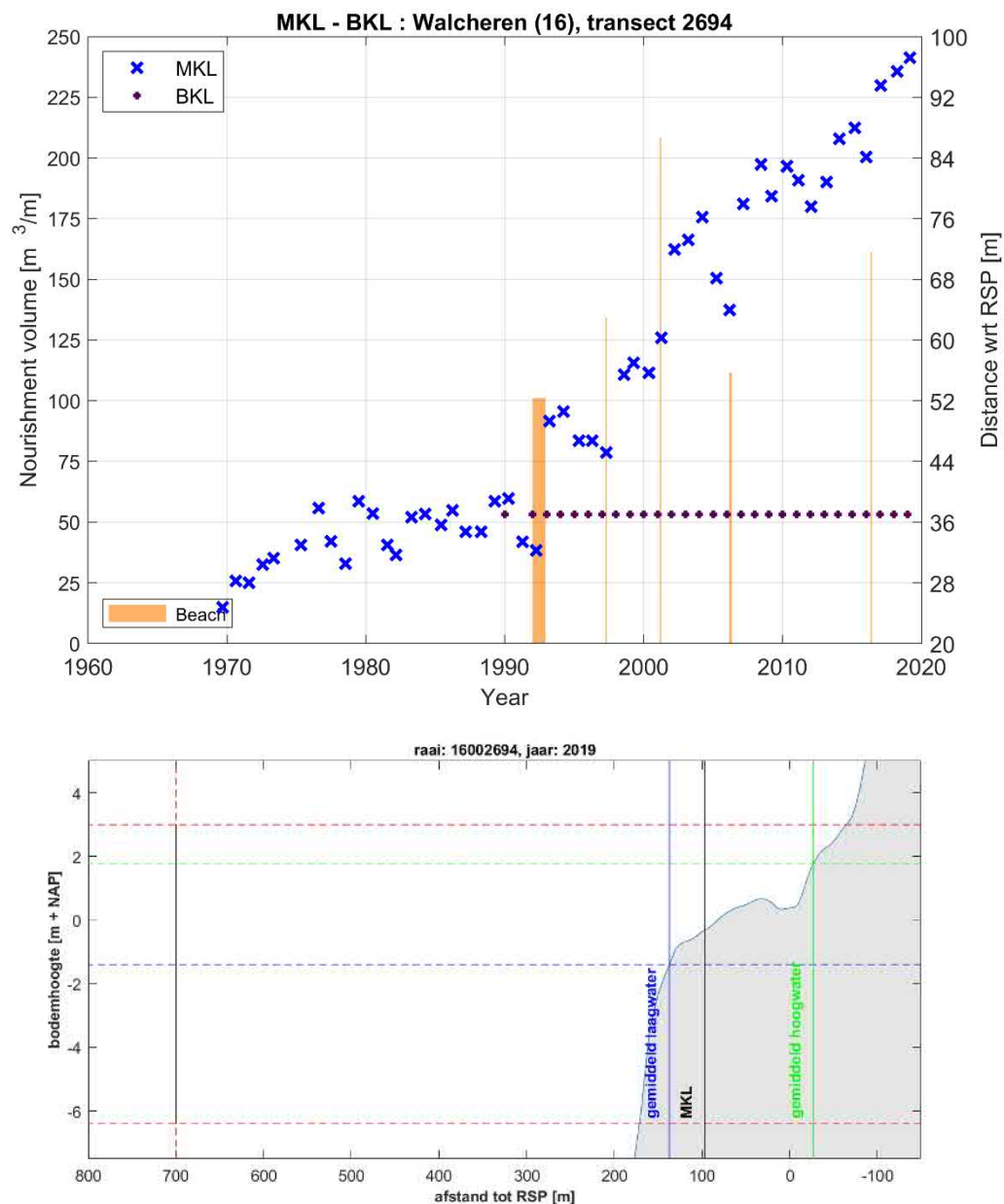
Figuur A-3 (boven): Ontwikkeling van de MKL t.o.v. BKL en suppletievolumes. Onder: overzicht van de rekenschijf en indicatoren in het 2019 dwarsprofiel.



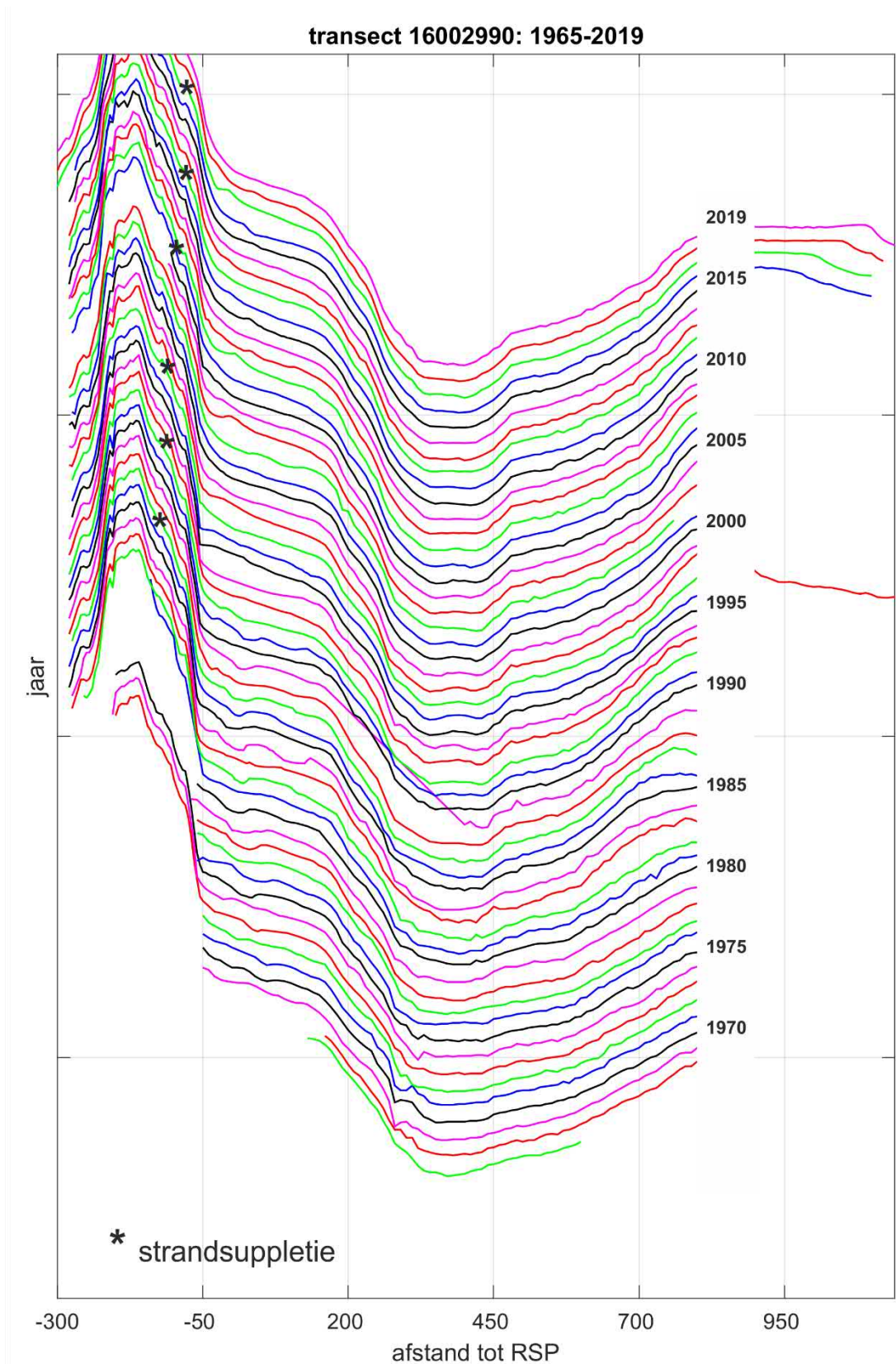
Figuur A-4: Een overzicht van de profielontwikkeling van raai 2484.



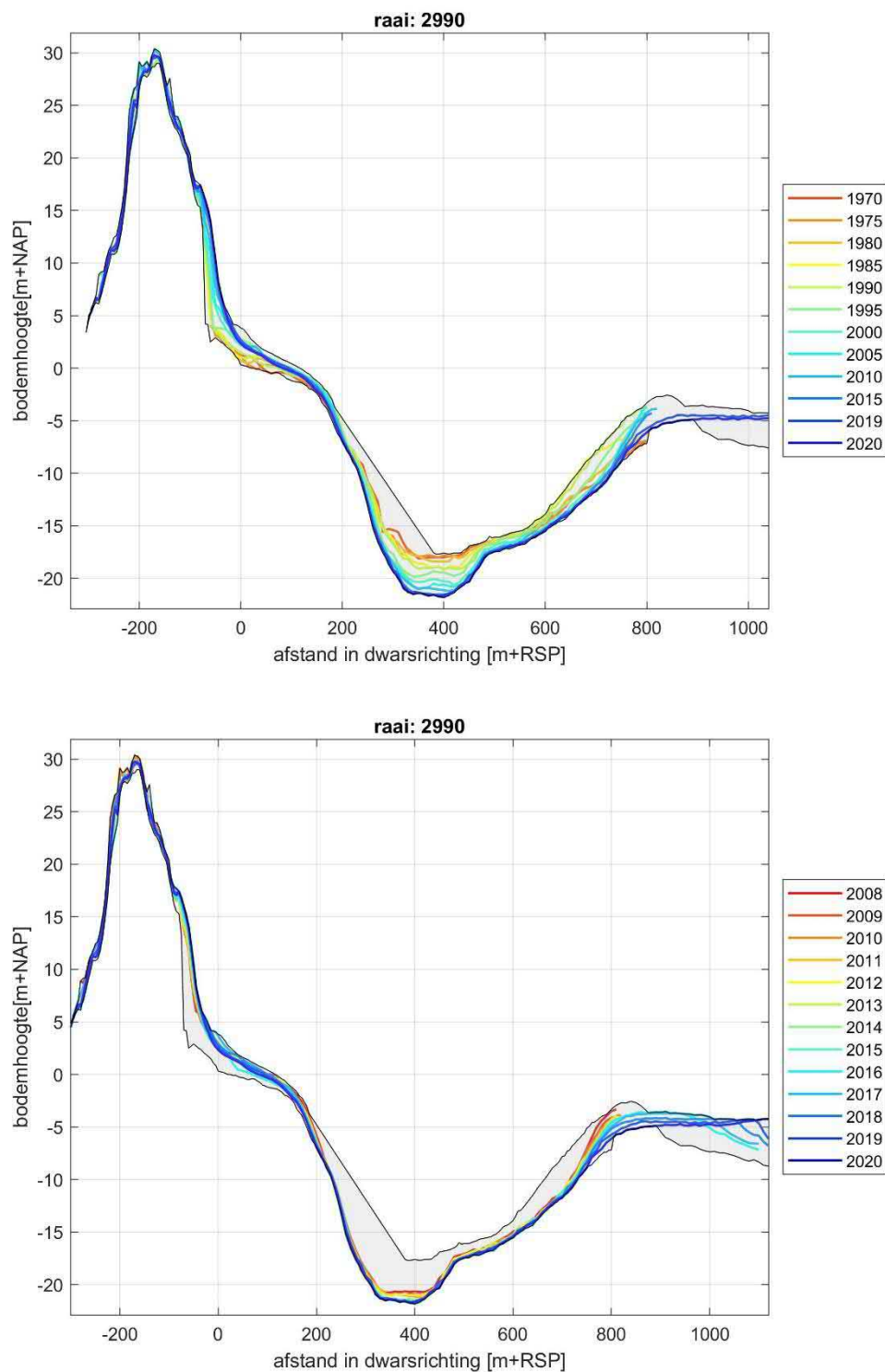
Figuur A-5: Gemeten dwarsprofiel van raai 2484 over de periode 1970-2020 in 5-jaarlijks interval (boven) en over de periode 2008-2020 in jaarlijks interval (onder). Het grijze vlak geeft de omhullende over alle metingen.



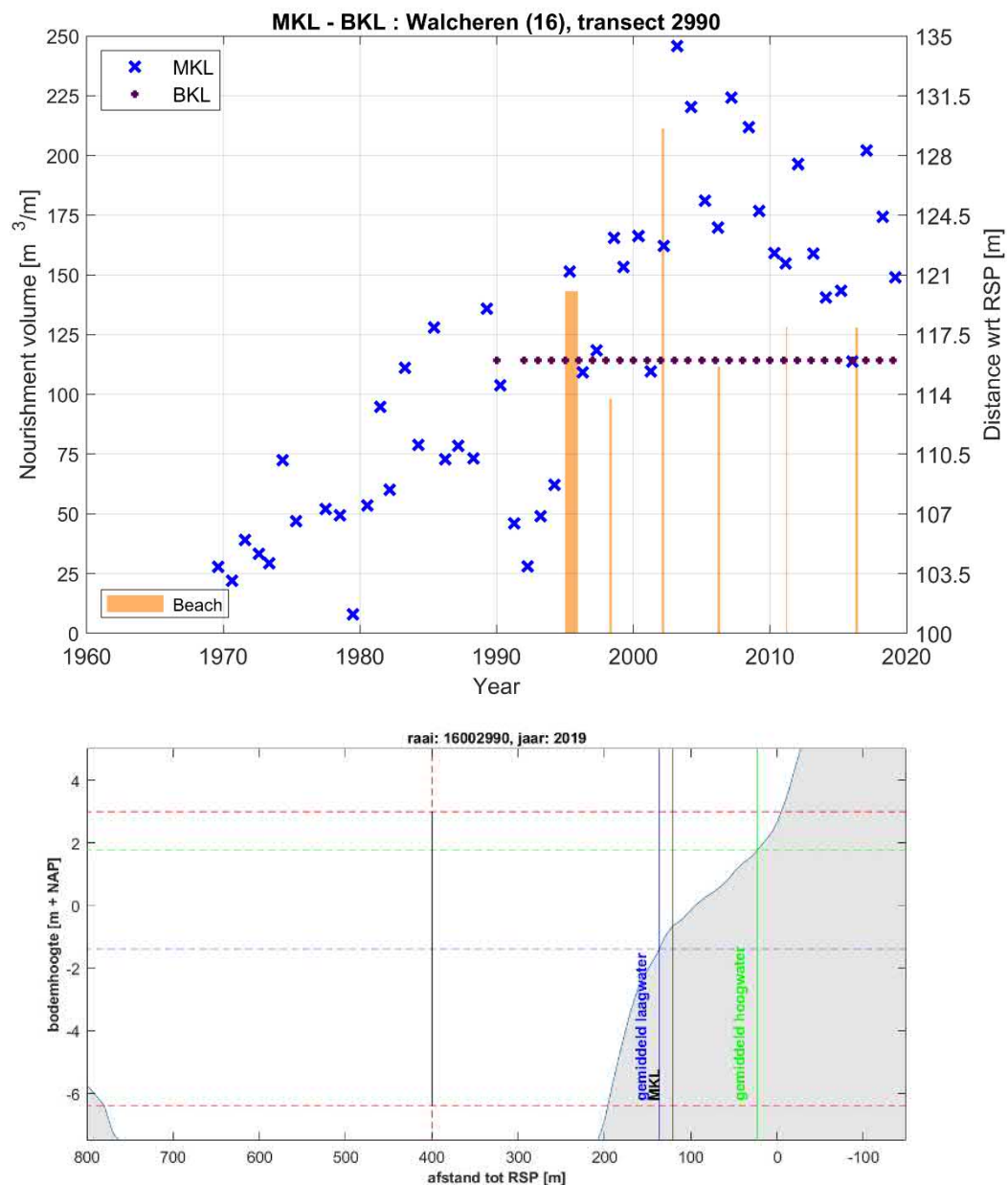
Figuur A-6 (boven): Ontwikkeling van de MKL t.o.v. BKL en suppletievolumes. Onder: overzicht van de rekenschijf en indicatoren in het 2019 dwarsprofiel.



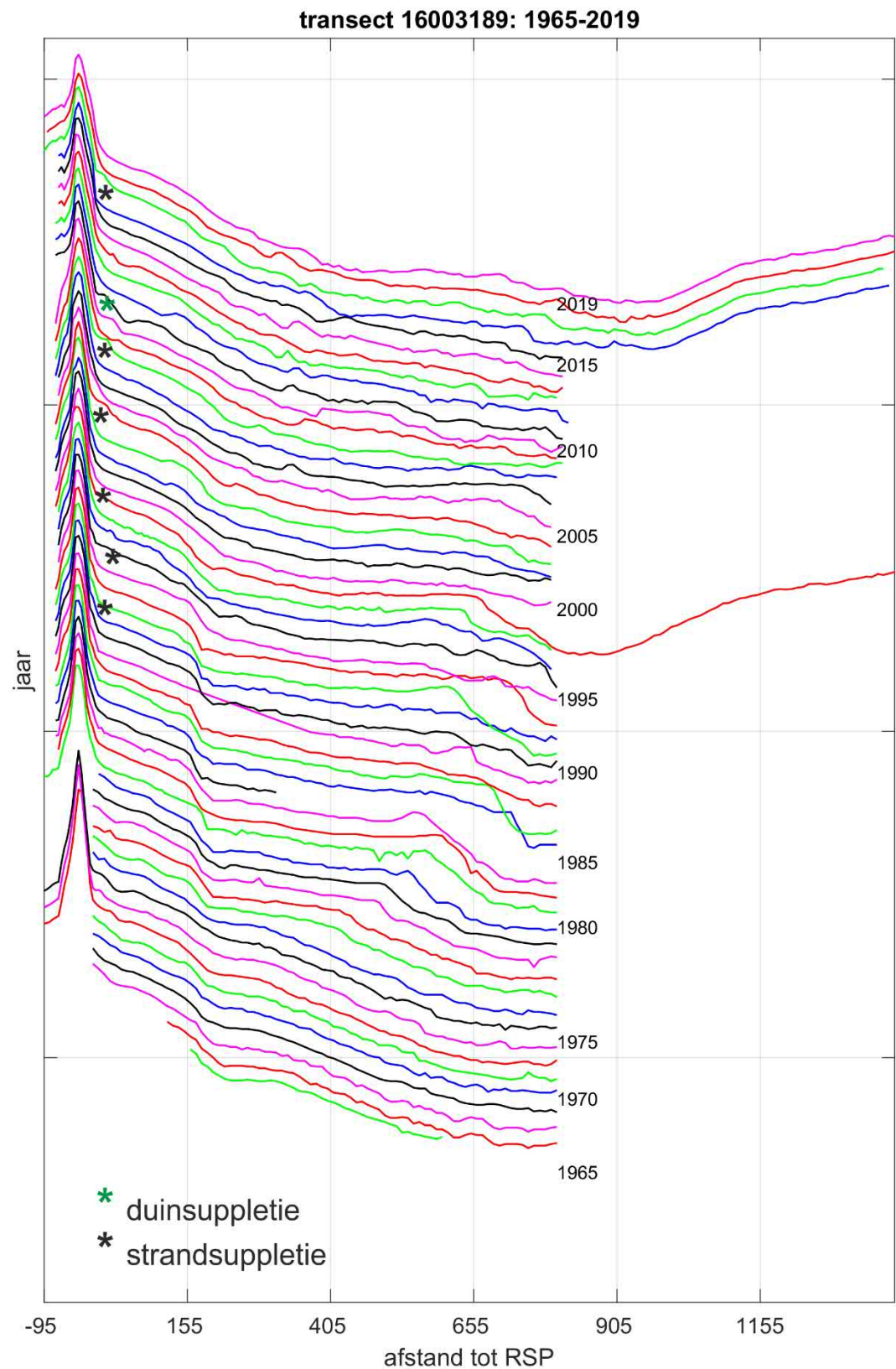
Figuur A-7: Een overzicht van de profielontwikkeling van raai 2990.



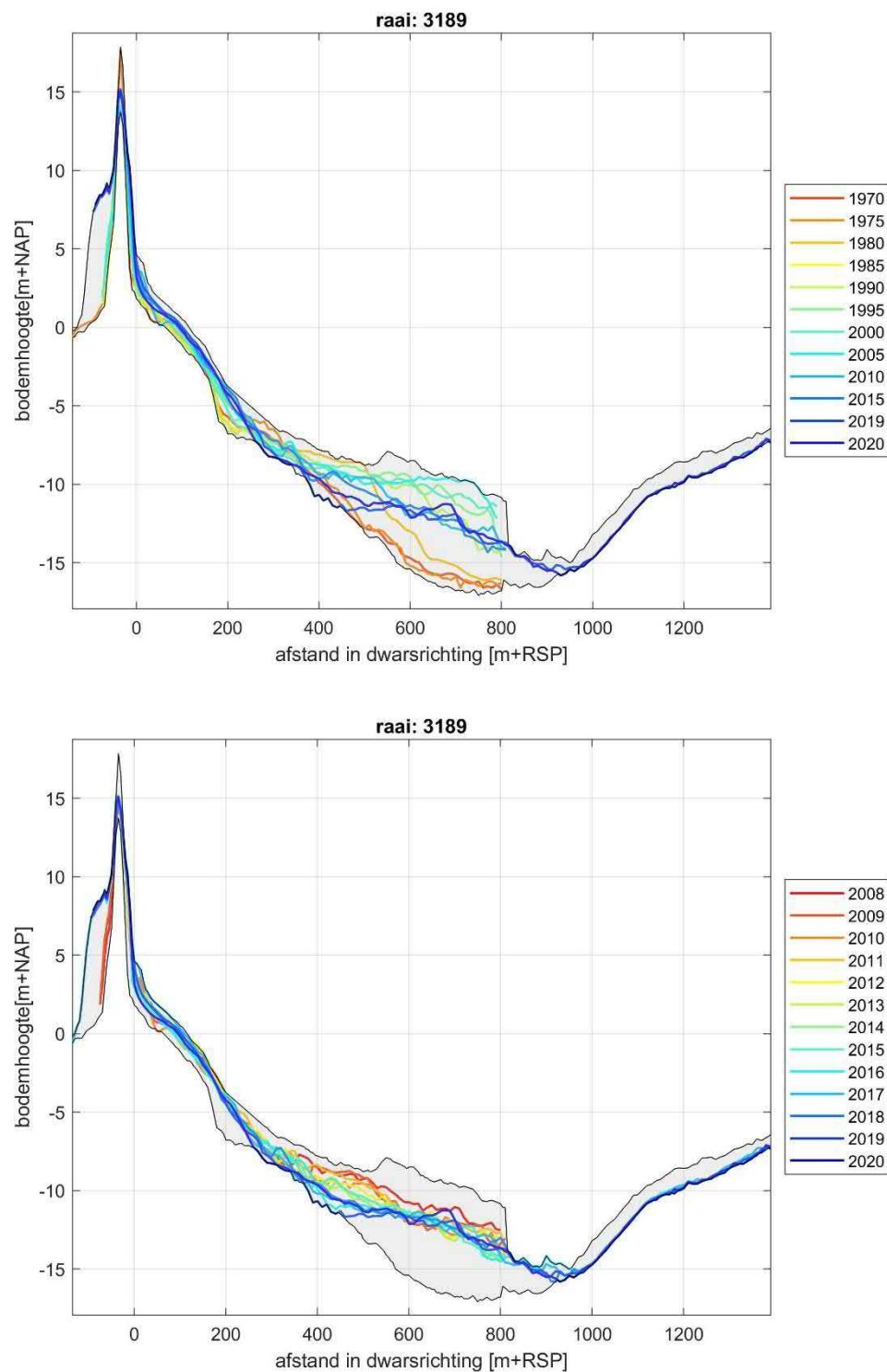
Figuur A-8: Gemeten dwarsprofiel van raai 2990 over de periode 1970-2020 in 5-jaarlijks interval (boven) en over de periode 2008-2020 in jaarlijks interval (onder). Het grijze vlak geeft de omhullende over alle metingen. In dit figuur lijkt de bovengrens onjuist door een onnauwkeurige meting in 1989.



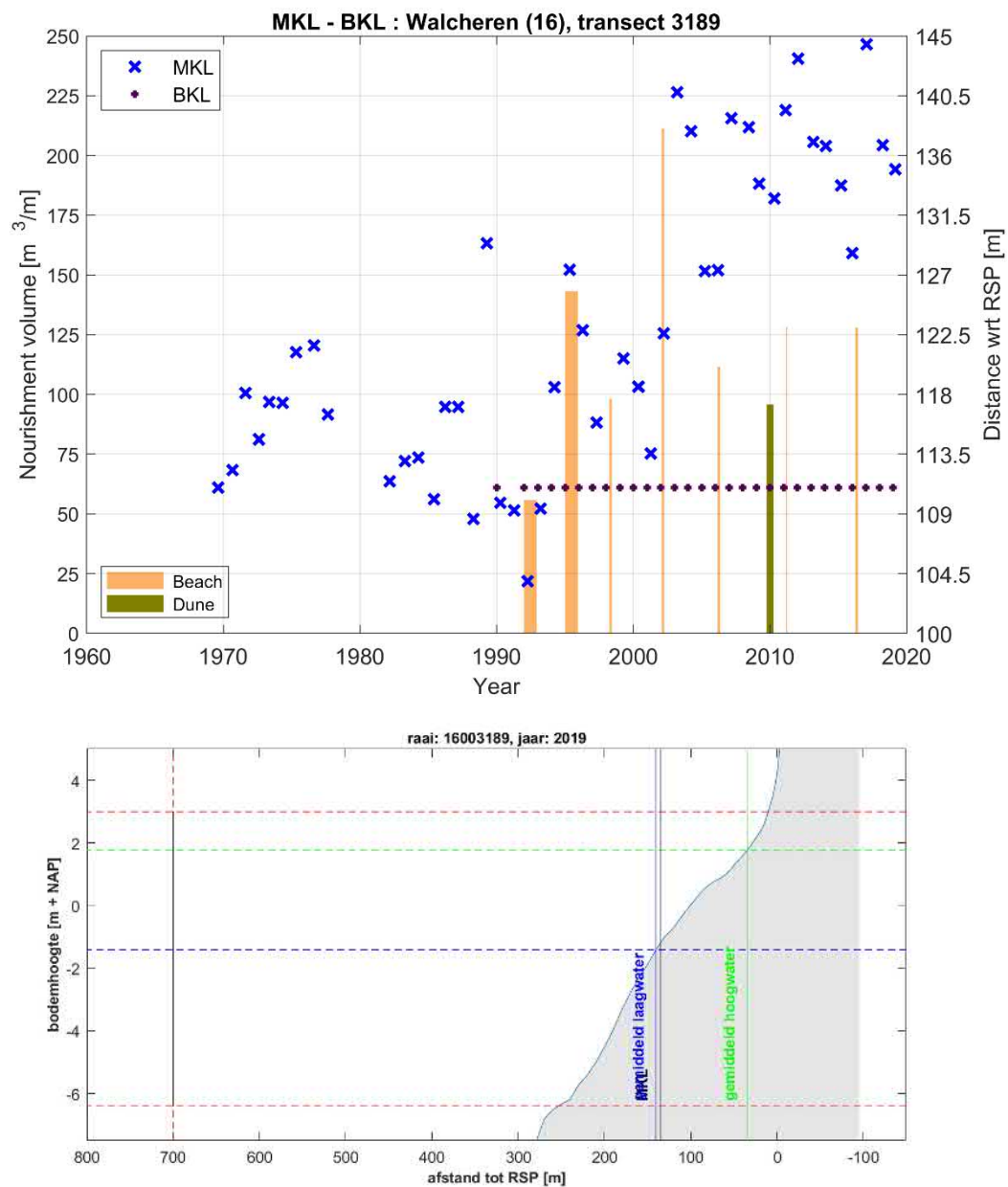
Figuur A-9 (boven): Ontwikkeling van de MKL t.o.v. BKL en suppletievolumes. Onder: overzicht van de rekenschijf en indicatoren in het 2019 dwarsprofiel.



Figuur A-10: Een overzicht van de profielontwikkeling van raai 3189.



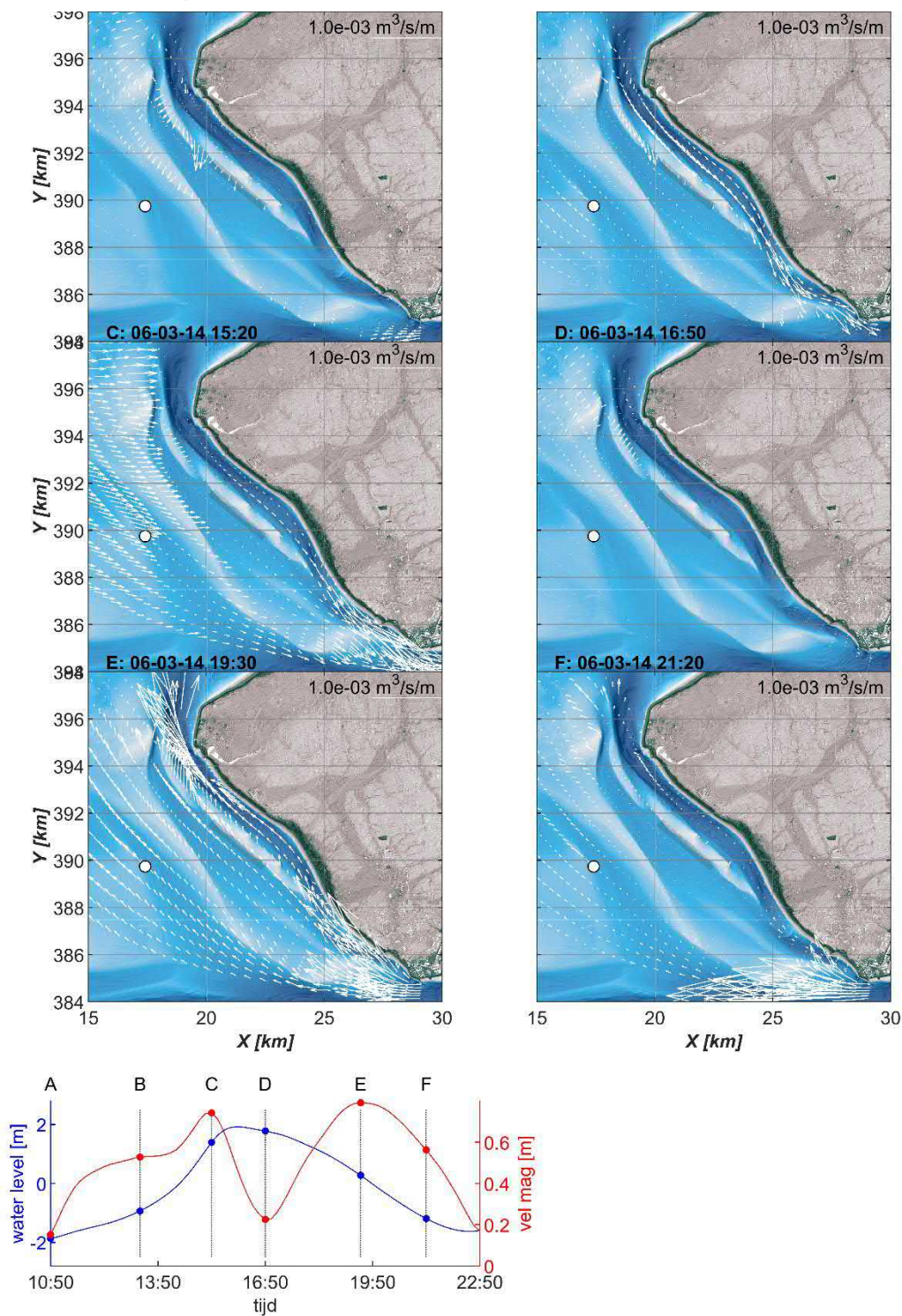
Figuur A-11: Gemeten dwarsprofiel van raai 3189 over de periode 1970-2020 in 5-jaarlijks interval (boven) en over de periode 2008-2020 in jaarlijks interval (onder).



Figuur A-12 (boven): Ontwikkeling van de MKL t.o.v. BKL en suppletievolumes. Onder: overzicht van de rekenschijf en indicatoren in het 2019 dwarsprofiel.

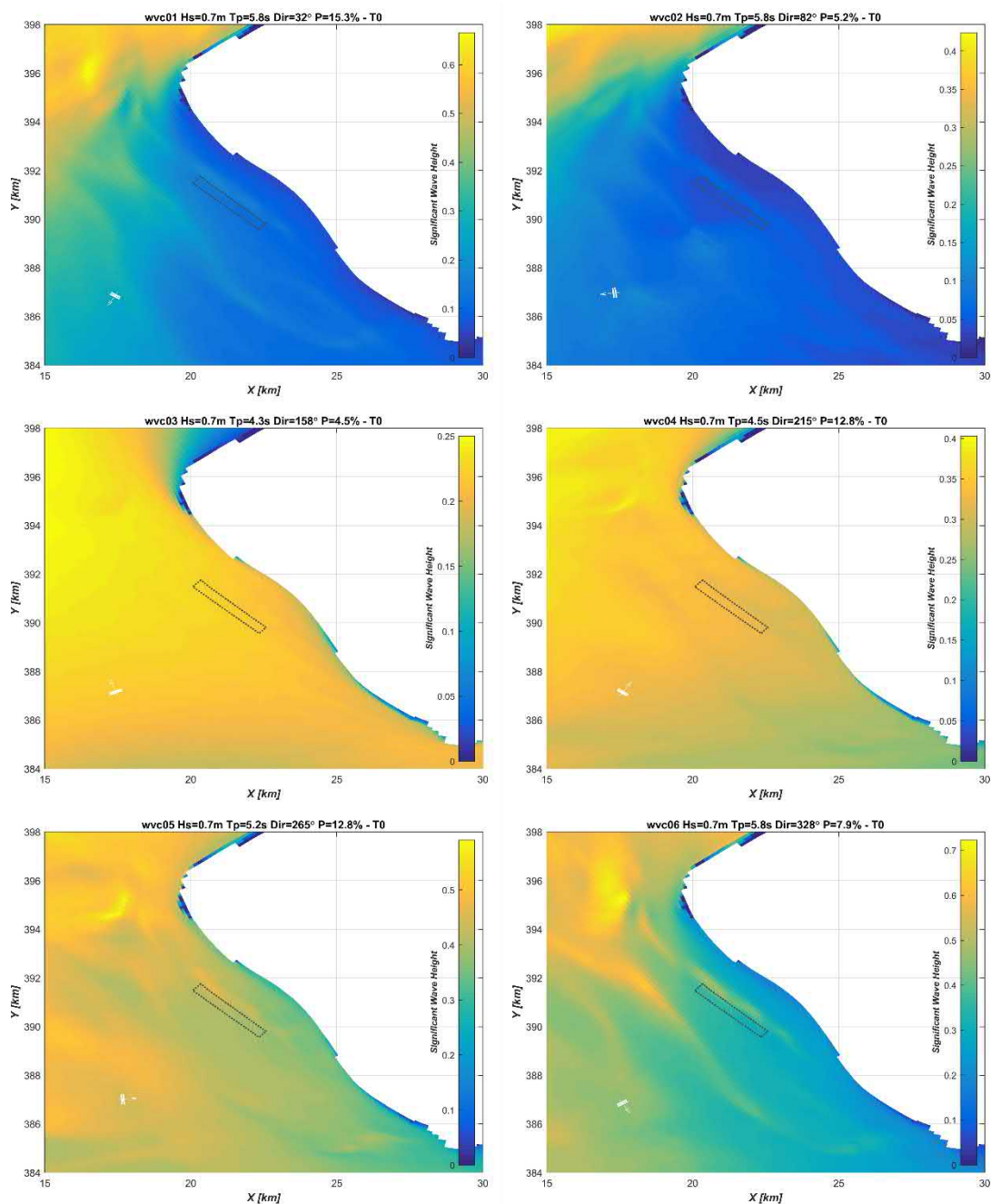
B Modelresults T0

B.1 Instantane transporten

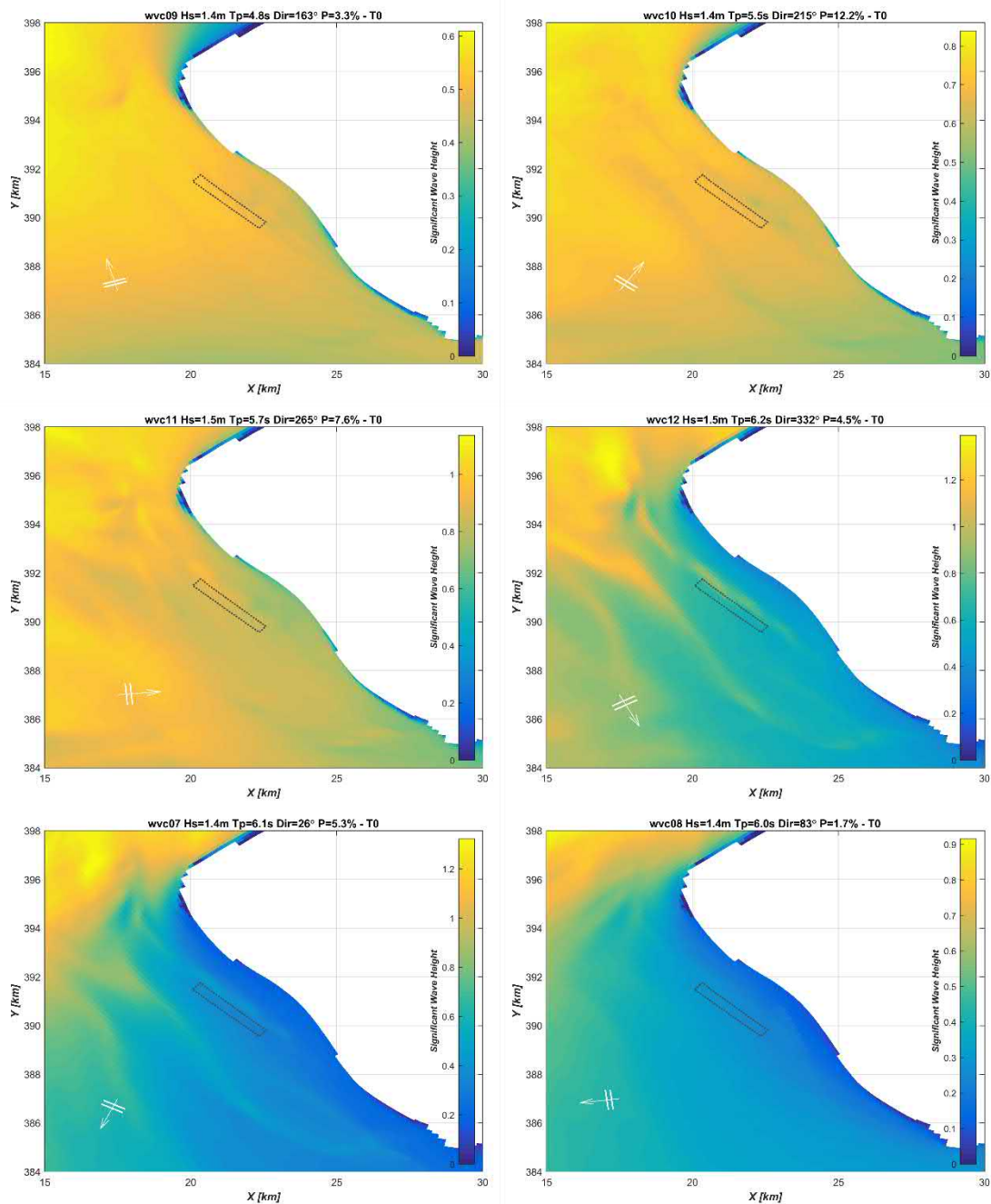


Figuur B-1: Enkele karakteristieke snapshots van de instantane transporten in het zeegat van Texel op basis van de T0 simulatie voor jaarlijks gemiddelde condities (getij en golven).

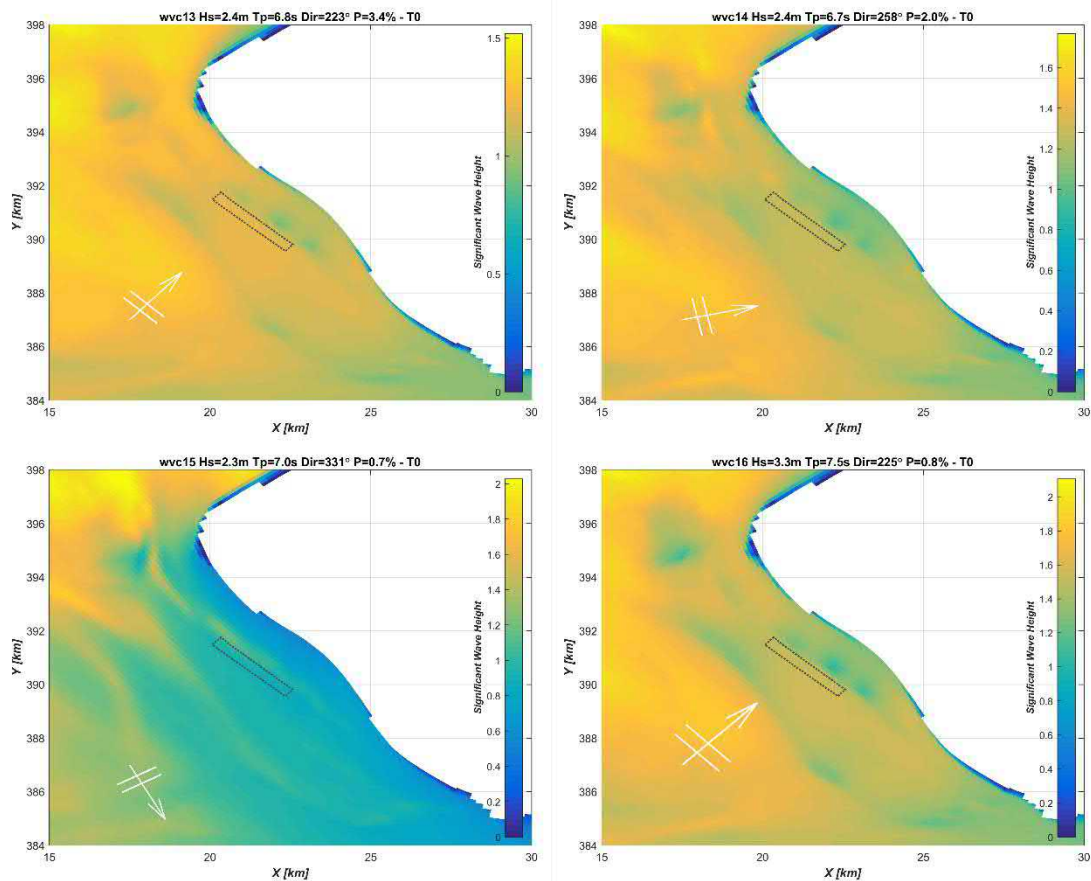
B.2 Waves



Figuur B-2: Een overzicht van de getij-gemiddelde golfhoogte voor golfcondities 1-12.



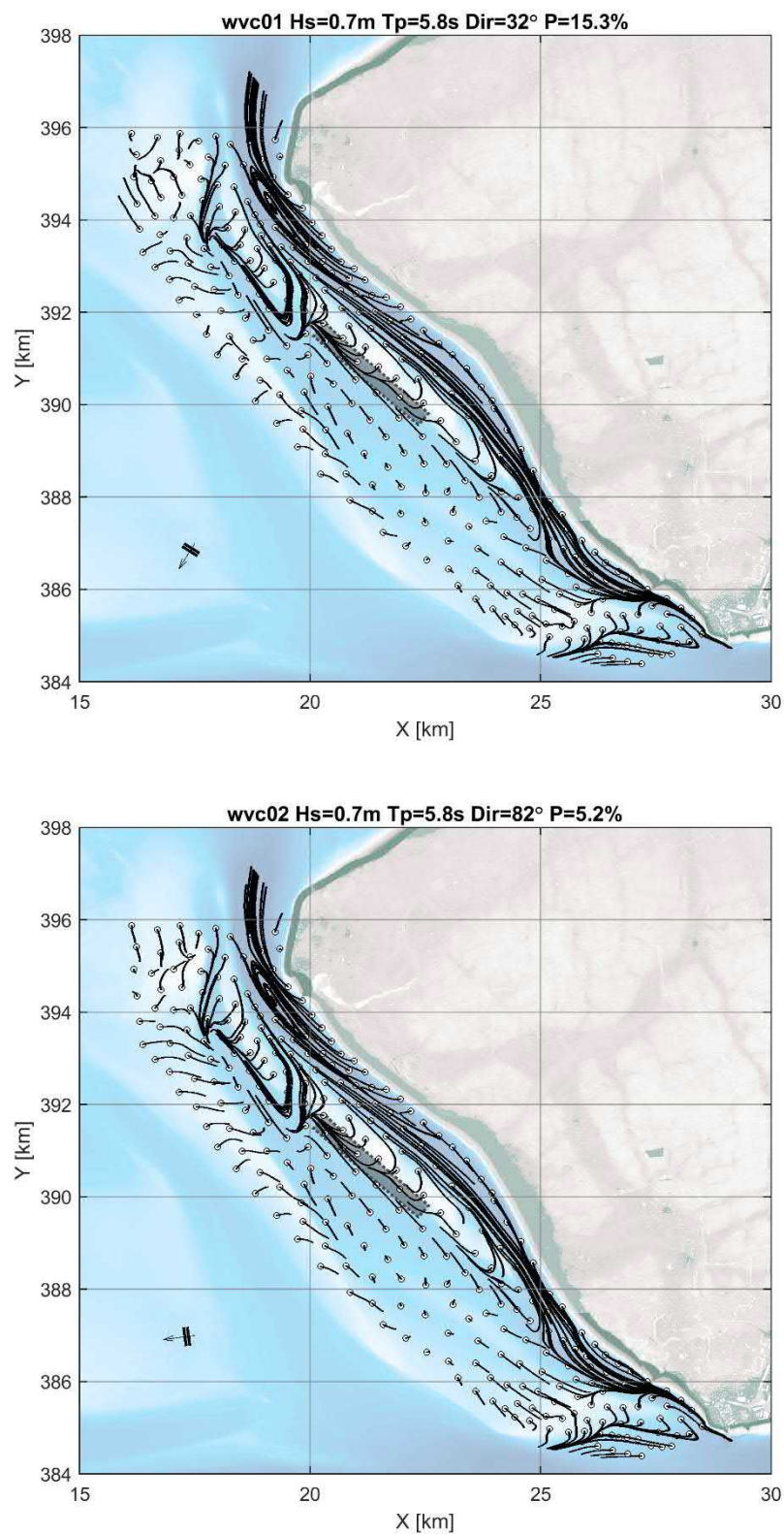
Figuur B-3: Een overzicht van de getij-gemiddelde golfhoogte voor golfcondities 7-12.



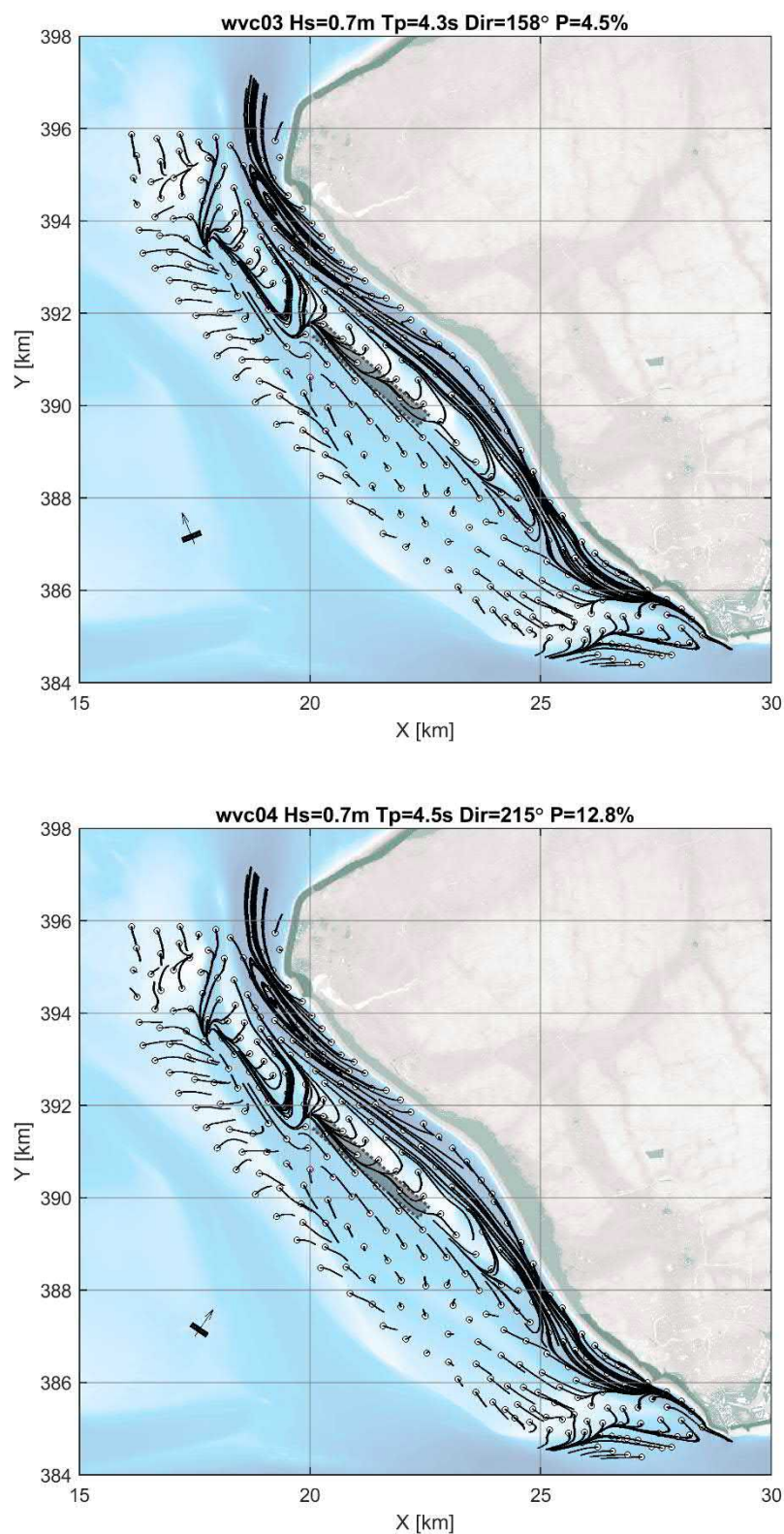
Figuur B-4: Een overzicht van de getij-gemiddelde golfhoogte voor golfcondities 13-16.

B.3 SedTRAILS

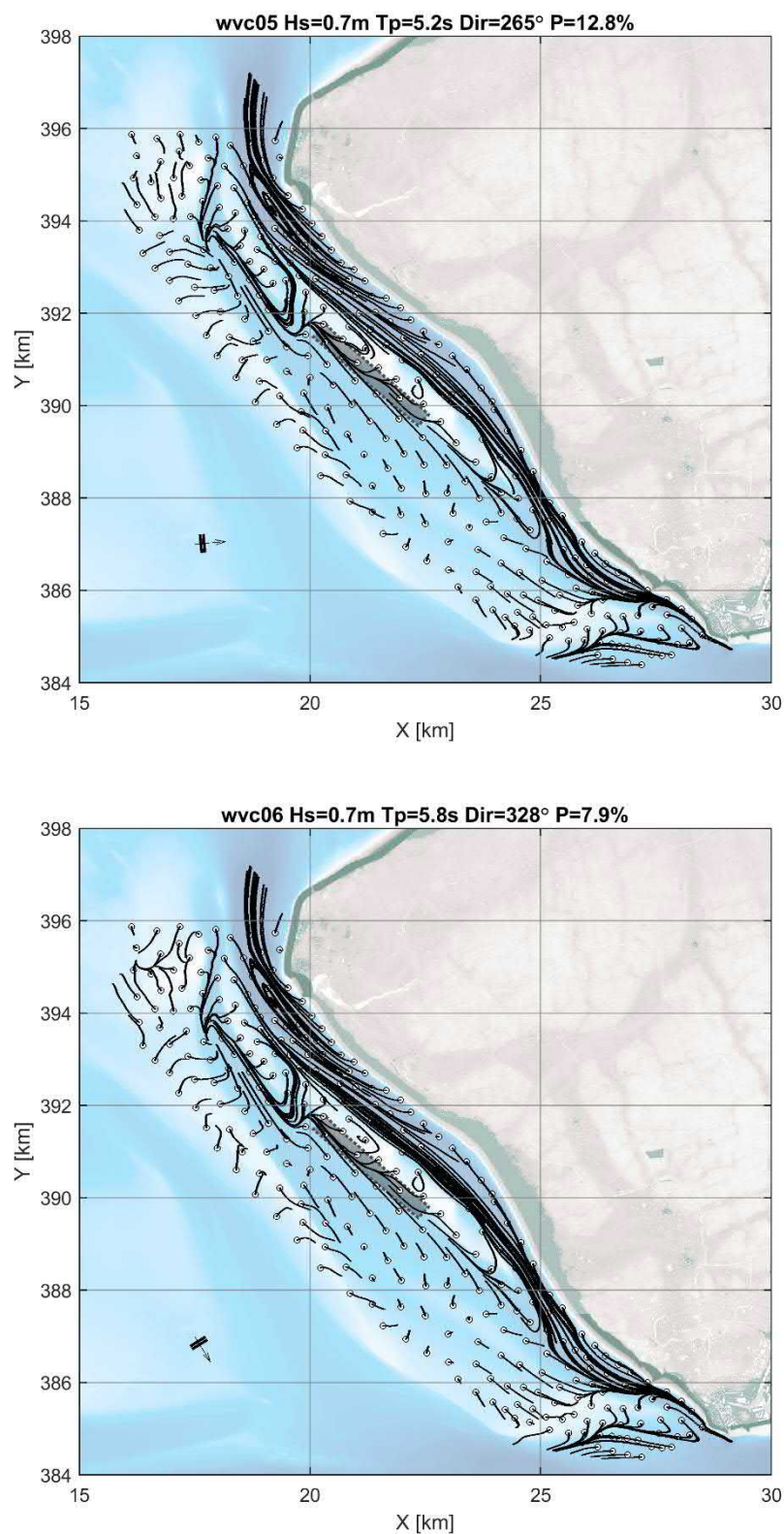
B.3.1 Transportpaden per golfconditie



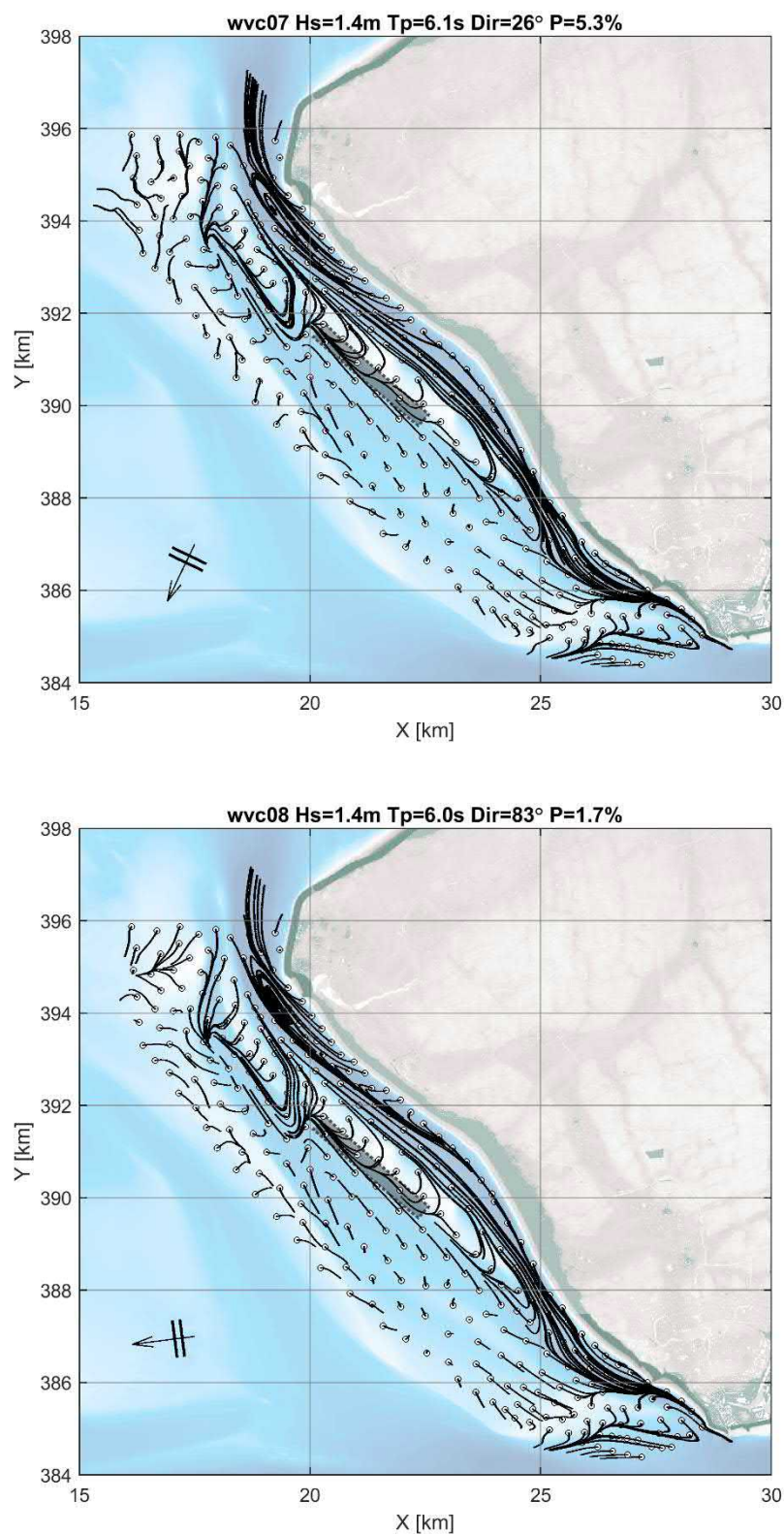
Figuur B-5: Een overzicht van de sedimenttransportpatronen voor golfconditie 1 en 2.



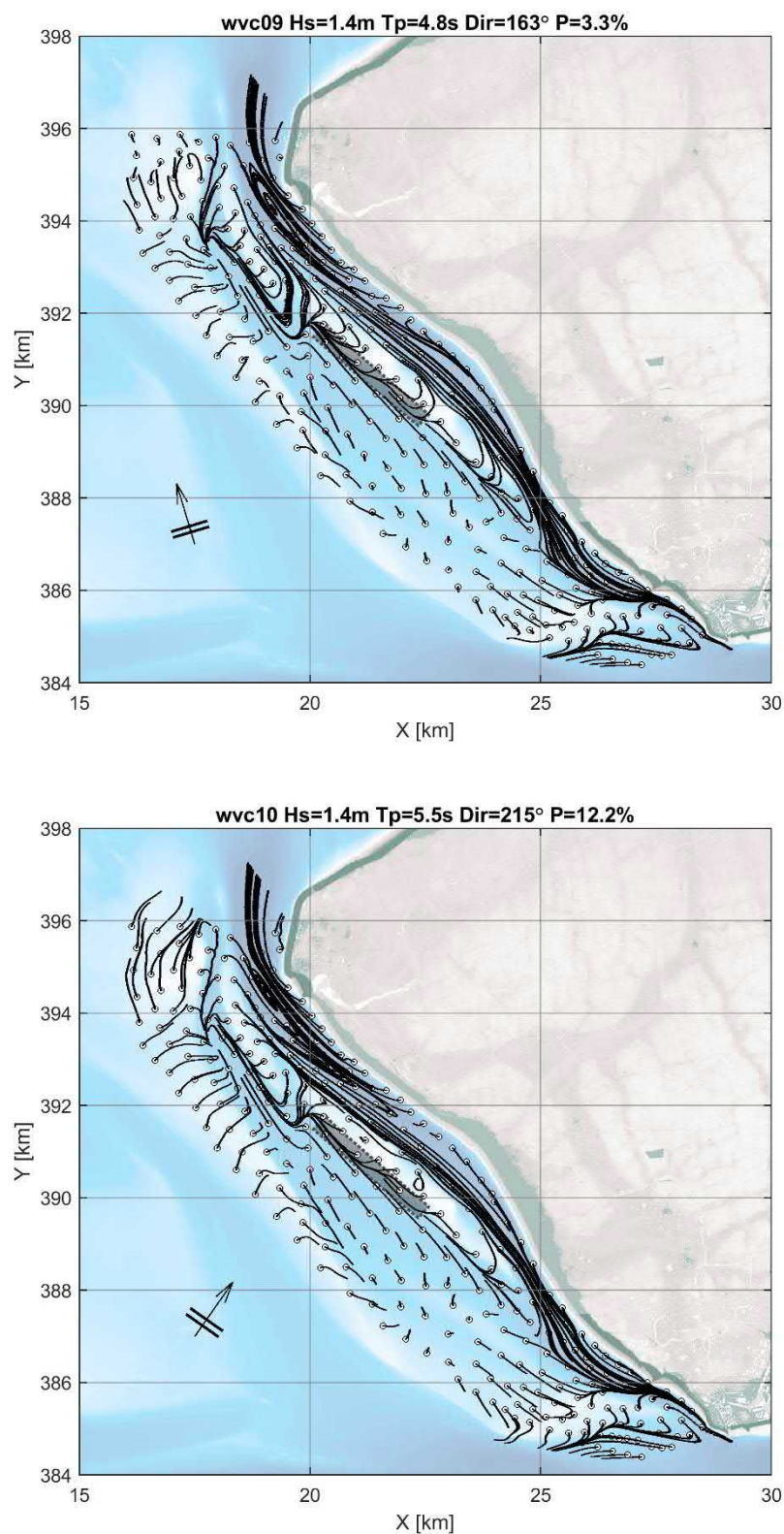
Figuur B-6: Een overzicht van de sedimenttransportpatronen voor golfconditie 3 en 4.



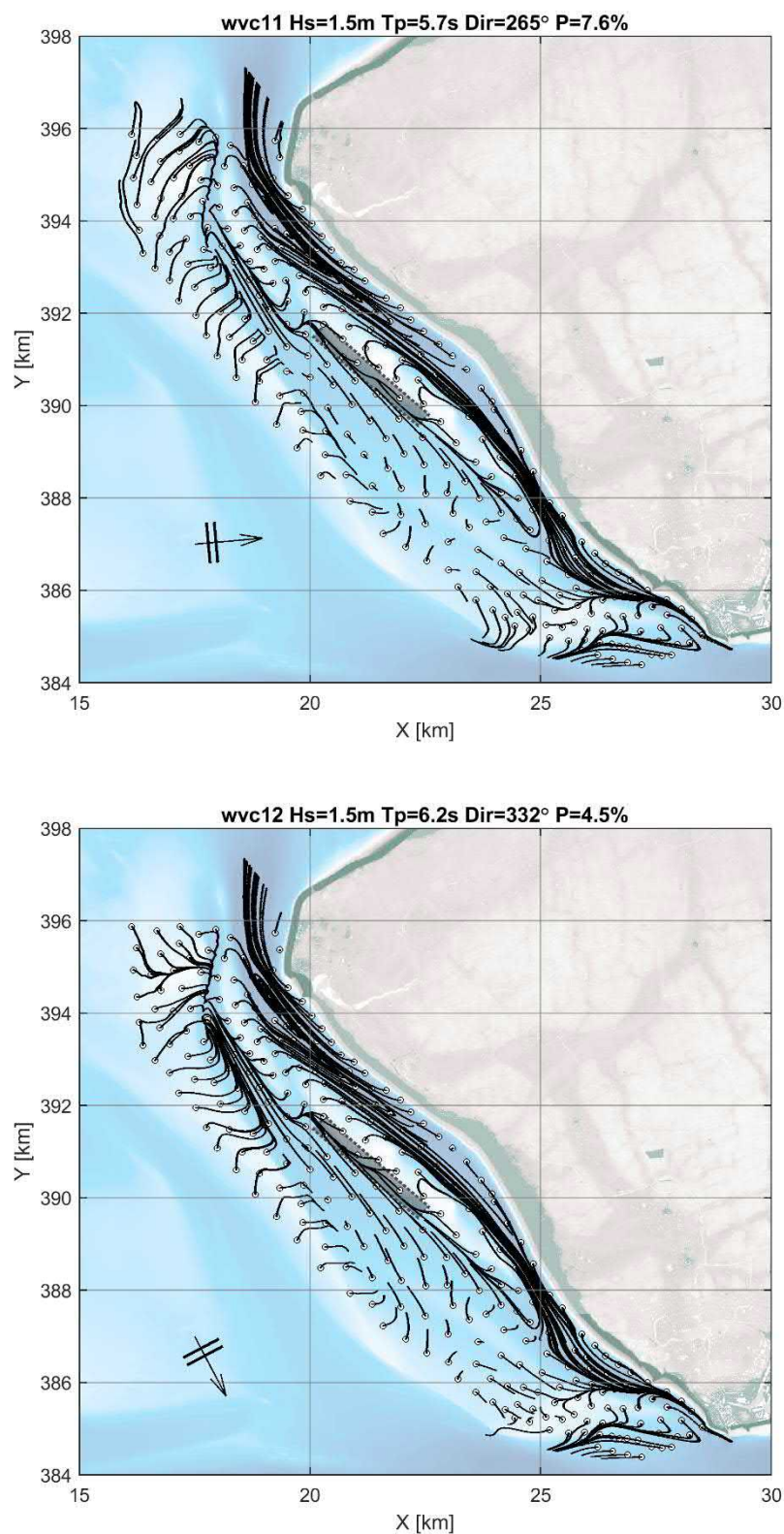
Figuur B-7: Een overzicht van de sedimenttransportpatronen voor golfconditie 5 en 6.



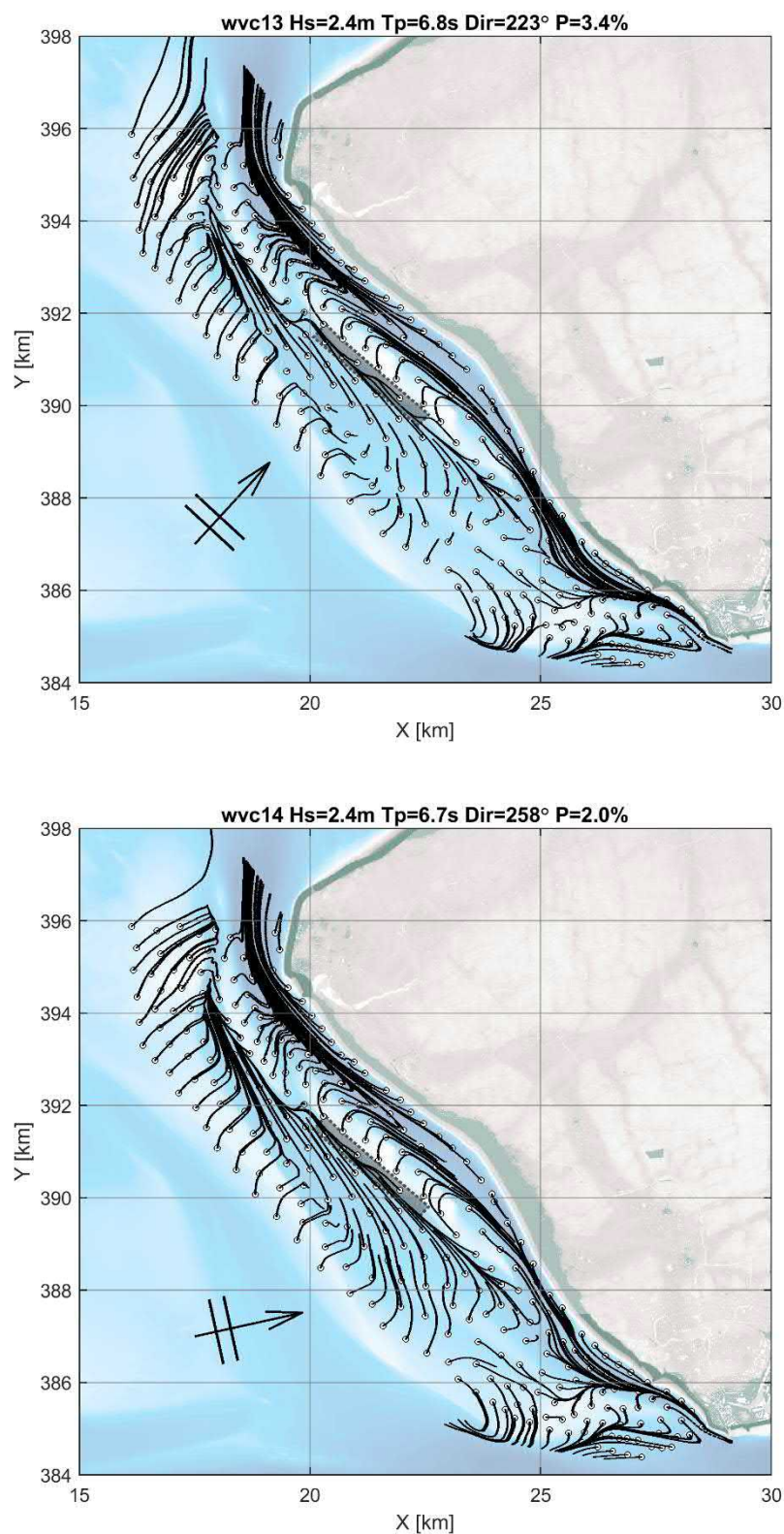
Figuur B-8: Een overzicht van de sedimenttransportpatronen voor golfconditie 7 en 8.



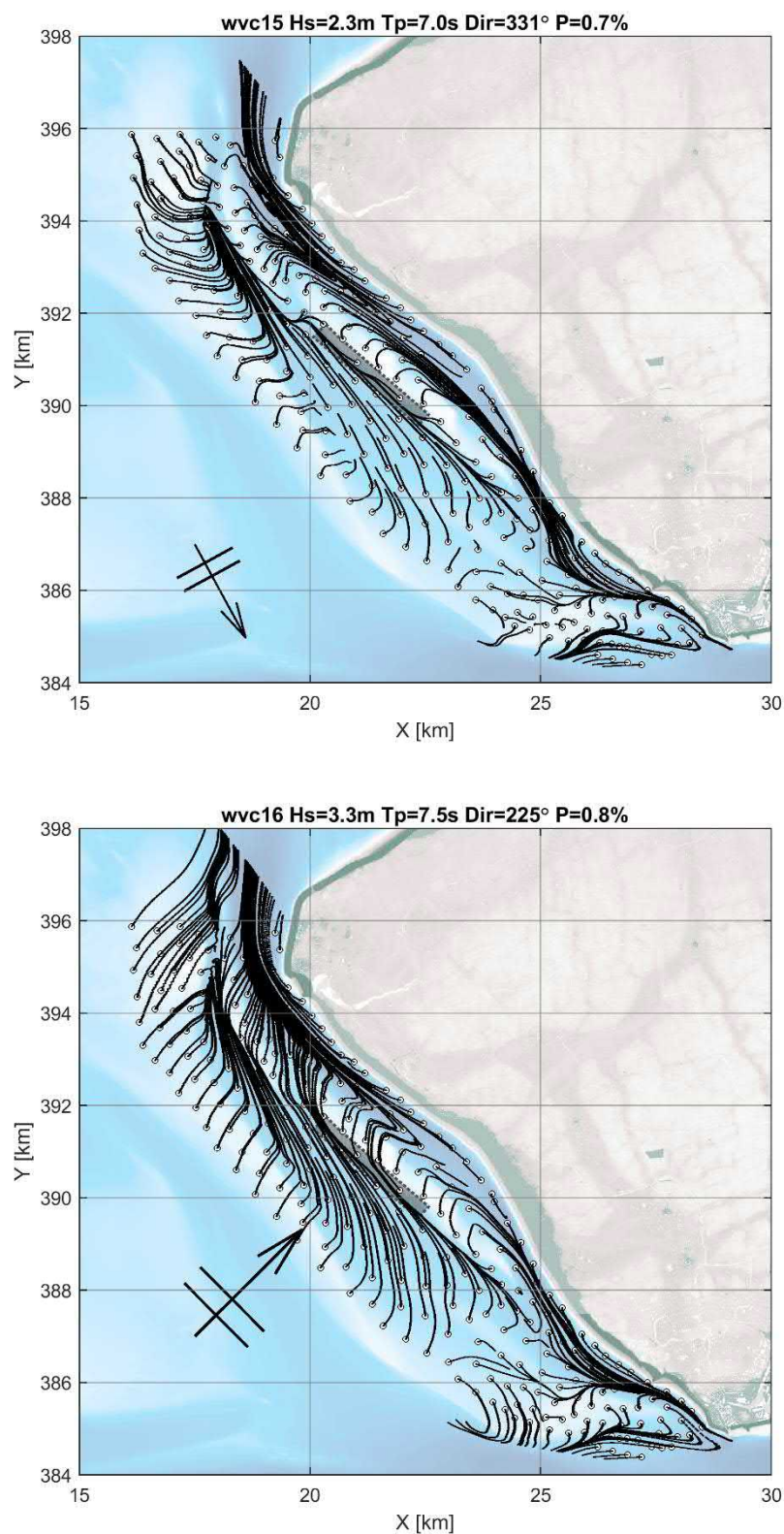
Figuur B-9: Een overzicht van de sedimenttransportpatronen voor golfconditie 9 en 10.



Figuur B-10: Een overzicht van de sedimenttransportpatronen voor golfconditie 11 en 12.



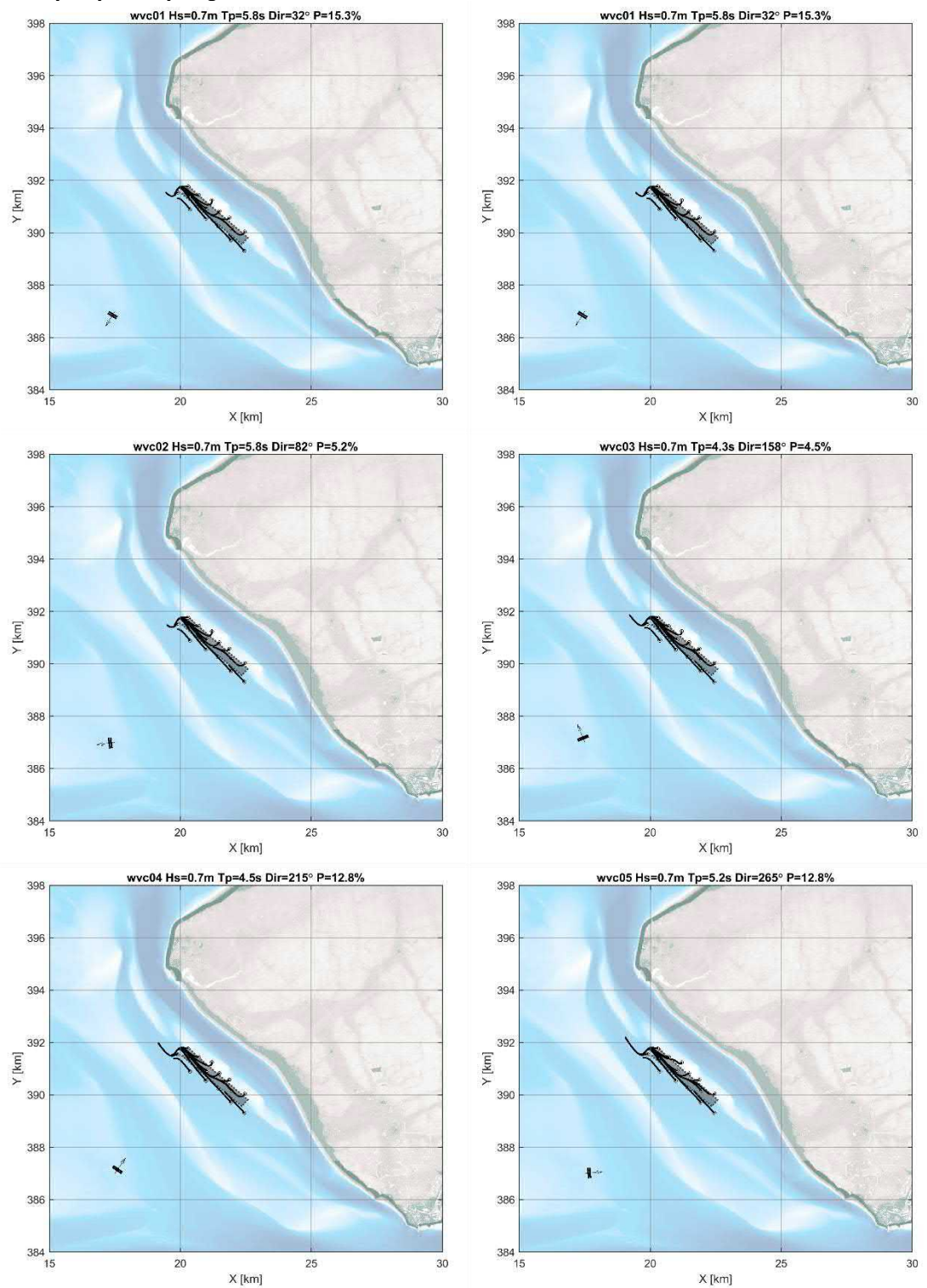
Figuur B-11: Een overzicht van de sedimenttransportpatronen voor golfconditie 13 en 14.



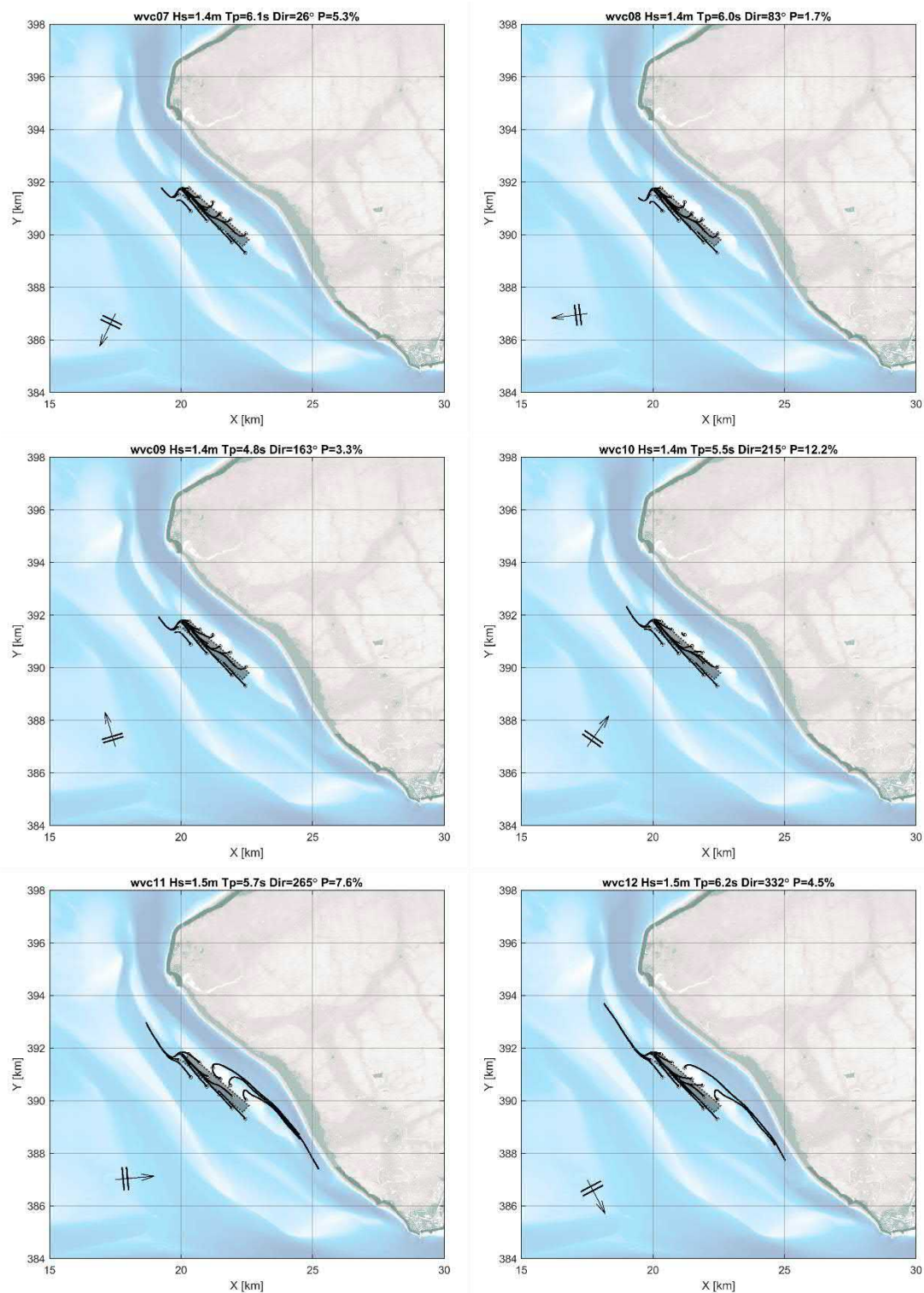
Figuur B-12: Een overzicht van de sedimenttransportpatronen voor golfconditie 15 en 16.

B.3.2

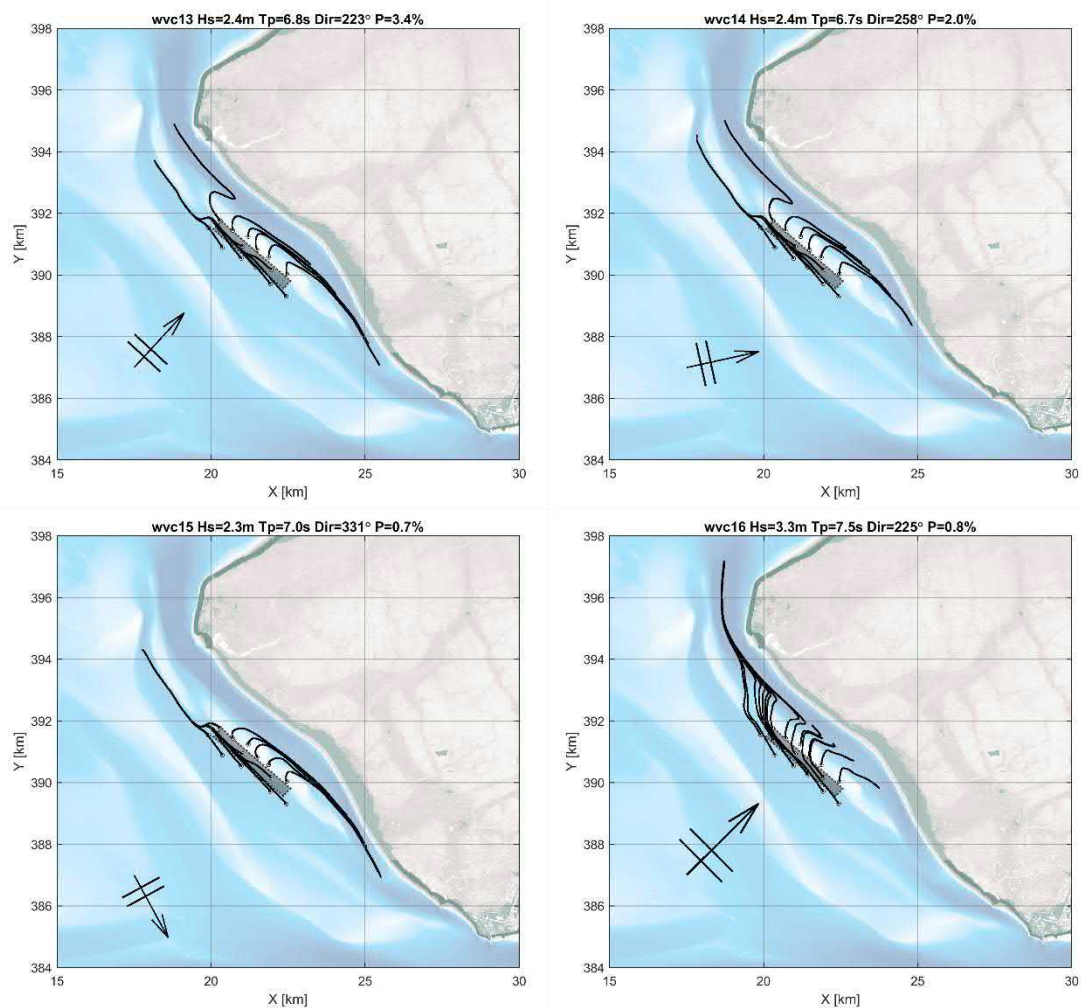
Transportpaden per golfconditie



Figuur B-13: Een overzicht van de sedimenttransportpatronen vanaf de suppletie locatie voor golfconditie 1 -6.

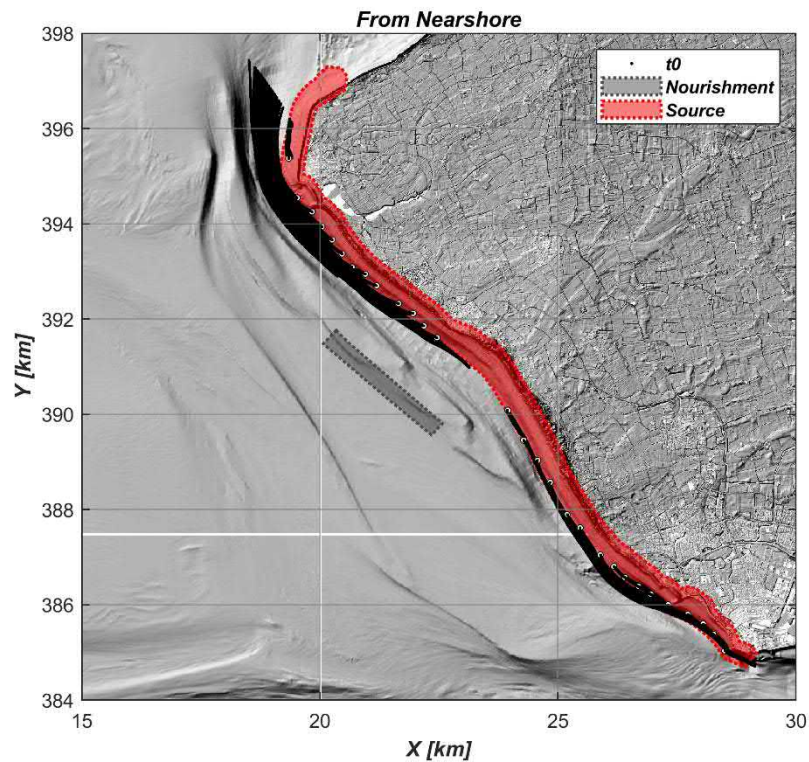


Figuur B-14: Een overzicht van de sedimenttransportpatronen vanaf de suppletielocatie voor golfconditie 7-12.

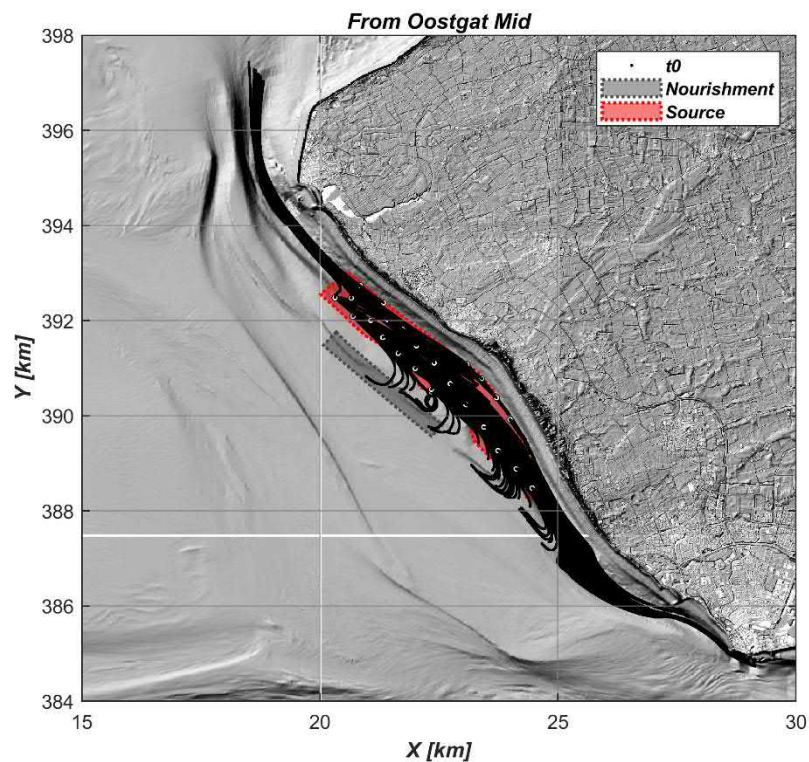


Figuur B-15: Overzicht van de sedimenttransportpatronen vanaf de suppletielocatie voor golfconditie 13-16.

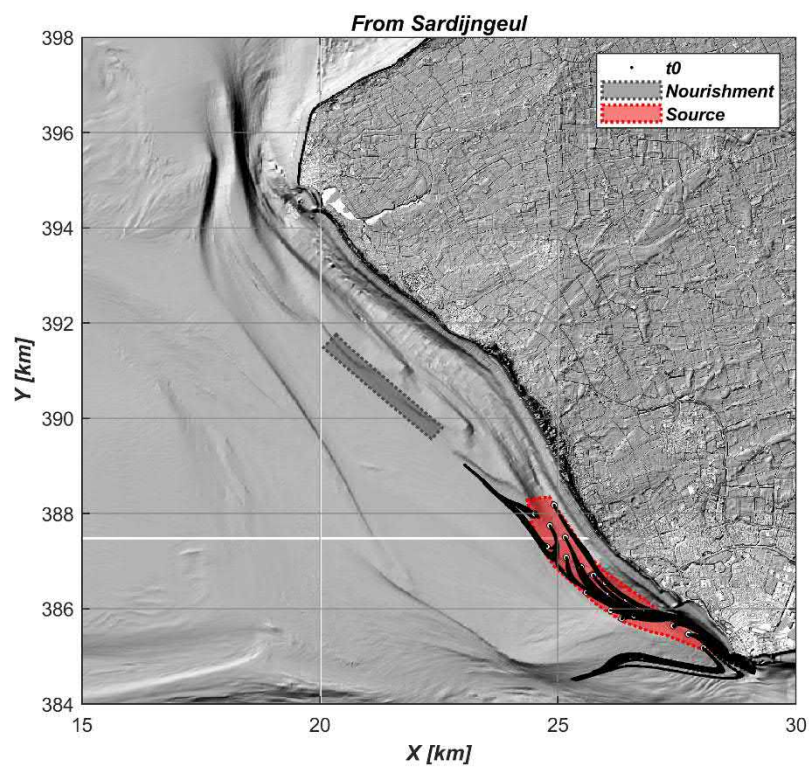
B.3.3 Overzicht transportpaden per deelgebied



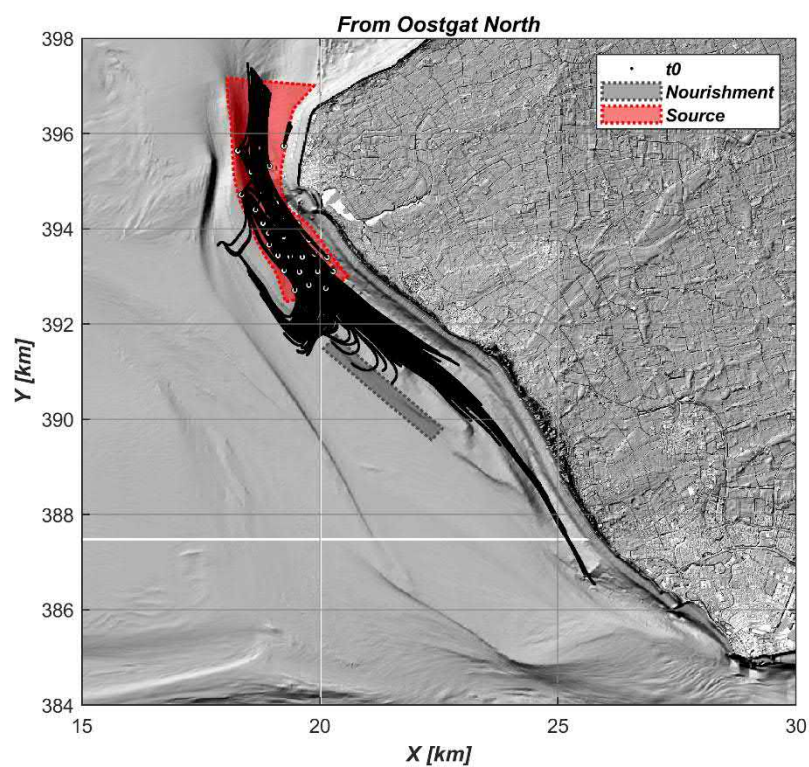
Figuur B-16: Een overzicht van de sedimentuitwisseling vanaf het deelgebied Walcheren kust.



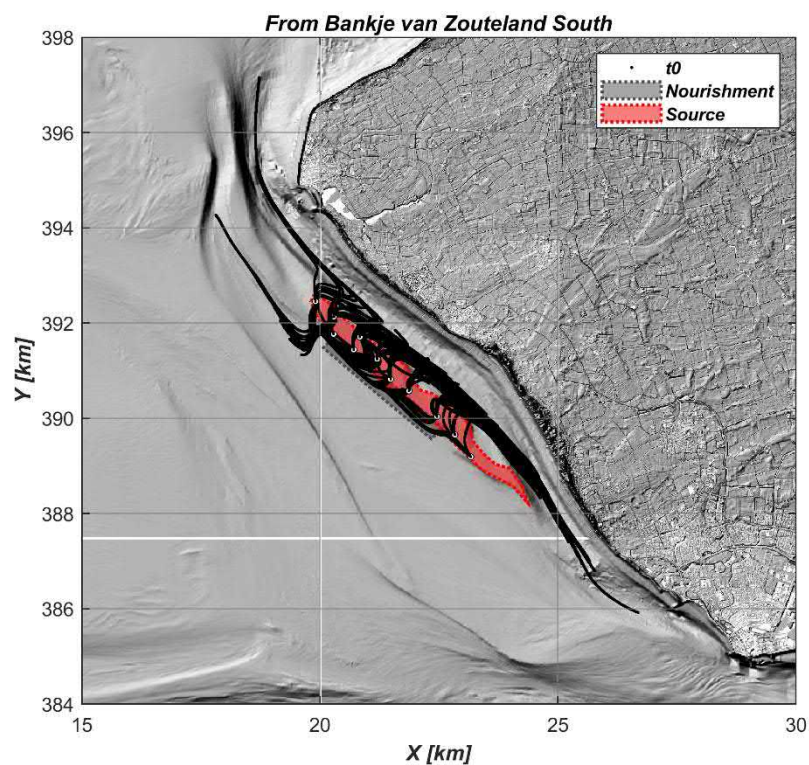
Figuur B-17: Een overzicht van de sedimentuitwisseling vanaf het deelgebied Oostgat midden.



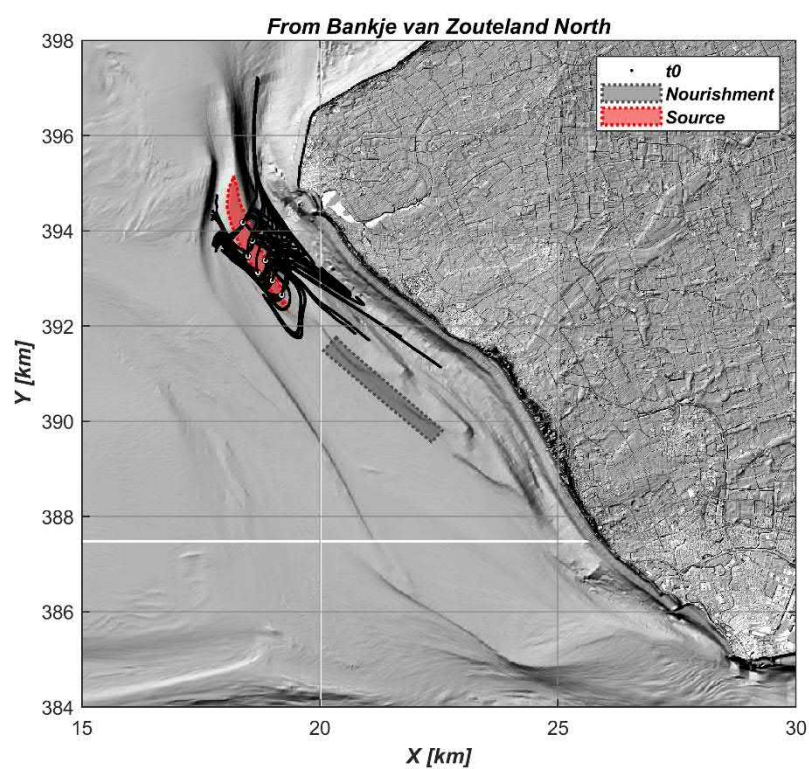
Figuur B-18: Een overzicht van de sedimentuitwisseling vanaf het deelgebied Sardijneul.



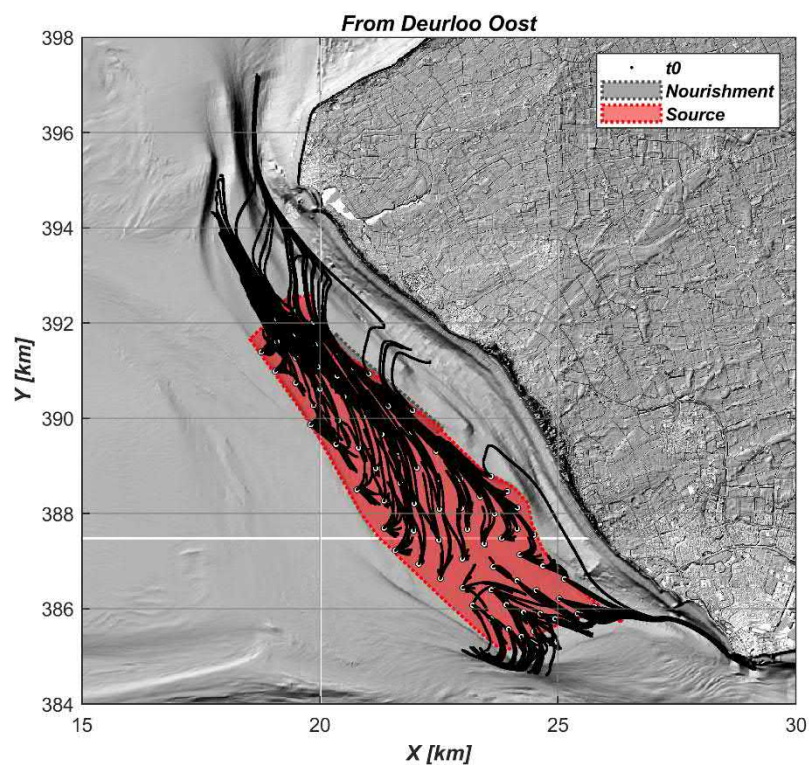
Figuur B-19: Een overzicht van de sedimentuitwisseling vanaf het deelgebied Oostgat Noord.



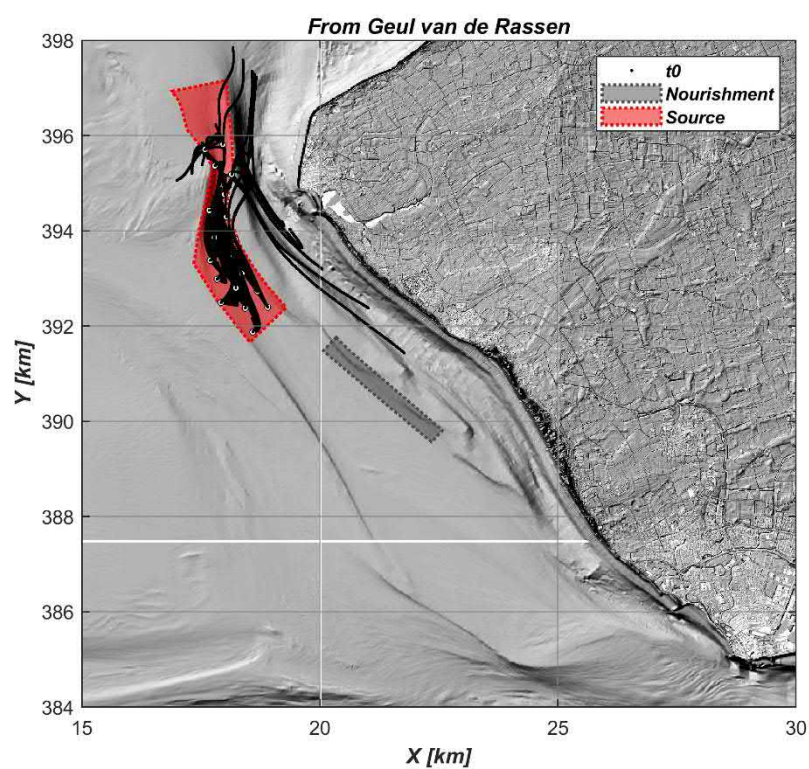
Figuur B-20: Een overzicht van de sedimentuitwisseling vanaf het deelgebied Bankje van Zoutelande – Zuid



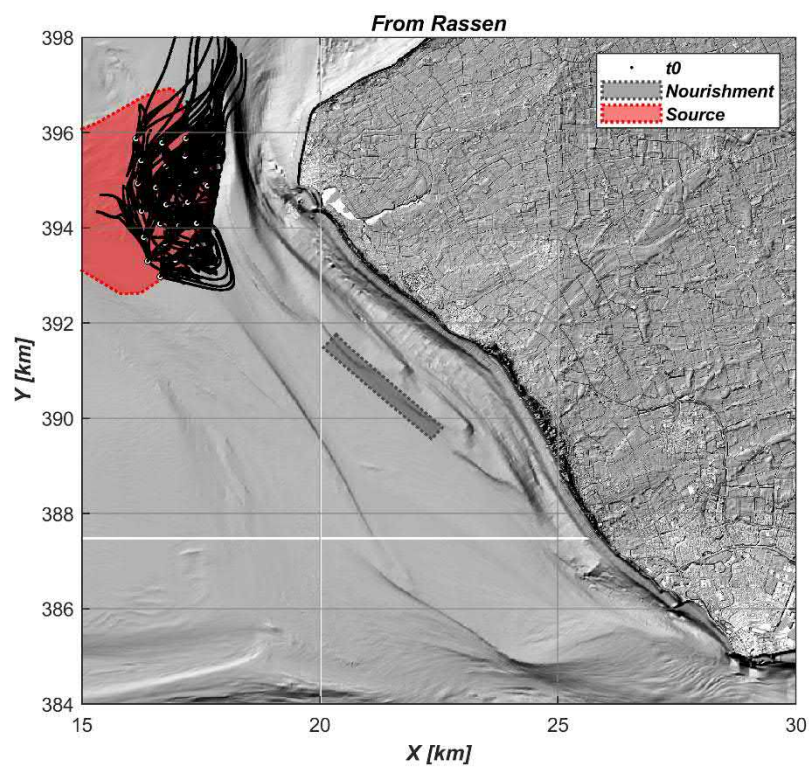
Figuur B-21: Een overzicht van de sedimentuitwisseling vanaf het deelgebied Bankje van Zoutelande noord.



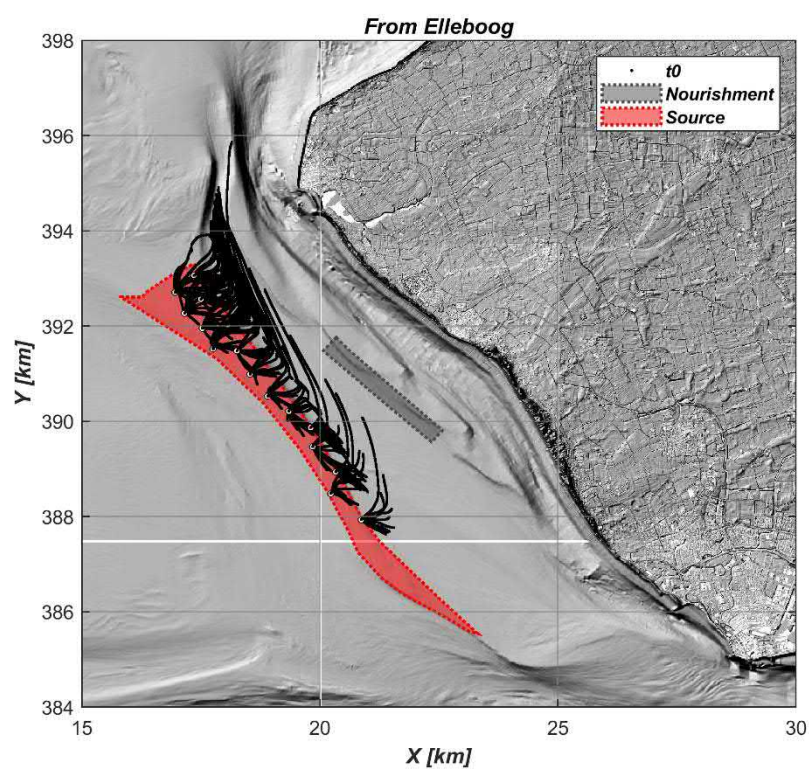
Figuur B-22: Een overzicht van de sedimentuitwisseling vanaf het deelgebied Deurloo Oost.



Figuur B-23: Een overzicht van de sedimentuitwisseling vanaf het deelgebied Geul van de Rassen.



Figuur B-24: Een overzicht van de sedimentuitwisseling vanaf het deelgebied Rassen.



Figuur B-25: Een overzicht van de sedimentuitwisseling vanaf het deelgebied Elleboog.

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