

## Morfologische analyse systeemsuppletie Terschelling (Zeegat van het Vlie)



## Morfologische analyse systeemsuppletie Terschelling (Zeegat van het Vlie)

### Auteur(s)

Tim de Wilde

Edwin Elias

## Morfologische analyse systeemsuppletie Terschelling (Zeegat van het Vlie)

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer F. Brils
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Terschelling, Vlie, Systeemsuppletie, morfologische ontwikkeling, SedTRAILS, Delft3D Flexible Mesh

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	12-12-2023
<b>Projectnummer</b>	11209263-004
<b>Document ID</b>	11209263-004-ZKS-0007
<b>Pagina's</b>	73
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Tim de Wilde	
	Edwin Elias	

# Samenvatting

Rijkswaterstaat overweegt om een systeemsuppletie te plaatsen in het Zeegat van het Vlie, om o.a. structurele erosie van de Noordsvaarder (op de zuidwestelijke kop van Terschelling te compenseren. Deltares is gevraagd om te onderzoeken hoe de banken op de buitendelta (onder andere de Noordwestgronden en Westergonden) zich morfologisch gedragen. Ook is Deltares gevraagd om advies te geven over een geschikte locatie voor een dergelijke systeemsuppletie op de buitendelta en de verwachte morfologische effecten van zo'n suppletie op het gedrag van de buitendelta en aanliggende kust.

De geobserveerde erosie tussen RSP 1200-3000 hangt samen met de grootschalige morfologische aanpassing van de Noordsvaarder. De Noordsvaarder vormt sinds 1850 de zuidwestzijde van Terschelling, na aanlanding van de gelijknamige bank. Sindsdien vindt er een grootschalige herverdeling van het aangelande zand over de eilandkust plaats. Deze herverdeling gaat gepaard met gebieden van erosie, maar ook gebieden met aanzanding. Een grootschalige bankaanlanding is sinds 1850 niet meer opgetreden, maar zou wel nodig zijn om de eilandkop in zijn geheel uit te bouwen. Kleinschalige bank-aanlandingen treden wel op, alleen landen deze banken aan ten noordoosten van de beschouwde locatie (rond RSP 3000-4000). Het aangelande sediment wordt hoofdzakelijk oostelijk verplaatst, richting de centrale eilandkust. Het Boomkensdiep speelt hierbij een belangrijke rol. De getijstrooming in deze geul, die direct langs de zuidwestelijke eilandkop loopt, kan efficiënt zand afvoeren en zorgt ervoor dat bankaanlandingen niet op de eilandkop, maar verder oostelijk richting de centrale eilandkust plaatsvinden. Naast de beïnvloeding van de aanlandingsbanken, speelt het Boomkensdiep ook een directe rol in de sedimentverplaatsing voor de westkust van Terschelling. De kustlangse getijstroomingen in de geul zorgen ervoor dat sediment dat vanuit de buitendelta landwaarts verplaatst de kust niet bereikt, maar kustlangs wordt afgevoerd. Een deel van dit sediment verplaatst richting het zeegat waar het bijdraagt aan de vorming van het drempelgebied tussen Schuitengat, Boomkensdiep en Vliestroom (de hoofdgeul). Een ander deel van het sediment wordt via de Vliestroom terug de buitendelta op getransporteerd en weer een deel verplaatst in oostelijke richting, waar het een ebschild vormt om de uitstroming van het Boomkensdiep heen. De vorming van kustdwarse banken dat sinds 2005 optreedt zou mogelijk aan dit ebschild gerelateerd kunnen zijn.

Met behulp van het Delft3D Flexible Mesh model en SedTRAILS visualisaties zijn de effecten van vier suppletievarianten doorgerekend. Suppletie 1 omvat een buitendeltasuppletie aan de noordzijde van de Noordwestgronden. Suppletie 2 heeft als doel het toevoegen van een extra bank tussen de al aanwezige aanlandingsbanken op de buitendelta. Suppletie 3 is een buitendeltasuppletie op de rand van de Noordergronden. Suppletie 4 omvat een geulopvulling van het Boomkensdiep.

Op basis van de modelresultaten en expert judgement kan worden geconcludeerd dat de suppletievarianten 1 tot en met 3 vooral lokaal een effect hebben op de sedimenttransporten. Van grootschalige beïnvloeding van de buitendelta is geen sprake. Dit komt omdat de suppletievarianten een verwaarloosbaar effect hebben op de stroming en transporten in de hoofdgeul de Vliestroom. Gemodelleerde transporten laten zien dat het sediment aangebracht op *suppletielocatie 1* vooral hercirculeert. Het verplaatst over de buitendelta richting de Vliestroom en vanuit de Vliestroom terug de buitendelta (Westergonden) op. Suppletie 1 is daardoor zeer geschikt om het sedimentvolume van de buitendelta te behouden (of te vergroten). Modelresultaten laten zien dat *suppletie 2* relatief stabiel is. Doordat deze suppletie aan het einde van de sediment-bypassing cyclus (de west-oost verplaatsing van banken over de buitendelta heen) is aangebracht, zal deze veel sneller aanlanden en verhelen met de kust

van Terschelling. De autonome ontwikkeling van de vooroever van de Noordergronden is sterk erosief. Daardoor vertoont *suppletie 3*, die hier is aangebracht, een grote verspreiding van het sediment. Een deel van dit sediment verplaatst landwaarts onder de invloed van golven, maar een deel van dit sediment zal zich onder de invloed van het langsgetij meer zeewaarts verplaatsen richting de diepere vooroever. Deze locatie is relatief makkelijk toegankelijk en lijkt daardoor geschikt om veel zandvolume aan te brengen, wat vervolgens efficiënt, over een groot deel van het kustvak verspreid kan worden. *Suppletie 4* geeft een directe beïnvloeding van de erosieve processen ter hoogte van het probleemgebied. Doordat het centrale deel van het Boomkensdiep is dichtgezet, worden de getijgedreven langstransporten gestopt. Op korte termijn geeft dit een vergroting van de kuslijnerosie, doordat de afgesloten geul opvult. Op lange termijn zorgt dit ervoor dat sediment vanaf de buitendelta de kust kan voeden en er hier ook mogelijk bankaanlandingen kunnen optreden. Deze suppletie zal echter ook op grotere schaal gevolgen hebben, bijvoorbeeld voor het Schuitengat en de Engelschhoek. Aanvullend onderzoek is nodig om de grootschalige invloed van deze suppletie beter te begrijpen. Daarnaast is het aan te bevelen om voor het jaarlijkse kustbeheer rekening te houden met het cyclische karakter van de kust en de aanwezige zandvolumes in de buitendelta.

# Inhoud

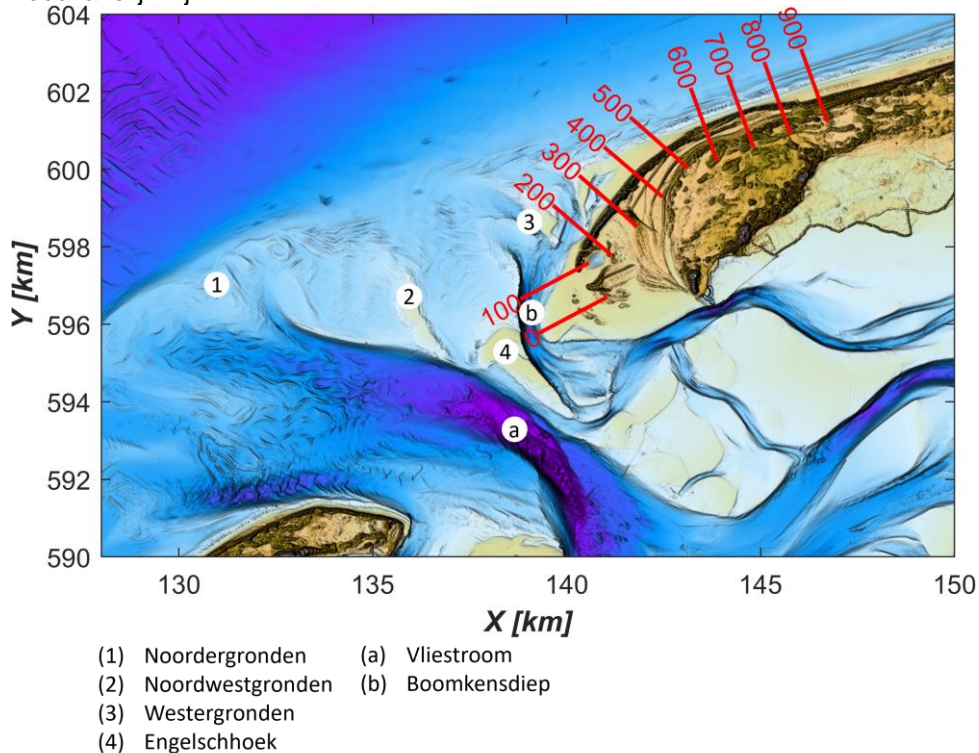
	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>8</b>
1.1	Probleem- en vraagstelling	8
1.2	Aanpak & Leeswijzer	8
<b>2</b>	<b>Een overzicht van het huidige Zeegat van het Vlie</b>	<b>10</b>
2.1	De ligging van de dominante geulen en platen	10
<b>3</b>	<b>Morfologische ontwikkelingen</b>	<b>12</b>
3.1	Ontwikkeling van de buitendelta over de periode 1987-2022	12
3.2	Veranderingen in Noordwest- en Noordergronden	15
3.3	Analyse van de aanlandingsbanken bij Terschelling (uit: Elias, 2021)	18
<b>4</b>	<b>Volumeveranderingen van de buitendelta en de aanlandingsbanken</b>	<b>22</b>
4.1	Sedimentatie- en erosievolumes van het zeegat (uit: Elias, 2021)	22
4.2	Volumeveranderingen per diepteklasse	24
4.3	Volumeveranderingen van de aanlandingsbanken	26
<b>5</b>	<b>Modellering</b>	<b>28</b>
5.1	Het Delft3D-FM model	28
5.1.1	Modelschematisatie en rekenrooster	28
5.1.2	Sedimenttransport	29
5.1.3	Golven	30
5.2	SedTRAILS	32
5.3	Overzicht van de modelsimulaties en suppletievarianten	35
<b>6</b>	<b>Modelresultaten</b>	<b>37</b>
6.1	Modelresultaten T0 situatie	37
6.2	SedTRAILS resultaten T0 situatie	43
6.3	Resultaten voor de suppletievarianten	46
<b>7</b>	<b>Samenvatting, conclusies en aanbevelingen</b>	<b>50</b>
7.1	Samenvatting en conclusies	50
7.2	Aanbevelingen	51
<b>8</b>	<b>Referenties</b>	<b>54</b>
<b>A</b>	<b>Modelresultaten</b>	<b>55</b>
A.1	Stromingen suppletievarianten ten opzicht van T0 situatie	55

A.2	Sedimenttransporten suppletievarianten ten opzicht van T0 situatie	59
A.3	Snelheidsmagnitude	63
A.4	Bodemschuifspanningsmagnitude inclusief golven	66
A.5	Significante golfhoogte	69
A.6	SedTRAILS raaien Terschelling	72

# 1 Introductie

## 1.1 Probleem- en vraagstelling

De noordwestzijde van de eilandkop van Terschelling is aan erosie onderhevig. Met name de kustlijn tussen raaien 120 tot en met 300 trekt zich sterk terug waardoor de BKL hier wordt overschreden, zie Figuur 1-1 voor de locatie van de raaien. Door de brede strand-duinzone geeft de BKL-overschrijding niet direct een gevaar voor de kustveiligheid. Er is daarom tot nu toe gekozen om dynamiek toe te staan en om niet in te grijpen met suppleties. Om op langere tijdschaal de kustlijn hier te handhaven kunnen suppleties in de toekomst mogelijk wel noodzakelijk zijn.



Figuur 1-1: Overzicht van het Zeegat van het Vlie. Namen van enkele belangrijke platen (nummers) en geulen (letters) zijn benoemd. De raaien en raainummers in rood geven de ligging van de Jarkusraaien weer.

Een optie om de teruggang van de kustlijn te compenseren is door middel van een systeemsuppletie op de buitendelta van het Zeegat van het Vlie. Basale vragen zoals: Hoe zou zo'n suppletie eruit moeten komen te zien? Wat is de beste aanleglocatie? Wat zou het volume moeten zijn? Wat zijn de verwachte effecten op de omliggende morfologie en wat is de effectiviteit van zo'n suppletie? Deze vragen kunnen met de huidige inzichten nog niet voldoende beantwoord worden. Meer inzicht in het morfologisch gedrag van de banken (Westergonden en Noordwestergonden) en de verwachte morfologische effecten van een systeemsuppletie zijn hiervoor benodigd. Met dit inzicht kan Rijkswaterstaat dan een gefundeerde beslissing te maken over het wel of niet supperen op de buitendelta van het Zeegat van het Vlie en hoe zo'n suppletie er uit zou moeten zien voor een optimale effectiviteit.

## 1.2 Aanpak & Leeswijzer

Dit rapport bestaat uit 7 hoofdstukken. Hoofdstuk 2 geeft een beknopte beschrijving van de morfologische kenmerken van het huidige Zeegat van het Vlie. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de grootschalige morfologische veranderingen in de buitendelta, gefocust op het



bankengedrag van de kustdwarse banken bij Terschelling en het Boomkensdiep. Dit Hoofdstuk vat de resultaten van de studie Elias (2021) beknopt samen. Hoofdstuk 4 geeft een verdiepingsslag van deze kennis door in detail de volumeveranderingen van het zeegat en de aanlandingsbanken te analyseren. Hoofdstuk 5 presenteert het Delft3D Flexible Mesh model van de Waddenzee en het SedTRAILS model, dat wordt gebruikt om de T0-situatie (huidige morfologie zonder suppletie) en de verschillende suppletievarianten te modeleren. De resultaten van deze modellen zijn gepresenteerd in hoofdstuk 6. Dit hoofdstuk geeft inzicht in de verschillen tussen de suppletievarianten in relatie tot de resultaten van de T0 simulatie. De belangrijkste conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen in hoofdstuk 7.

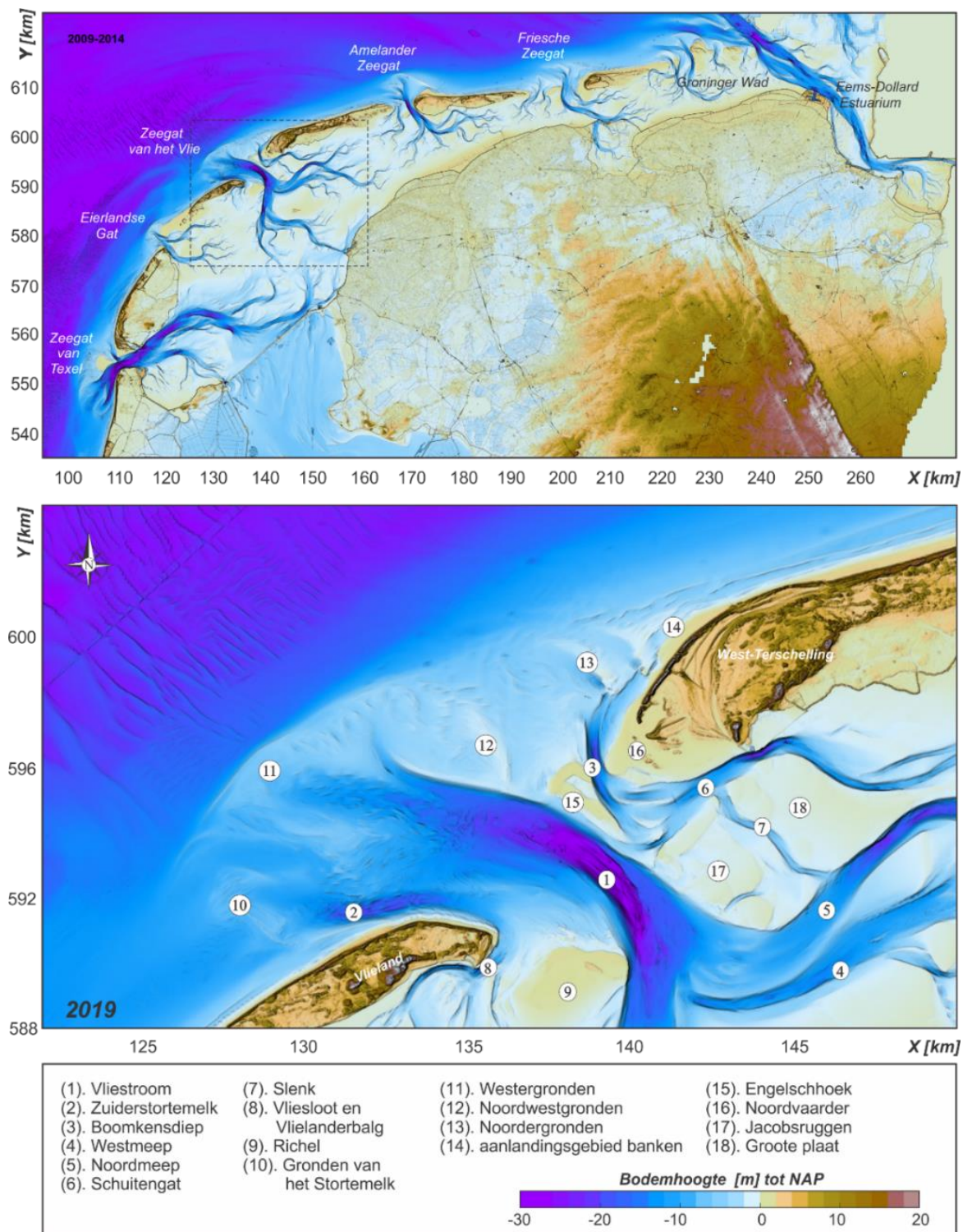
## 2 Een overzicht van het huidige Zeegat van het Vlie

### 2.1 De ligging van de dominante geulen en platen

Het Zeegat van het Vlie, ook wel Terschellinger Zeegat genoemd, is vanuit het westen gerekend, het derde zeegat in de Waddenzee. Het zeegat ligt ingeklemd tussen de eilanden Vlieland en Terschelling (Figuur 2-1). In het bekken is de komberging van het zeegat verbonden met het bekken van het Eierlandse Gat, maar ook met het bekken van het Zeegat van Texel. De 2019 bodem wordt gekenmerkt door een enkele hoofdgeul, de Vliestroom, in de keel van het zeegat (Figuur 2-1, [1]). Deze geul heeft een NW-ZO oriëntatie met een noordwestelijke uitstroomrichting de buitendelta op. In het bekken vertakt de geul in een zuidelijke tak (Vliestroom) en een noordelijke vertakking die bestaat uit de Westmeep en Noordmeep [4,5].

Langs de aanliggende eilanden bevinden zich nog twee kleinere geulen; het Zuiderstortemelk [2] langs de eilandstaart van Vlieland en het Boomkensdiep [3], dat zich langs de eilandkop van Terschelling uitstrekt. De eilandkop van Terschelling bestaat uit een breed strand, gevormd door de aanlanding van de grote bank Noordsvaarder [16]. Het Boomkensdiep gaat in het bekken over in het Schuitengat [6]. Het Schuitengat wordt door een ondiepe zandplaat gescheiden van de Vliestroom. Dit is ook de reden dat deze geul sinds 1996 niet meer de toegangsgedul tot de haven van Terschelling vormt. De toegang tot de haven verloopt via de Slenk [7]. De Slenk verbindt het Schuitengat met de Noordmeep [5] en vormt een scheiding tussen het westelijk gelegen plaatgebied van de Jacobsruggen [17] en de oostelijk gelegen plaat Grote Plaat [18]. Ingeklemd tussen Vlieland en de grote plaat Richel [9] ligt nog het kleinere geulenstelsel van de Vliesloot en Vlielandbalg [8]. Deze geulen vormden de toegang tot de haven van Oost-Vlieland.

De buitendelta heeft een omvang van ongeveer 8 km in zeewaartse richting en 22 km in langs-richting. Het merendeel van het plaatoppervlak en sedimentvolume bevindt zich ten noorden van de Vliestroom in de Noordwestgronden [12] en Noordergronden [13], die zich ver langs de kust van Terschelling uitstrekken en rond km 5-6 op de kust van Terschelling aanlanden [14]. Een ondiepe bank, Engelschhoek [15] steekt ver landwaarts het zeegat. Tussen de Engelschhoek en de Jacobsruggen [17] ligt een smalle bank. Het zuidwestelijke gedeelte van de buitendelta is relatief diep. Hier bevinden zich de kleinere bankcomplexen van de Gronden van het Stortemelk [10] en de Westergonden [11].



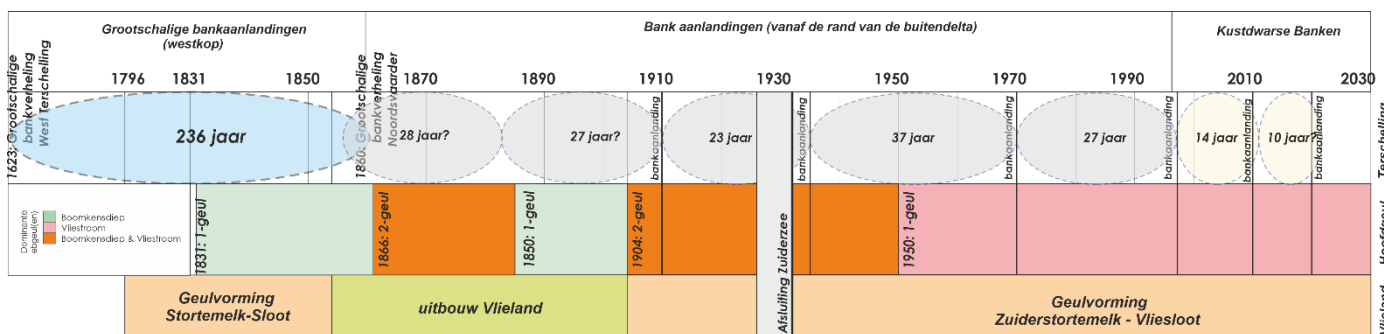
Figuur 2-1: Een overzicht van de Nederlandse Waddenzee met, van links naar rechts, de vijf grote zeegaten (Zeegat van Texel, Eierlandse Gat, Zeegat van het Vlie, Amelander Zeegat en Friesche Zeegat), de kleinere zeegaten van het Groninger Wad en het Eems-Dollard Eems-Dollard estuarium. Onder: een uitsnede van het Zeegat van het Vlie met ligging van de geulen en platen. Figuur overgenomen uit Elias (2021).

# 3 Morfologische ontwikkelingen

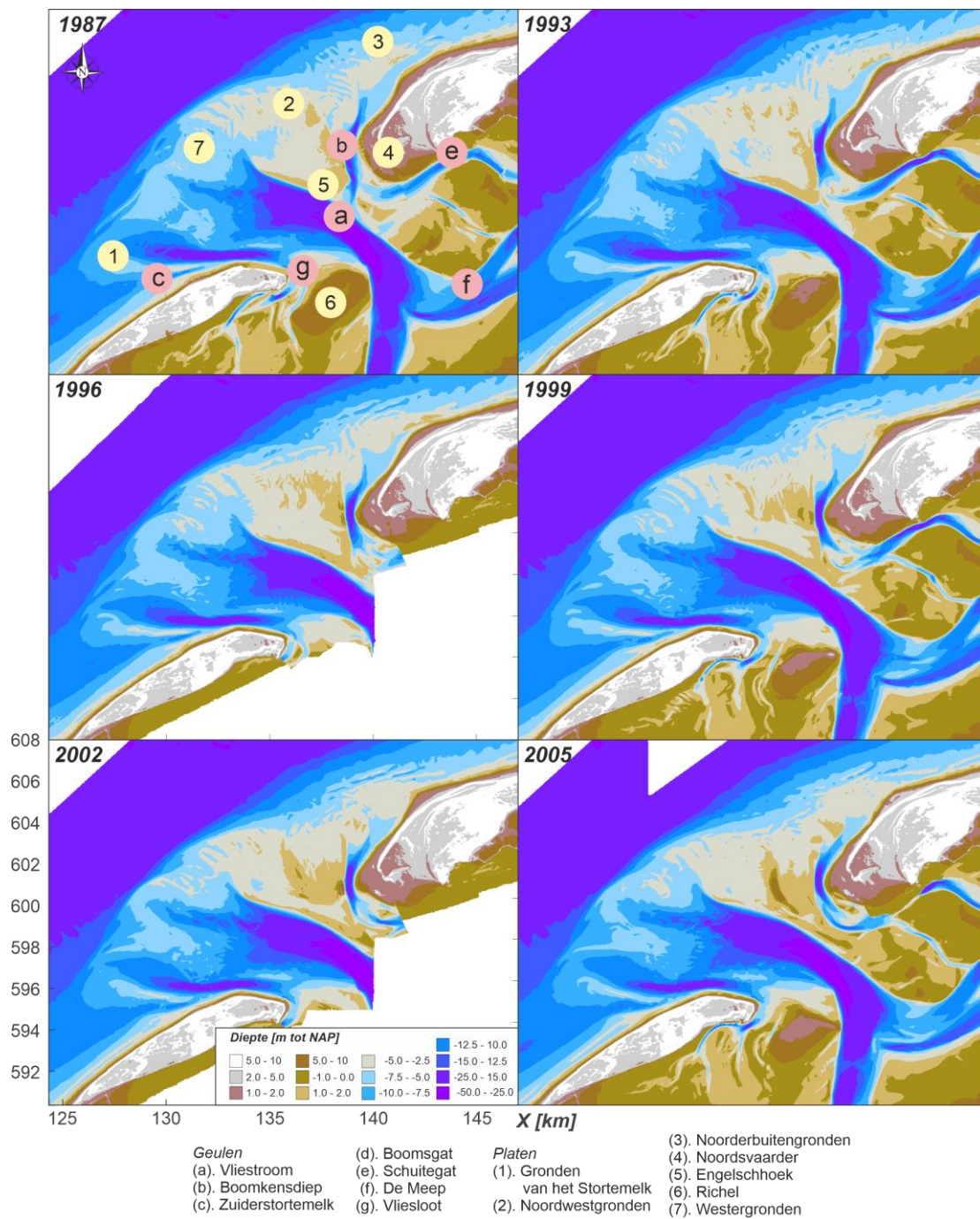
## 3.1 Ontwikkeling van de buitendelta over de periode 1987-2022

De 1987 – 2022 bodems geven een goed beeld van de recente ontwikkeling van de buitendelta van het zeegat (Figuur 3-2 en 3-3). Het zeegat wordt over de gehele periode gekenmerkt door een grote hoofdgeul (Vliestroom), die centraal in het zeegat ligt en een noordwestelijke uitstroming geeft over de buitendelta. De buitendelta heeft zich voornamelijk aan de voorzijde (noordzijde) en aan de noordoostzijde van deze geul gevormd. Dit deel van de buitendelta wordt ook wel de Westergonden en Noordwestgronden genoemd. De geul Boomkensdiep vormt een scheiding tussen de buitendelta en de kop van Terschelling (de Noordsvaarder). De geul blijft over de gehele periode dicht langs de Noordsvaarder liggen, maar neemt wel langzaam in omvang af. De geul wordt dichtgedrukt door de landwaarts verplaatsende banken van de Noordwestgronden. Op basis van uitgebreide debietmetingen uit 1976 wordt geconcludeerd dat het Boomkensdiep in 1976 al duidelijk vloedgedomineerd is (Visser, 1986). Aan de zuidzijde van de Noordwestgronden, langs de Vliestroom, vindt een landwaarts verplaatsing en toename van de plaathoogte plaats. Een uitloper van de bank, de Engelschhoek, migreert het zeegat in en zorgt ervoor dat het Boomkensdiep en de Vliestroom rond 1992 geheel gescheiden zijn. Deze bankverplaatsing zorgt er ook voor dat het Schuitengat geen directe verbinding meer maakt met de hoofdgeul, waardoor deze niet meer als vaargeul gebruikt kan worden.

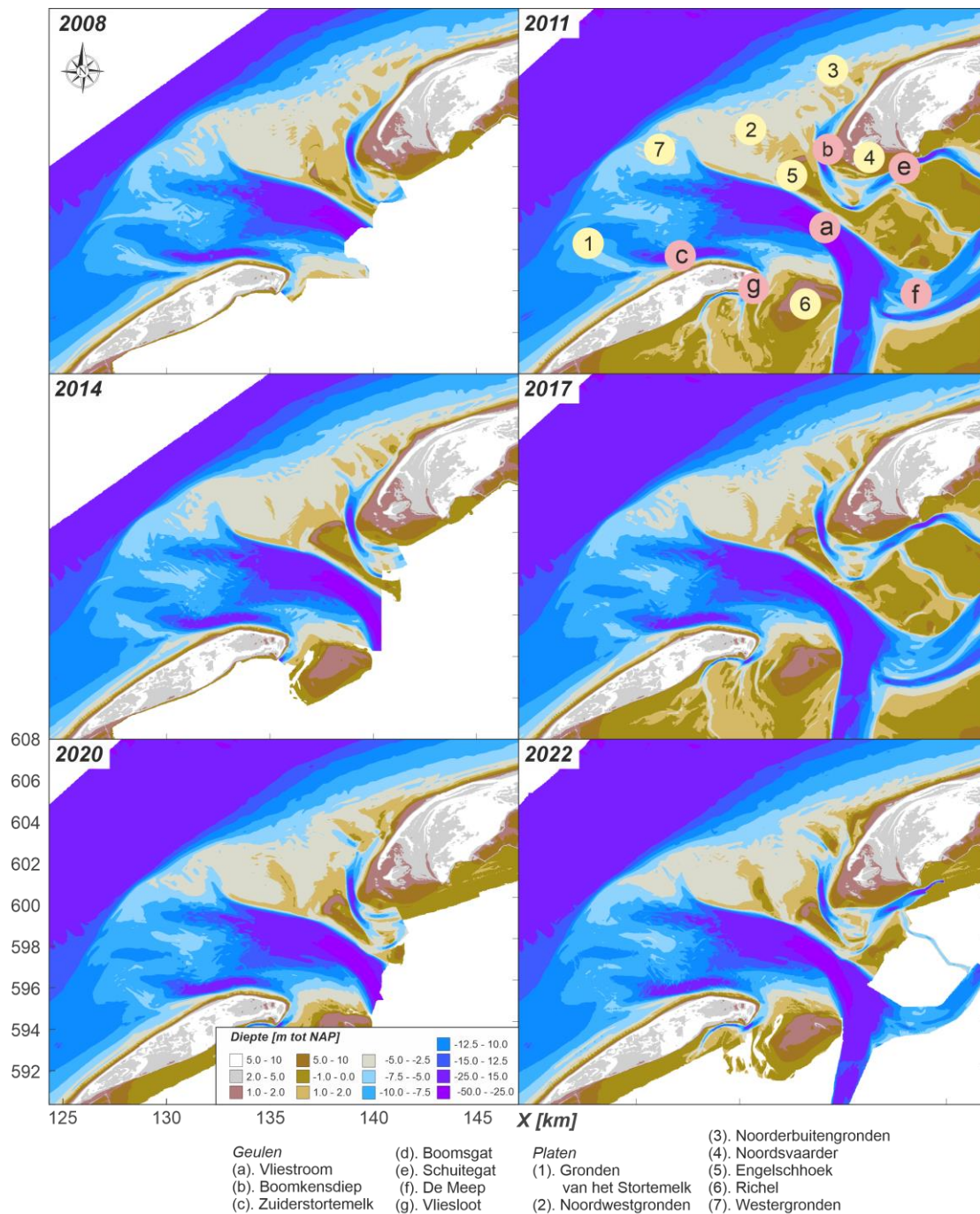
Aan de noordoostzijde van de Noordergronden [3] landen nog steeds banken aan op de kust (de voormalige Noorderbuitengronden). Deze bankaanlandingen zijn in omvang niet vergelijkbaar met de aanlanding van de Noordsvaarder. Sinds ongeveer 1850 vinden deze aanlandingen periodiek, zo om de 25-30 jaar, plaats (Elias, 2021 en Figuur 3-1). Elias (2021) concludeert dat de bankprocessen op de buitendelta sinds de afsluiting van de Zuiderzee aanzienlijk veranderd zijn. Met de vorming van de Vliestroom als dominante uitstroom in noordwestelijke richting en de veranderingen van het Boomkensdiep verandert de sedimenttoevoer richting de buitendelta. Het buitendeltaplatform wordt landwaarts gedrukt (zie ook Figuur 3-4 voor deze ontwikkeling). De kleinere geulen verzanden en een groot buitendeltaplatform ontstaat. Deze verandering zorgt ervoor dat ook het sediment-bypassing proces langs de buitendelta verandert. Op het platform ontstaan nu kustparallele banken die zich langzaam oostelijk bewegen. Sinds 2001 zijn er twee bankaanlandingen geweest, met een herhalingstijd van 10-15 jaar. Grote bankaanlandingen zoals die zijn opgetreden in 1623 en 1860 hebben zich sinds 1860 niet meer voorgedaan. Deze ontwikkelingen worden conceptueel weergegeven in Figuur 3-1.



Figuur 3-1: Een samenvatting van de geobserveerde ontwikkelingen van het zeegat van het Vlie (uit Elias, 2021). In de middelste regel is het cyclische karakter van de bankaanlandingen te zien.



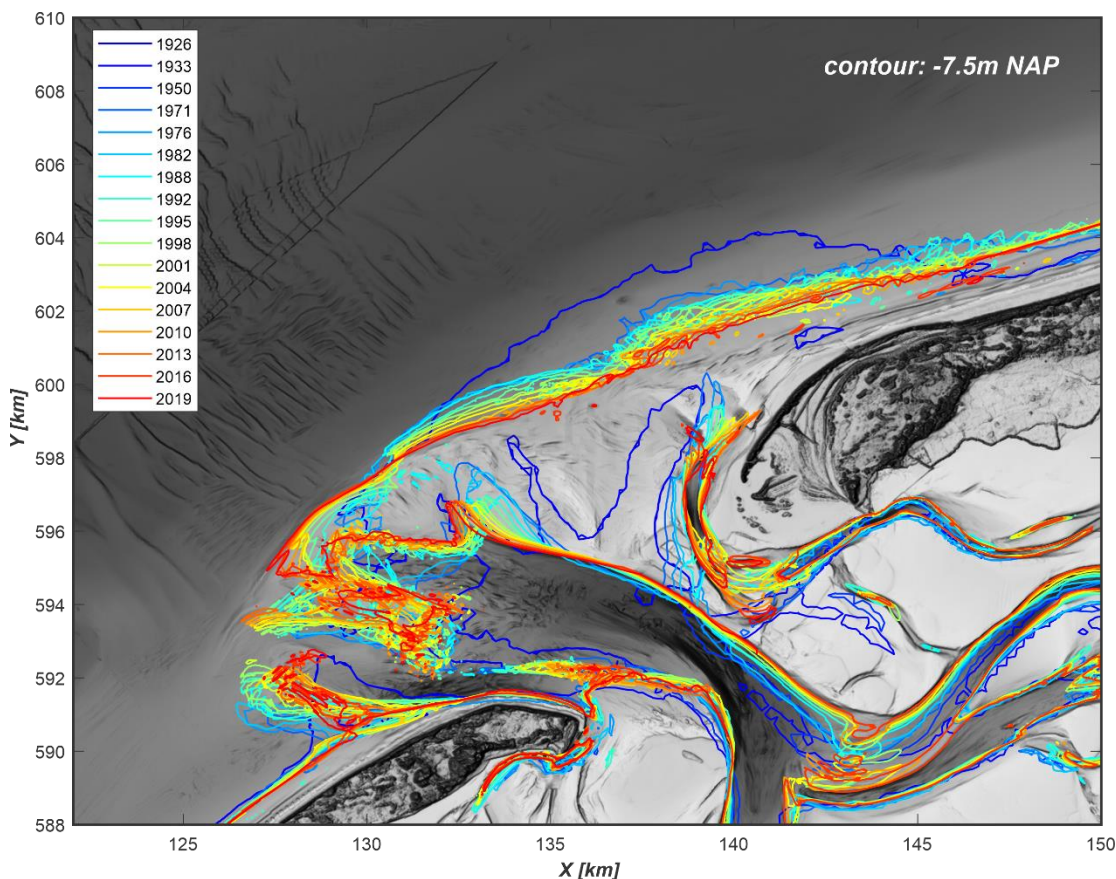
Figuur 3-2: Ontwikkeling van de buitendelta van het Vlie over de periode 1987-2005.



Figuur 3-3: Ontwikkeling van de buitendelta van het Vlie over de periode 2008-2022.

## 3.2 Veranderingen in Noordwest- en Noordergronden

De veranderingen van het grote buitendeltaplatform, gevormd door de Wester-, Noordwest- en Noordergronden, worden geïllustreerd in Figuur 3-4 en Figuur 3-5. Wat opvalt is de grote landwaartse verplaatsing van de Noordwest- en Noordergronden tussen 1926 en 1971. Deze verplaatsing kan het resultaat zijn van de initiële aanpassing aan de afsluiting van de Zuiderzee. Ook in het zeegat van Texel treden de grootste morfologische veranderingen op in de eerste 40 jaar, maar ze duren nog wel voort. De landwaartse terugtrekking van de Noordwestgronden blijft tot ten minste 2019 zichtbaar in de contourlijnen.



Figuur 3-4: Ontwikkeling van de buitendelta door weergave van de -7.5 m contourlijn over de periode 1926-2019. De onderliggende bodem is gebaseerd op de 2019 metingen. De 1926 en 1933 bodem zijn identiek voor de buitendelta. In 1950 is alleen het bekken gemeten.

Tijdens het terugtrekken van de buitendelta verdwijnt ook het Boomkensdiep als centrale geul door het platform. In 1971 ligt de geul al langs de Noordsvaarder, wat in de volgende jaren zo blijft. Er vormt zich een doorgaande verbinding met het Schuitengat. In het westelijk deel van de buitendelta vindt een opbouw van banken op de Noordwestergronden plaats, die vervolgens in noordoostelijke richting migreren. Deze ontwikkelingen worden in meer detail getoond in Figuur 3-5 aan de hand van 5 representatieve doorsneden.

*Dwarsprofiel A* (Figuur 3-5) doorsnijdt de Noordwestgronden net ten noorden van de Vliestroom. In dit profiel blijft de zeezijde van de buitendelta vrij stabiel in positie. Hier blijft een groot zandaanbod vanuit de Vliestroom aanwezig. De grootste verschillen zijn op het platform. De hoogte neemt toe en de geulen vullen in. Het Boomkensdiep is meer dan 1,5 km landwaarts verplaatst, maar blijft wel breed met een diepte van rond de -15 m NAP. Na 1976 wordt de geul snel smaller door invulling van beide geulwanden en hij wordt dieper. De maximale diepte van rond de -20 m NAP wordt bereikt in 2010. Daarna neemt de diepte weer iets af.

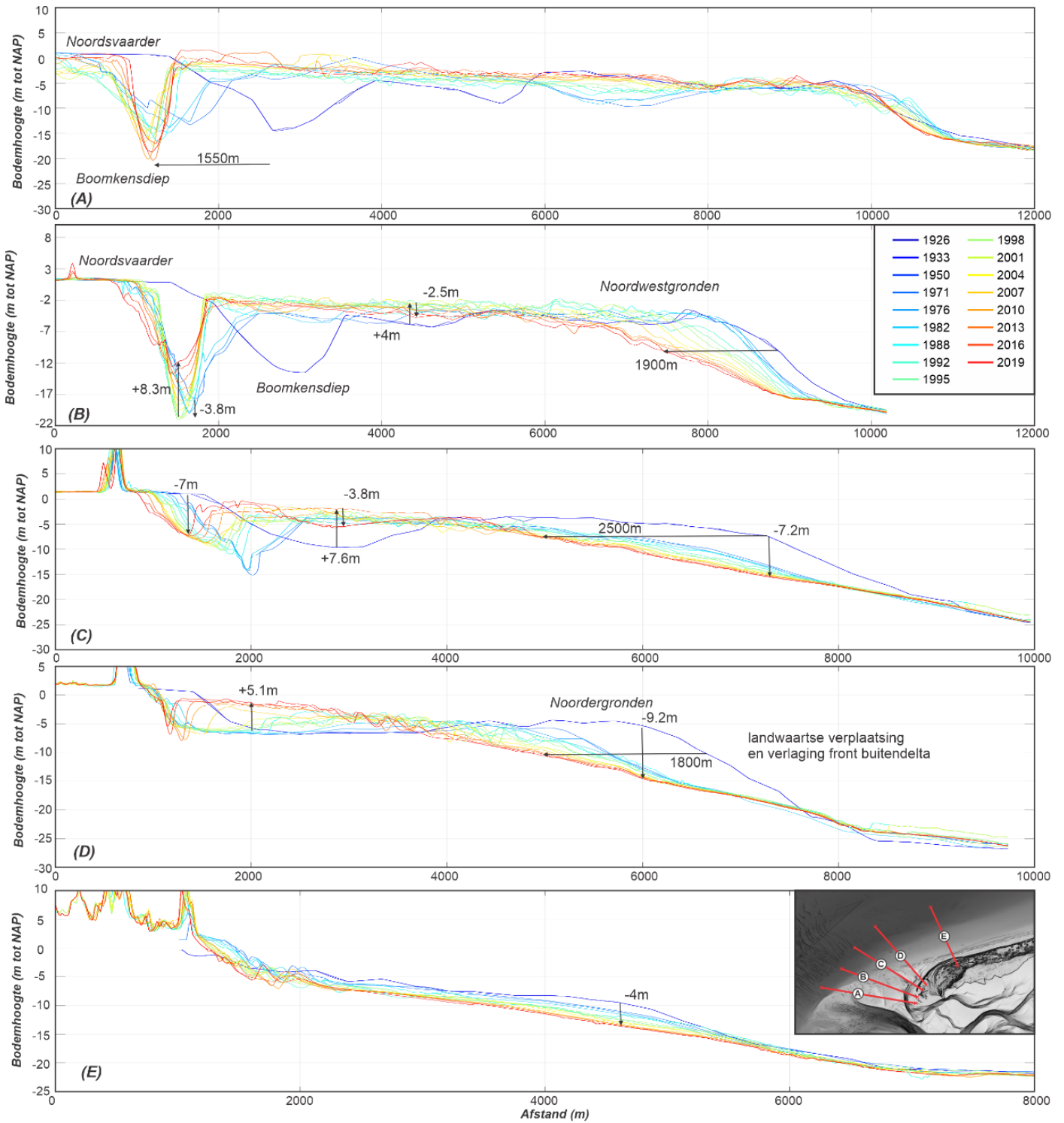
*Dwarsprofielen B-C* (Figuur 3-5) illustreren de grote landwaartse verplaatsing van de Noordwestgronden (1.5-2.5 km). De hoogte van het front van de buitendelta neemt sterk af. Lokaal wordt het bijna 10 m dieper. Een deel van het geërodeerde materiaal wordt landwaarts afgezet, waardoor daar de hoogte toeneemt. Dat volume is echter veel kleiner dan de afname aan de zeezijde (zie H.4). In dwarsprofielen B en C is ook de initiële toename en vervolgens een afname in diepte van het Boomkensdiep terug te zien. Dit past bij twee verschillende stadia van ontwikkeling van het Boomkensdiep. Het eerste stadium is de verplaatsing van het Boomkensdiep richting de Noordsvaarder, onder invloed van de landwaartse zanddruk van de buitendelta. Zodra de geul de kust bereikt vertraagt de verplaatsing van de landwaartse geulwand. De zeewaartse geulwand blijft met gelijke snelheid landwaarts verplaatsten. Het debiet verandert aanvankelijk niet tijdens deze versmalling van de geul. Daarmee wordt een proces in gang gezet waarbij de stromingen toenemen, die de geul doen verdiepen op zoek naar een ander morfodynamisch evenwicht. Tijdens dit proces ontstaan ook steile geulwanden. Dit proces domineert tot 1988. De geul is dan bijna 4 m in diepte toegenomen.

Na 1995 neemt de geuldiepte terug af. Deze afname is waarschijnlijk het resultaat van het verlies van debiet door de geul. Het hiervoor beschreven proces verloopt dan in omgekeerde richting. De snelheden nemen af bij een verminderd debiet en sedimentatie in de geul is mogelijk. Tussen 1995 en 2019 neemt de geuldiepte met meer dan 8m af. De afname van de stroming zorgt er ook voor dat de steile landwaartse geulwand niet behouden kan worden. Deze geulwand verflauwt waardoor er een groot verlies van de kustzone optreedt. Aan de zeewaartse zijde is verflauwing van de geulwand niet zichtbaar, doordat hier een landwaartse zandtransport over de buitendelta heen overheerst.

Ook nabij de uitstroom van het Boomkensdiep (*dwarsprofiel D*) overheerst het landwaarts verplaatsen van de buitendelta. De buitendelta duwt daarbij de geul de kust in waardoor hier ook een sterke erosie overheerst. De geul neemt daarbij wel steeds verder in grootte en diepte af. De buitendelta is hier over een grote afstand (1.8 km) al volledig opgeruimd. Een deel van de Noordergronden was ook in de kustlijnen zichtbaar in de vorm van het aanlanden van een grote bank (Figuur 3-4). Deze grote bankaanlanding was een eenmalig proces en vergelijkbaar met de respons van bijvoorbeeld het Friesche Zeegat na afsluiting van de Lauwerszee. In beide systemen bevindt zich na afsluiting een overschot van zand op de noordoostzijde van de buitendelta. Als initiële respons vindt dan een versnelde opruiming van dit zand plaats. Het wordt door golven landwaarts verplaatst en verheelt met de kust. Bij het Friesche Zeegat was deze initiële respons nadrukkelijk zichtbaar door de vorming van een grote Strandhaak die duidelijk zichtbaar aanwezig was. De Noordergronden vertonen een minder zichtbare aanpassing, maar een grote bank verheelt wel met de kust waardoor deze tijdelijk sterk uitbreidt. Dit zandvolume is vervolgens als een zandgolf van west naar oost langs de kust van Terschelling verplaatst.

In *dwarsprofiel E* (Figuur 3-5) is in 1933 nog net de meest noordoostelijk gelegen zijde van de buitendelta te onderscheiden. De buitendelta is langzaam opgeruimd, wat lokaal gepaard gaat met grote erosie (tot -4 m). In 2019 is er een vrijwel ongestoord kustprofiel zichtbaar. Dit profiel heeft een diepte van -22 m NAP op ongeveer 7 km van de kust. Vanaf deze diepte vormt dan een vloeiende helling. Nabij de kust zijn enkele brekerbanken zichtbaar.

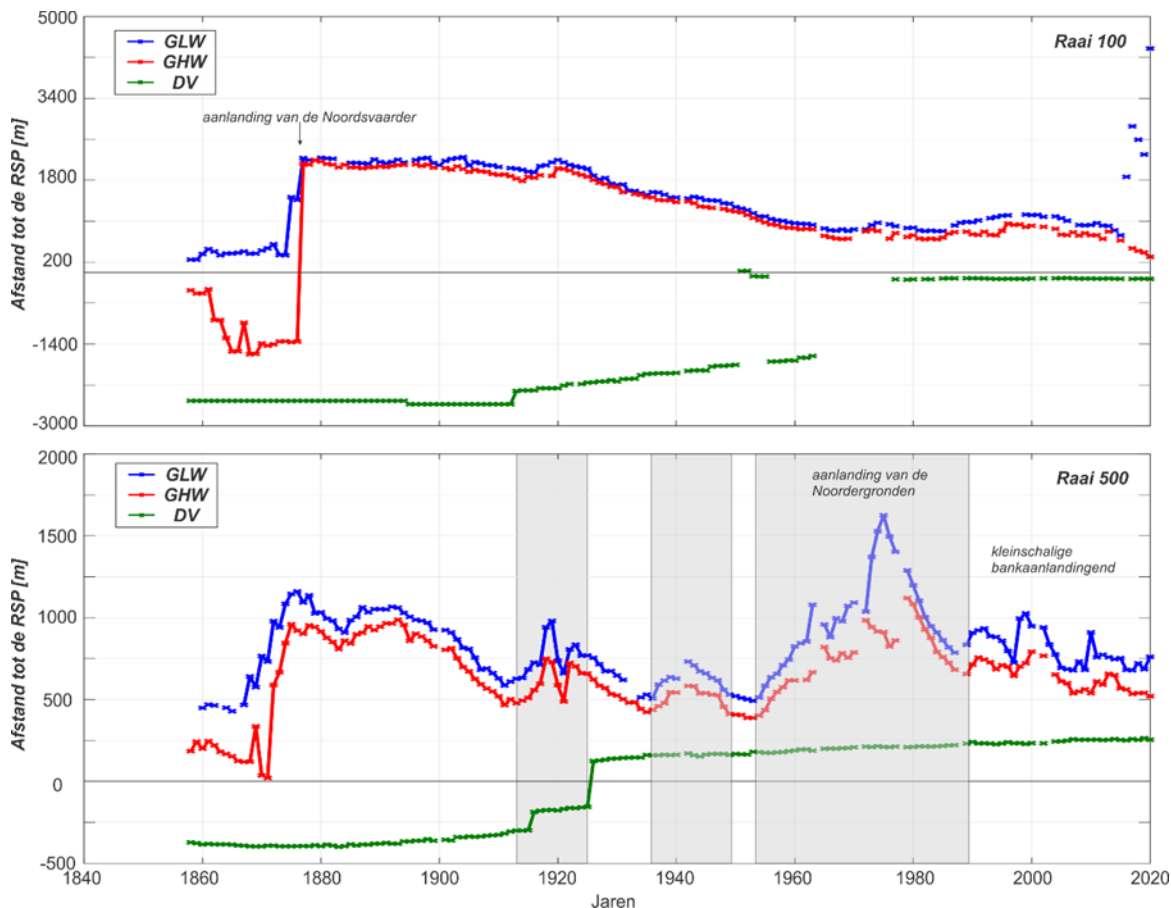




Figuur 3-5: Ontwikkeling van dwarsprofielen over de Noordwestgronden en Noordergronden op basis van de Vaklungen over de periode 1926-2019 (bron: Elias, 2021).

### 3.3 Analyse van de aanlandingsbanken bij Terschelling (uit: Elias, 2021)

Naast de ontwikkeling van het Boomkensdiep zijn ook de voorliggende banken van direct belang voor de kustlijnontwikkeling. Naast de JarKus metingen zijn er voor een beperkt aantal Jarkusraaien ook langetermijnreeksen van de ligging van de waterlijnen: Gemiddeld LaagWater (GLW), Gemiddeld HoogWater (GHW) en DuinVoet (DV; +3 m NAP) beschikbaar. Deze metingen geven een goed beeld van de respons van de kust in relatie tot de historische bankaanlandingen (Figuur 3-7).



Figuur 3-6: Tijdsreeks van de ligging van de Gemiddeld LaagWaterlijn (GLW), Gemiddeld HoogWaterlijn (GHW) en DuinVoet (DV) voor raaien 100 en 500 gelegen op de eilandkop van Terschelling (zie Figuur 3-7 voor ligging van de raaien).

De tijdsreeks van raai 100, gelegen op de kop van de Noordsvaarder, laten de grote uitbouw na aanlanding van de Noordsvaarder duidelijk zien. Rond 1874 bouwt de GLW bijna 1500 m uit en de GHW verplaatst zelfs bijna 3,3 km zeewaarts. Na aanlanding verplaatsen de kustlijnen dan tot 1970 vrijwel continue weer landwaarts (-1,4 km). In de periode 1970-2000 liggen de strandlijnen vrij stabiel en verplaatsen zelfs iets terug zeewaarts. Over de laatste 20 jaar is er dan weer een duidelijke trend van landwaartse migratie te zien. De GHW verplaatst zich dan zo'n 600 m terug. De GLW vertoont over het algemeen een trend van landwaartse verplaatsing, alleen zijn er grote fluctuaties zichtbaar. Deze zijn dan waarschijnlijk gerelateerd aan het ontstaan van ondiepe geulen en intergetijdse bankgebieden. De metingen van de GLW laten in 2015 een zeewaartse sprong zien. Deze sprong wordt veroorzaakt door de grote aanlandingsbank die hier langere tijd aanwezig blijft.

Raai 500 ligt in het gebied waar de buitendelta overgaat in de eilandkust van Terschelling. Ook in deze raai is de aanlanding van de Noordsvaarder duidelijk te zien. De strandlijnen vertonen hier een grote uitbouw in de periode 1860-1865. De aanlanding vindt hier blijkbaar iets eerder

plaats dan in raai 100. De vertraging in raai 100 is te herleiden naar het aanwezige geultje tussen de bank en de kust dat eerst ingevuld moet worden voordat de aanlanding plaats kan vinden. Na aanlanding van de Noordsvaarder bouwt de kust in raai 500 1,2 km zeewaarts uit, om dan tot 1965 terug landwaarts te verplaatsen. In 1965 ligt de GLW dan vrijwel terug op de 1860 ligging. Naast een algehele trend van terugtrekking zijn er in de strandlijnen ook duidelijke fluctuaties zichtbaar die gerelateerd zijn aan het aanlanden van banken. Zo'n bankaanlanding treedt bijvoorbeeld op in de periode 1910-1920. Vanaf 1953 bouwen de strandlijnen in raai 500 sterk uit. Deze uitbouw komt door aanlanding van de Noordergronden tussen raai 500 en raai 600. Deze aanhechting zorgt voor een maximale kustuitbouw rond 1975. Sindsdien trekken de kustlijnen iets terug.

De huidige aanlandingsbanken vormen vanaf 2005 (Figuur 3-2 en Figuur 3-3). Deze banken zijn wel anders dan de aanlandingsbanken uit de eerdere periodes. Voor 2005 waren de aanlandingsbanken kustlangse banken die ongeveer ter hoogte van raai 500 verbinding maken met de kust. De buitendelta tussen raai 100 en 400 is dan nog relatief diep en er zijn geen duidelijke banken op gevormd. Vanaf 2005 vormt zich een serie ondiepe banken op het landwaartse deel van de buitendelta langs het Boomkensdiep. Deze banken staan ongeveer haaks op de kust en worden gescheiden door ondiepe geulen zoals duidelijk te zien is in een bovenaanzicht van de recente buitendelta (Figuur 3-7). In de 2020 bodem zijn drie kustdwarse bankcomplexen te onderscheiden: een zeewaartse bank met een afstand van ongeveer 400 m langs de doorsnede, een middenbank op 2500 m en een aangelande landwaartse bank die rond 2016 verbonden is met het strand.

Een eerste aanlanding van zo'n kustdwarse (kleine) bank vindt rond 2011 plaats en in 2016 landt een wat grotere bank aan. De vorming van de zeewaartse bank is vanaf 2012 te volgen. De hoogte neemt eerst toe. In 2012 lag de top van de bank op -2,2 m NAP. Deze groeit snel in hoogte naar -1,7 m NAP in 2014 en -1,1 m NAP in 2015. Sindsdien blijft de hoogte fluctueren tussen de -0,8 en -1,0 m NAP. Tussen 2012 en 2015 verplaatst de westelijke zijde van de bank 300 m landwaarts. Daarna blijft deze vrijwel stabiel liggen. De landwaartse (oostelijke) zijde vertoont in die periode een uitbouw en opbouw. Deze uitbouw gaat eerst geleidelijk maar tussen 2019 en 2020 is een grote sprong te observeren.

De middenbank is al in 2005 te zien als een grote brede bank met een hoogte van ongeveer -1,8 m NAP tussen 2500 en 3750 m. Vanuit deze bank ontwikkelt zich de middenbank tot een hogere en veel smallere bank. De middenbank is vanaf 2013 goed te volgen. De zeewaartse zijde neemt in steilheid toe en vertoont dan een doorgaande landwaartse verplaatsing van zo'n 700 m tot 2016. De kruinhoogte neemt toe van -1,5 m NAP naar -1,0 m NAP. Tussen 2016 en 2020 wordt de bank vooral steiler en hoger aan de voorzijde. Net als bij de zeewaartse bank is er een grote opbouw tussen 2019 en 2020. De hoogte neemt af tot -0,5 m NAP.

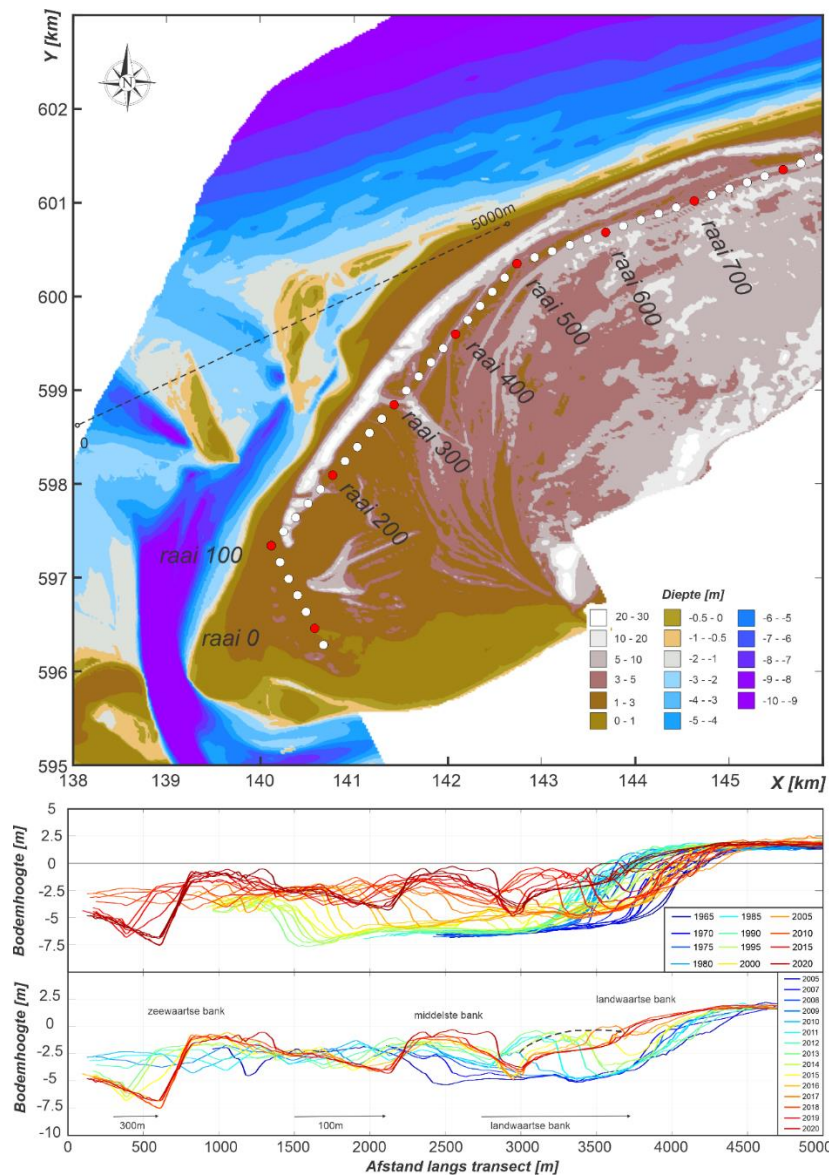
De landwaartse bank is in 2005 nog niet zichtbaar in het profiel. Deze bank vormt zich waarschijnlijk door een herverdeling van de grote bank die in 2005 wel zichtbaar is. Deze bank vormt daarna dan zowel de middenbank als de landwaartse bank. De landwaartse bank is in 2010 voor het eerst duidelijk zichtbaar op een afstand van ongeveer 2000 m. De bank neemt snel in hoogte toe van -2,4 m NAP naar -0,4 m NAP in 2014. Ook de breedte neemt dan toe. De bank migreert naar de kust waardoor de vooroever rond 2016 sterk uitbouwt. Sinds 2017 ligt de kust op de 0 m contour bijna 600 m verder zeewaarts dan in 2019. Ongeveer 300 m van deze zeewaartse verplaatsing vond plaats tussen 2005 en 2010. De overige 300 m vond plaats door aanlanding van de bank.

In de periode 2015-2020 vertonen de banken geen duidelijke migratie richting de kust. De banken stabiliseren vrijwel in positie, maar nemen wel sterk in grootte toe. Er vormt zich zo een groot haakvormig bankcomplex tussen raai 200 en raai 500. Deze haakvorm verklaart de grote toename in hoogte en volume tussen 2019 en 2020. In de luwte van deze haak kan

sediment makkelijk neerslaan. Volledige aanlanding van deze bank lijkt aanstaand. De strandlijnen zullen na aanlanding relatief ver zeewaarts verplaatsen omdat deze bankaanlanding veel groter is dan de eerder geobserveerde aanlandingen.

De veranderingen in bankaanlandingen hebben een direct effect op de achterliggende kustlijn zoals in de satellietopname in Figuur 3-7 goed zichtbaar is. Lokaal kan de kustlijn sterk uitbouwen of terugtrekken, afhankelijk van de ligging van de bank en eventueel trog. De banken landen oostelijk van raai 300 aan en met een netto west-oost gericht transport vindt er weinig transport in westelijke richting plaats, waardoor deze bankaanlandingen niet bijdragen aan het oplossen van de BKL-overschrijding in het interessegebied.

De verandering in het gedrag van de bankaanlandingen laat ook zien dat de sediment uitwisseling tussen buitendelta en kust door de tijd veranderd is. Na afsluiting van de Zuiderzee zijn de Noordwest en Noordergronden sterk in volume afgenomen. Een deel van dit volume zal richting de eilandkust zijn verplaatst. Met afnemend volume van de buitendelta zal deze zandtoevoer ook afnemen.



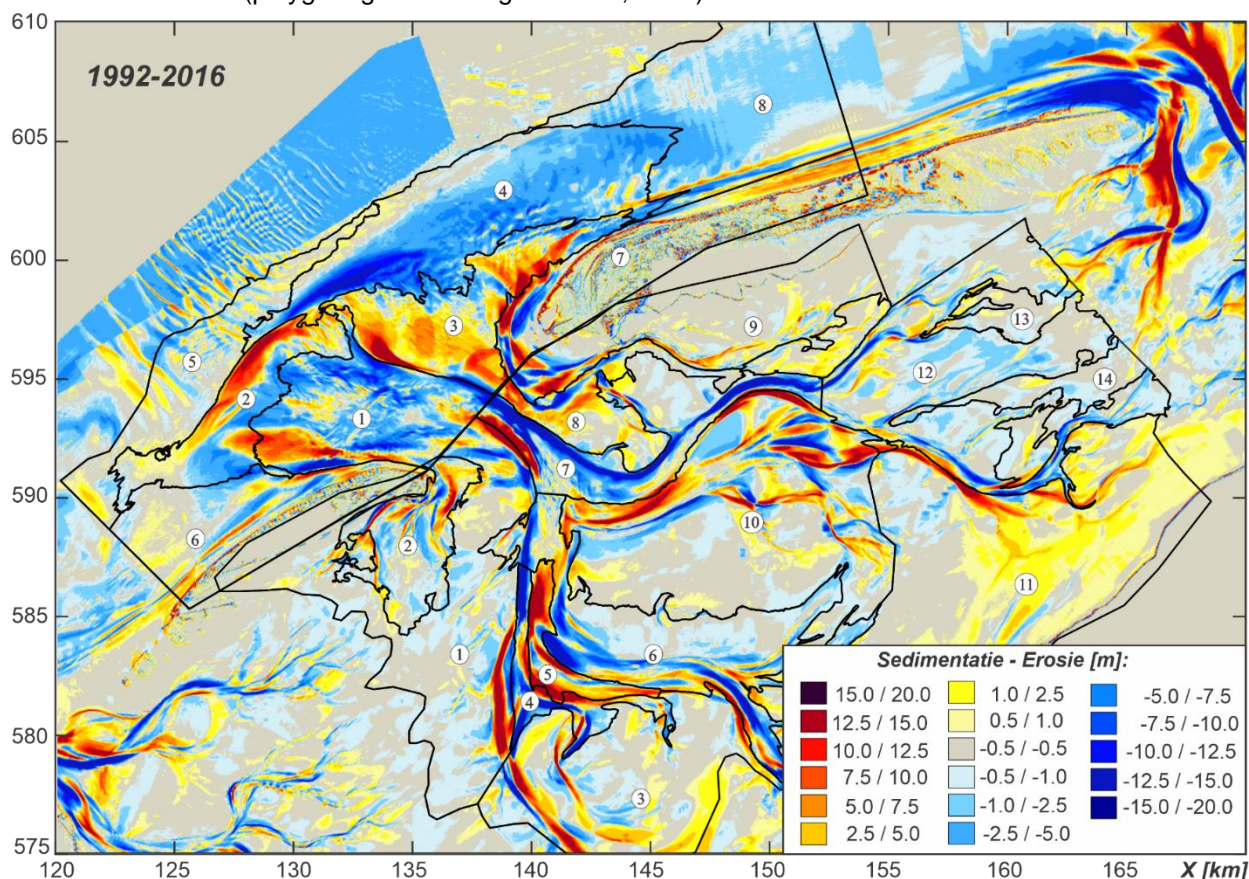
Figuur 3-7, Boven: Eilandkop van Terschelling op basis van de 2020 Jarkus meting. Midden: tijdseries (5-jaarlijks) van een raai, getrokken over de aanlandingsbanken over de periode 1965-2020. Onder, om de ontwikkelingen gedurende de laatste 15 jaar beter in beeld te brengen, jaarlijkse bodemligging voor 2005-2020.

## 4 Volumeveranderingen van de buitendelta en de aanlandingsbanken

In dit hoofdstuk worden de sedimentvolumeveranderingen van de buitendelta uitgewerkt. De volumeveranderingen zijn op 2 manieren bepaald. De eerste methode gebruikt de individuele sedimentatie- en erosiegebieden als basis en is uitgewerkt in Elias (2021). De volumeveranderingen over de periode 1992-2016 zijn hier samengevat (Hoofdstuk 4.1). Een tweede analyse gebruikt de 'actieve volumebenadering' als basis. De actieve volumes zijn bepaald door per bodem de sedimentdikte t.o.v. de minimum bodemligging over de beschouwde periode te analyseren. Deze methode is uitgewerkt in Hoofdstuk 4.2 voor de periode 1987-2022. Let op dat beide studies in principe gelijke brondata gebruiken (o.a. Vaklodingen, Jarkus en LiDAR data), maar voor iedere studie de bodems opnieuw zijn geconstrueerd. Daarmee verschilt voor de twee methodes de afbakening van de buitendelta. De verschillen in begrenzing en het iets anders opvullen van missende datapunten of prioritering van de datasets kan hierdoor kleine verschillen in de berekende volumes geven. In Hoofdstuk 4.3 worden de volumes van de banken voor de kust van Terschelling bepaald voor de periode 1987 tot 2022.

### 4.1 Sedimentatie- en erosievolumes van het zeegat (uit: Elias, 2021)

Sinds 1992 hebben er grote volumeveranderingen op de buitendelta plaatsgevonden (Figuur 4-1). Deze zijn in kaart gebracht voor 8 morfologische eenheden op de buitendelta en 14 in het bekken (polygoongrenzen volgens Elias, 2018).



Figuur 4-1: Sedimentatie-erosie patroon van het Zeegat van het Vlie over de periode 1992-2016 (bron: Elias, 2021).

In totaal neemt de kustzone (buitendelta polygoon 1-8) tussen 1992 en 2016 met 95 miljoen m<sup>3</sup> in volume af. Een grote volumeafname treedt op aan de noordoostzijde van de buitendelta (polygoon 4). De volumes van het zeewaartse deel van de buitendelta neemt hier met 98 miljoen m<sup>3</sup> in volume af. Ook in de zeewaartse uitstroming van de Vliestroom (polygoon 1) treedt relatief veel erosie op (-35 miljoen m<sup>3</sup>). Een deel van het geërodeerde sediment (14 miljoen m<sup>3</sup>) belandt in de voorliggende Westergronden (polygoon 2). Vanaf de Westergronden zal ook een transport naar de Noordwestgronden zijn optreden. Op het landwaartse deel van de buitendelta is 33 miljoen m<sup>3</sup> aan sedimentatie opgetreden (polygoon 3).

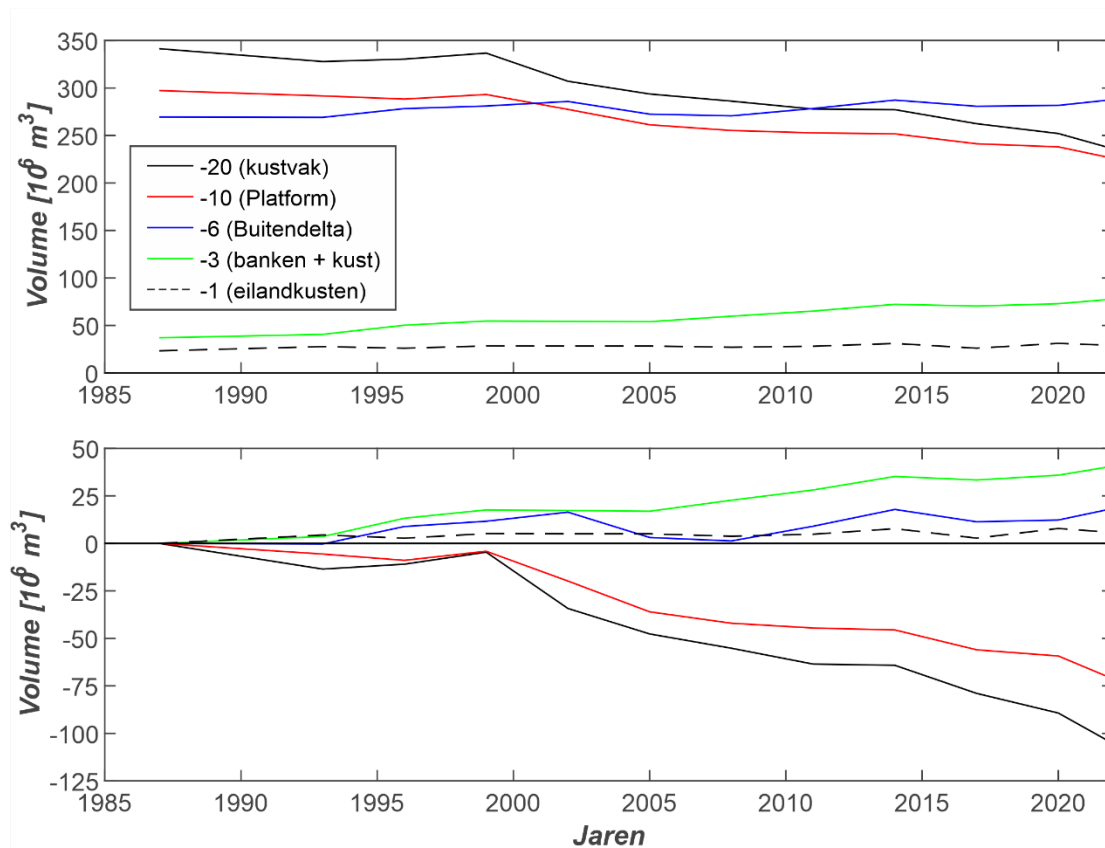
De erosie van de buitendelta is ruwweg 2x groter dan de sedimentatie in het bekken (Tabel 4-1). De totale sedimentatie in het bekken is 44 miljoen m<sup>3</sup>. De meeste sedimentatie (52 miljoen m<sup>3</sup>) treedt op de Vlake van Oosterbierum (polygoon 11). De bankgebieden Richel/Waardgronden (polygoon 1), Lange Zand (deelpolygoon 3) en Grienderwaard/Ballastplaat (deelpolygoon 10) vertonen een sedimentatie van rond de 72 miljoen m<sup>3</sup>. Erosie vindt vooral plaats in het geulenstelsel van de Vliestroom en Blauwe Slenk (polygoon 6): -88 miljoen m<sup>3</sup>. Ook de oostelijke uitstroom van de geulen van de Noord- en Westmeep neemt in sedimentvolume af (polygoon 12, -21 miljoen m<sup>3</sup>).

Tabel 4-1: Overzicht van de volumeveranderingen van de buitendelta voor 8 deelpolygonen over de periode 1992-2020. Voor de definitie van platen en geulen zie Figuur 4-1.

Gebied	Opp. [km <sup>2</sup> ]	Volume verandering [10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]	Trend [10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jaar]	Hoogte Verandering [cm]
<i>Buitendelta</i>				
1	37	-35	-1,32	-121
2	24	14	0,43	-94
3	33	31	1,20	57
4	60	-98	-3,46	95
5	29	-3	-0,13	-162
6	39	6,3	0,13	-9
7	39	19	0,64	16
8	58	-30	-1,12	48
<i>Totaal</i>	<i>321</i>	<i>-95</i>	<i>-3,64</i>	<i>-30</i>
<i>Bekken</i>				
1	69	15	0,51	22
2	22	3	0,14	14
3	62	27	0,95	44
4	10	-14	-0,65	-140
5	8	28	1,07	335
6	60	-40	-1,64	-67
7	31	-48	-1,90	-154
8	25	12	0,33	48
9	35	0	0,04	-1
10	94	30	1,11	32
11	134	52	1,92	39
12	69	-21	-1,02	-30
13	8	0	-0,01	6
14	16	0	-0,01	1
<i>Totaal</i>	<i>600</i>	<i>44</i>	<i>0,85</i>	<i>7</i>

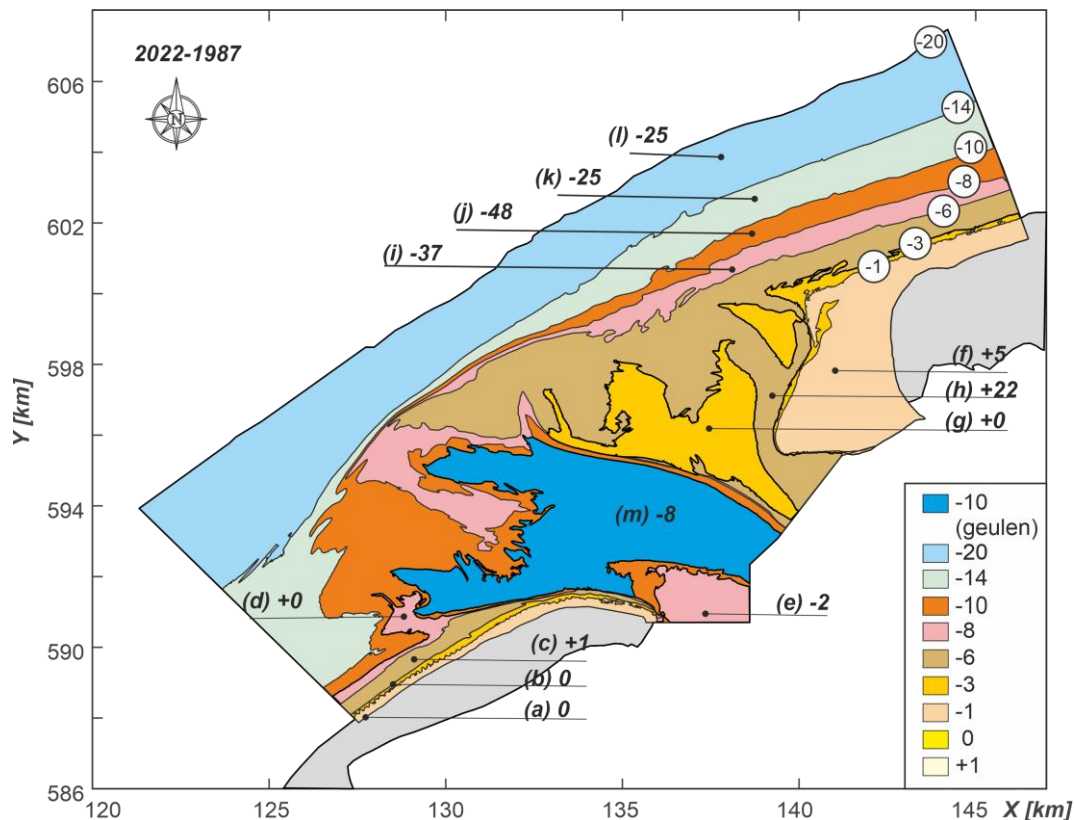
## 4.2 Volumeveranderingen per diepteklasse

De 'actieve volumebalans' over de periode 1987-2022 van het gehele kustvak (de buitendelta vanaf -20 m diepte), zoals weergegeven in Figuur 4-2, laat een afname in sedimentvolume zien. Het actieve volume is afgenomen van 341 miljoen m<sup>3</sup> in 1987 naar 236 miljoen m<sup>3</sup> in 2022. Dit is een afname van 105 miljoen m<sup>3</sup> ofwel 3,05 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Een klein deel van dit verlies (8 miljoen m<sup>3</sup>) treedt op in de diepe geulen, maar het merendeel treedt op in de vooroever. De vooroever tussen de -20 en -10 m NAP contour neemt af met 49 miljoen m<sup>3</sup> en de zone tussen de -10 en -6 m NAP neemt met 86 miljoen m<sup>3</sup> in volume af. Een deel van de verliezen in de vooroever wordt landwaarts getransporteerd en draagt bij aan de geobserveerde aanzanding in de ondiepe zone. De kustzone van Vlieland (boven de -6 m NAP contour) neemt met 2 miljoen m<sup>3</sup> in volume toe, maar het merendeel van de toename vindt plaats op het platform van de buitendelta. De banken en kustzone van Terschelling omsloten door de -6 m NAP contour nemen met 28 miljoen m<sup>3</sup> in volume toe. Deze toename vertoont een trendwaarde van +0,79 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Het merendeel van deze toename (+ 23 miljoen m<sup>3</sup>) vindt op de buitendelta plaats (zeewaarts van de -1m contourlijn). De kustzone van Vlieland landwaarts van de -1m contour vertoont in deze periode slechts een kleine toename van iets meer dan 2 miljoen m<sup>3</sup>. De volumeveranderingen per dieptecontourklasse zijn samengevat in Figuur 4-3 en Tabel 4-2.



Figuur 4-2: Een samenvatting van de absolute sedimentvolumes per diepteklasse (boven) en relatieve volumeveranderingen per klasse (onder) in het Zeegat van het Vlie tussen 1985 en 2020. De legenda geeft de minimumdiepte van elke klasse weer.





Figuur 4-3: Een samenvatting van de volumeveranderingen per contourklasse van de buitendelta van het Zeegat van het Vlie over de periode 1987 – 2022 (zie Tabel 4-2 voor onderliggende waarden).

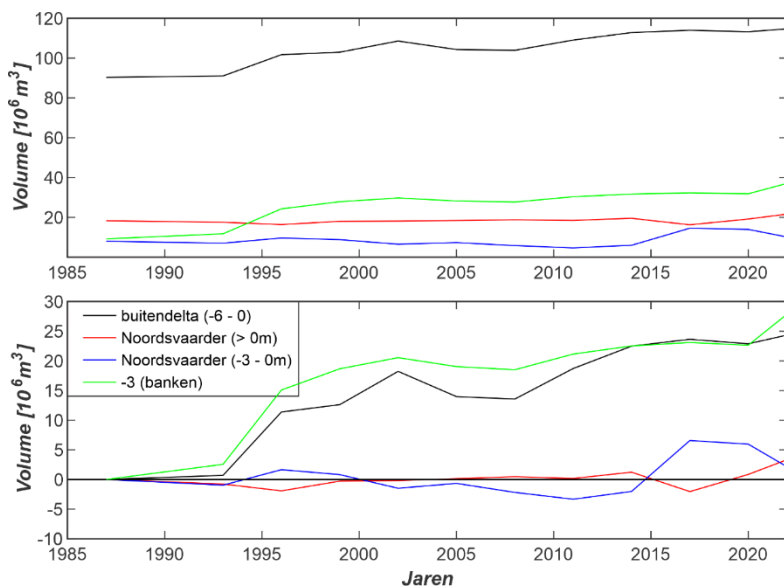
Tabel 4-2: Samenvatting van de volumeontwikkeling per dieptezone.

Gebied		Contour	dV		dH		Trends		
			10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jr	m	mm/jr	1987 - 2022		
a	kust Vlieland	> -1m	+0,63	+0,02	+0,28	+8	+0,05		
b	kust Vlieland	-1 - -3m	+0,37	+0,01	+0,31	+9	0		
c	Kust Vlieland	-3 - -6m	+1,43	+0,04	+0,68	+19	+0,08	1987-2008	-0.00
								2011-2022	-0.04
d	Kust Vlieland	-6 – -8m	+0,23	+0,01	+0,07	+2	-0,16		
e	Vlieland (geul)	< -6	-1,75	-0,05	-0,48	-14	-0,05		
a,b,c	Kust Vlieland	> -6m	+2,43	+0,07	+0,40	+11	+0,12		
f	Kust Terschelling	> -1 m	+5,10	+0,15	+0,32	+9	+0,08		
g	Kust Terschelling	-1 - -3m	+0,38	+0,01	+0,19	+6	+0,09		
h	Kust Terschelling	-3 - -6m	+22,21	+0,63	+0,47	+13	+0,58		
i	Kust Terschelling	-6 – -8m	-37,03	-1,06	-1,91	-55	-1,12		
f,g,h	Kust Terschelling	> -6m	+27,69	+0,79	+0,42	+12	+0,76		
	Buitendelta totaal	-10 - -1m	-61,88	-1,77	-0,47	+14	-1,80		
j	Buitendelta	-8 -10m	-47,72	-1,36	-0,93	-27	-1,23		
k	Vooroever	-10- -14m	-24,54	-0,70	-0,99	-28	-0,71		
l	Vooroever (diep)	-14- -20m	-24,61	-0,70	-0,49	-14	-0,65		
m	Geulen	< -10m	-8,08	-0,23	-0,48	-14	-0,28	1987-1999	+0.61
								1999-2022	-0.66
a-m	Totale Kustvak	-20 - AZ	-105,30	-3,01	-0,47	-13	-3,05	1987-2008	-3.90
								2011-2022	-1.09

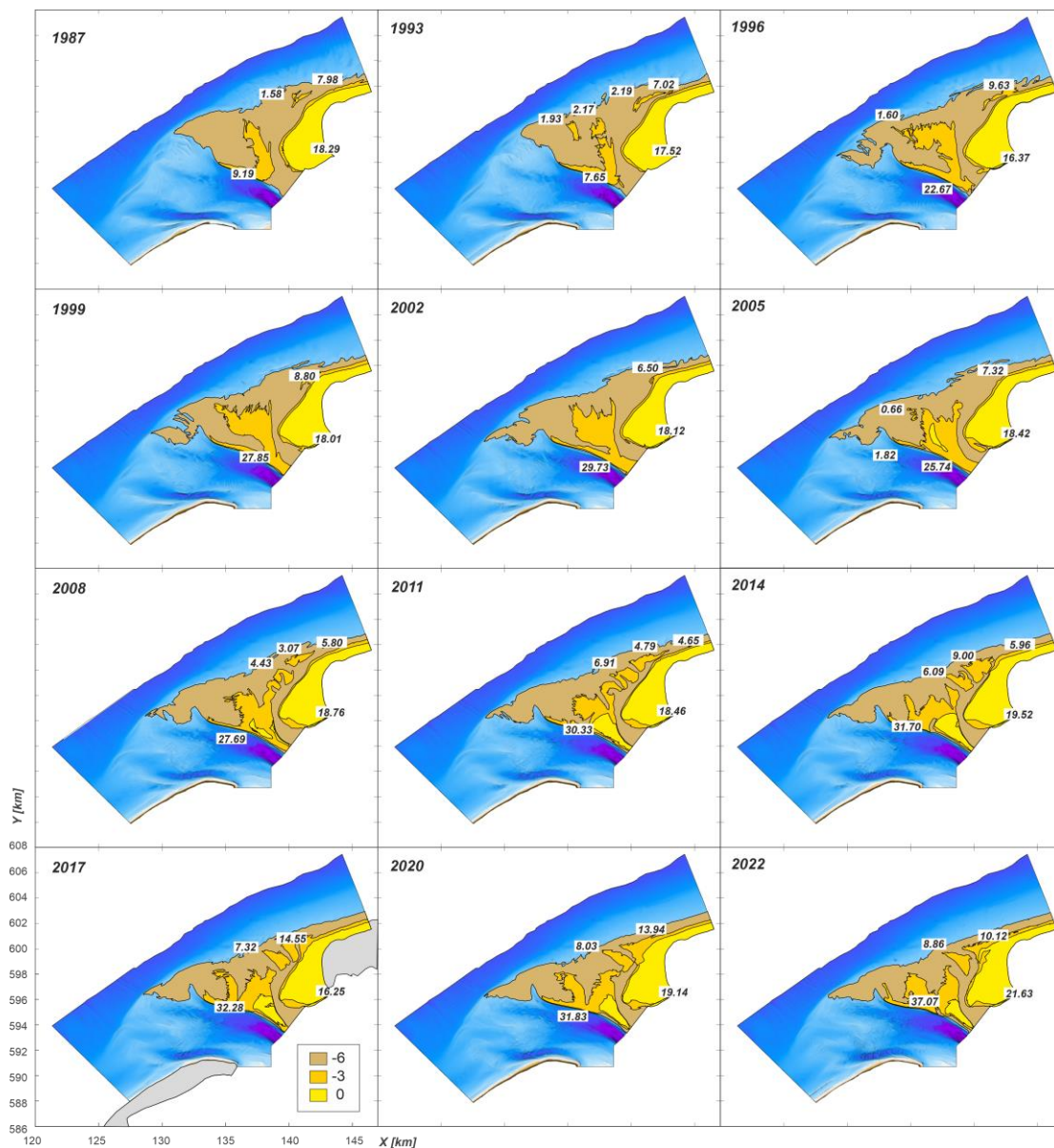
### 4.3 Volumeveranderingen van de aanlandingsbanken

In voorgaande hoofdstukken zijn de aanlandingen van banken op de Noordsvaarder al in detail uitgelegd. Met behulp van de 'actieve volumebalans' kan een schatting gemaakt worden van de bijbehorende sedimentvolumes (Figuur 4-4 en Figuur 4-5). Het onderliggende platform van de buitendelta, 'buitendelta', is hierbij gedefinieerd door de zeewaartse -6 m NAP contour, de -6m contour van de Vliestroom en de landwaartse 0 m NAP contour, zie de bruine polygoon in Figuur 4-5. De polygoon 'Noordsvaarder' geeft het sedimentvolume van de kustzone tussen de -3 en -0 m NAP weer, en de polygoon van de strandvlakte van de eilandkop het volume boven de 0 m NAP contourlijn. De individuele banken op de buitendelta worden bepaald aan de hand van de -3 m NAP contourlijnen. Vanaf de -3 m contour kan een individuele bank in alle jaren gedetecteerd worden. Op basis van de actieve volumebalans kan worden geconcludeerd dat:

1. Het totale actieve volume van het onderliggende platform (inclusief de banken) neemt toe van 90 miljoen m<sup>3</sup> in 1987 tot 106 miljoen m<sup>3</sup> in 2022, zie de zwarte lijn in Figuur 4-4. Deze toename vertoont een vrijwel lineair verloop met een trendwaarde van 0,69 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.
2. De eilandkop (Noordvaarder; rode lijn Figuur 4-4), neemt in deze periode toe van 18 miljoen m<sup>3</sup> in 1987 tot 22 miljoen m<sup>3</sup> in 2022. Deze toename vertoont een verloop met een trendwaarde van 0,06 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.
3. De banken op het gehele buitendeltaplatform van het Zeegat van het Vlie nemen in totaal met 35 miljoen m<sup>3</sup> toe (zie Figuur 4-2; groene lijn). Het merendeel van deze toename zit in de centrale bank voor Terschelling (Wester, Noorder- en Noordwestgronden), zie de groene lijn van Figuur 4-4 (+ 28 miljoen m<sup>3</sup>).
4. De grootte en het volume in de aanlandingsbanken varieert sterk door de jaren heen, zie Figuur 4-5. Gemiddeld over de gehele periode bedraagt het volume 10 miljoen m<sup>3</sup>. Het grootste volume 12- 15 miljoen m<sup>3</sup> was in de periode 2011-2014 aanwezig.
5. Niet alleen het volume maar ook het aantal aanlandingsbanken varieert door de tijd heen. Kleine aanlandingsbanken, zo'n 2 miljoen m<sup>3</sup> in volume, zijn zichtbaar in 1987 en 1993. Er volgt dan een periode, 1999-2005, waarin geen banken zichtbaar zijn. Vanaf 2008 zijn er dan meestal 2 grote banken aanwezig. Deze banken nemen sterk in volume toe tot ze aanlanden op de kust.



Figuur 4-4: Boven: tijdseries van volumeontwikkeling van de eilandkop van Terschelling en de aanlandingsbanken op de buitendelta van het Zeegat van het Vlie. Onder: tijdseries van de volumeverschillen t.o.v. 1985 voor de eilandkop en de aanlandingsbanken.



Figuur 4-5: Een overzicht van de sedimentvolumes in de eilandkop van Terschelling en binnen de aanlandingsbanken op de buitendelta van het Zeegat van het Vlie. Volumes gebaseerd op het actieve volume binnen de -3m contourlijn over de periode 1987-2022.

## 5 Modelling

Morfostatische simulaties waarin de modelbodem niet verandert tijdens de simulatie, maar waarin de initiële sedimenttransporten worden berekend, vormen een efficiënte methode om de (initiële) impact van een suppletie in kaart te brengen. De verandering in sedimenttransport door aanleg van de suppletie (T1) wordt dan vergeleken met de berekende transporten zonder deze suppletie (T0). Deze veranderingen verschaffen een beeld van de mogelijke effecten van de suppletie op de processen en gerelateerde transporten en kunnen dan op basis van expert judgement verder geanalyseerd worden. Op deze manier kunnen we zonder het volledig doorrekenen en voorspellen van de morfologische veranderingen toch voldoende inzicht krijgen in de werking van de verschillende suppleties. In dit hoofdstuk behandelen we het gebruikte model, de gebruikte (rooster)schematisaties en randvoorwaarden. Ook wordt een overzicht gegeven van de uitgevoerde simulaties en de geïmplementeerde suppletievarianten.

### 5.1 Het Delft3D-FM model

#### 5.1.1 Modelschematisatie en rekenrooster

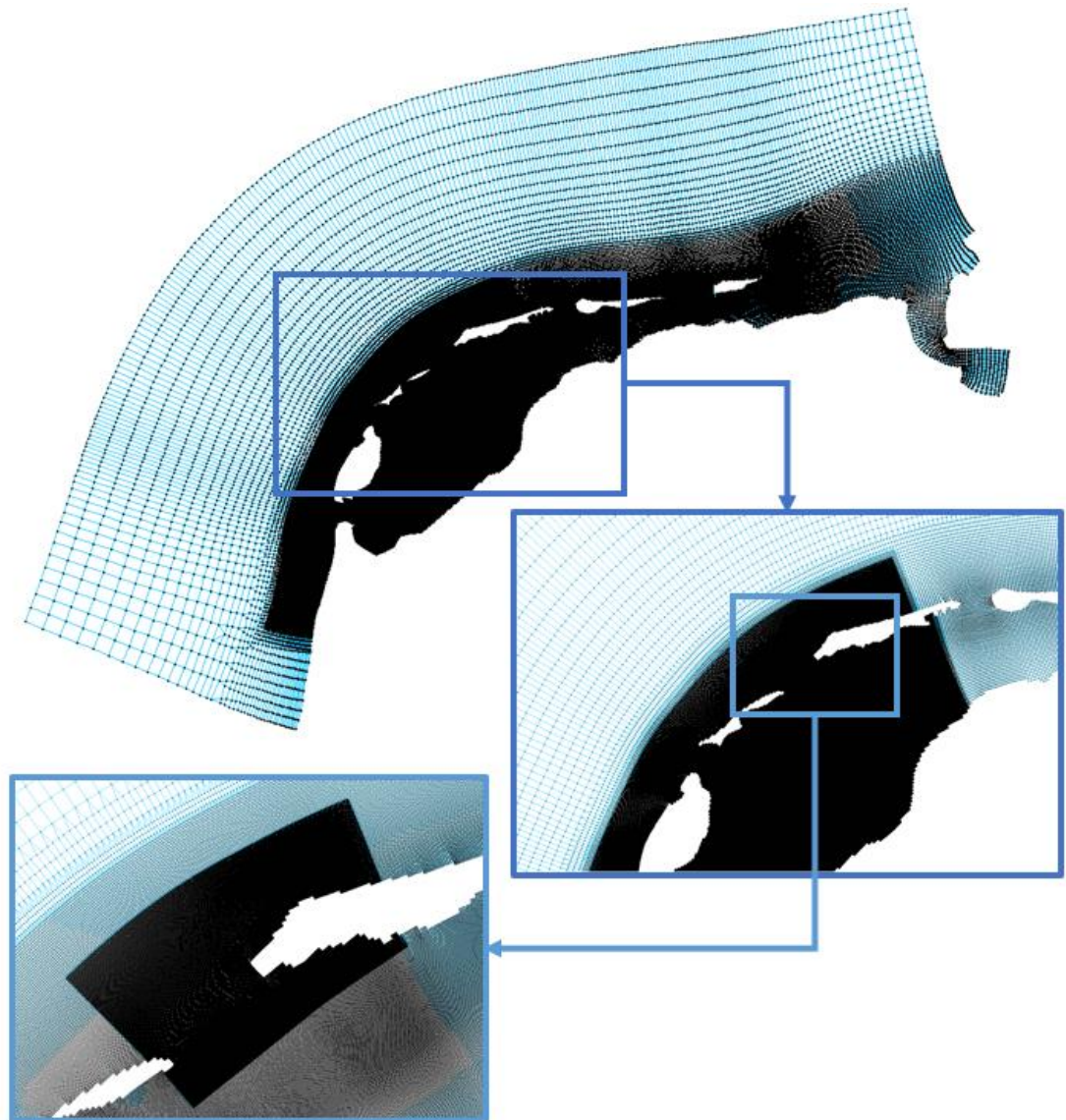
De simulaties zijn uitgevoerd met het Delft3D Flexible Mesh (FM) stromings- en sedimenttransportmodel van de gehele Waddenzee (Figuur 5-1). De basis van dit FM-model is het Delft3D 4 (gestructureerde) Waddenzee model (De Graaff, 2009). Dit model is door Laan (2019) omgezet naar een FM rekenrooster en verder hydrodynamisch afgeregeld. Het rooster is verder geoptimaliseerd in resolutie. In de Waddenzee en de zeegaten heeft dit model een resolutie van rond de 200-300m.

Het Waddenzee FM model is van voldoende resolutie om grootschalig de getijvoortplanting en stromingen in de Waddenzee door te rekenen, maar niet gedetailleerd genoeg voor de doorrekening van de suppletievarianten. Voor het zeegat het Vlie is het domein hierom verder verfijnd tot 30-50 m zodat er voldoende resolutie ter plaatse van de suppletielocaties aanwezig is (Figuur 5-1). Alle modelsimulaties worden dieptegemiddeld (2DH) uitgevoerd. Deze keuze lijkt gerechtvaardigd, omdat er geen grote dichtheidseffecten worden verwacht en de modelering zich richt op zandtransport.

De open-zee randvoorwaarden zijn voorgeschreven als waterstanden en verkregen door het nesten van het Waddenzee FM model in het grootschalige Noordzee model DCsMv6-ZuNov4 (Zijl et al., 2013). Het Waddenzee FM model is door middel van de bodemruwheid gekalibreerd op een nauwkeurige weergave van de waterstanden in de diverse meetstations van de Waddenzee en Noordzee. Een Manning ruwheid van  $0,023 \text{ s/m}^{1/3}$  geeft hierbij de beste resultaten. Een vergelijking tussen de modelresultaten en de metingen van de waterstanden in de Waddenzee en kustzone geeft een gemiddelde root-mean-square-error (RMSE) van 10 cm (Laan, 2019). Een verdere kalibratie van het model voor deze studie is dan ook niet nodig, omdat met deze foutmarge het getij in de Waddenzee al voldoende nauwkeurig wordt weergegeven en de essentiële karakteristieken (zoals asymmetrie en residuele stroming) al goed opgelost worden. De analyse van de modelresultaten vergelijkt de verschillen tussen 2 model simulaties (T0 en T1) en geeft daarmee inzicht in het relatieve verschil tussen een ingreep en de basissituatie.

Voor efficiënte simulaties wordt een morfologisch getij gebruikt, dat is afgeleid voor het naastgelegen Amelander Zeegat (Elias et al., 2021). Dit morfologische getij is afgeleid zodat de residuele transportvectoren van dit getij zo goed mogelijk matchen met de jaarlijks gemiddelde transportvectoren. Dit getij vindt plaats tussen 05-08-2017 13:40 tot 06-08-2017

02:00. Ook hier geldt dat de exacte keuze van het getij eigenlijk niet van belang is omdat we een model-model vergelijking uitvoeren. Het volledig opnieuw afleiden van de morfologisch representatieve periode voor het Zeegat van het Vlie zal geen betere of andere modeluitkomsten genereren en is daarom niet uitgevoerd.



*Figuur 5-1: Modeldomein van het Waddenzee model (boven) en ingezoomd op het interessegebied, het zeegat de Vlie (onder).*

### 5.1.2 Sedimenttransport

Sediment transport is berekend op basis van de Van Rijn transportformule (Van Rijn, 2007a,b,c). Deze transportformule is direct geïmplementeerd in de FM stromingsmodule, waardoor elke rekentijdstap de transporten worden uitgerekend. Lesser et al. (2004) geven een uitleg hoe de formuleringen zijn geïmplementeerd in Delft3D 4, deze aanpak is ook voor Delft3D FM geldig. In de Van Rijn formulering worden zowel de bodem- als suspensieve transporten berekend en bij elkaar opgeteld. De bodemtransporten representeren de transporten die langs de bodem plaatsvinden en zijn gebaseerd op een parametrische formulering die ook het effect van golven meeneemt. De suspensietransporten representeren de transporten in de waterkolom plaatsvinden en worden berekend met een advection-diffusie

vergelijking. De modelsommen gaan uit van een bodemsamenstelling met onbeperkte hoeveelheid sediment met een mediane (D50) korreldiameter van 200  $\mu\text{m}$ . Deze korreldiameter wordt gezien als representatief 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 buitendelta 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 sedimenttransporten verkregen door deze methode 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 golf- en stromingscondities) en voor verschillende bodemconfiguraties (de suppletievarianten) nauwkeurig in kaart worden gebracht. Deze methode maakt het ook mogelijk om lange-termijn transportschattingen te verkrijgen zonder dat hier zeer rekenintensieve modelsommen voor gemaakt moeten worden. Hiervoor worden de transporten over de verschillende golfcondities berekend en de resultaten gewogen bij elkaar opgeteld.

De berekende sedimenttransporten geven 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. Door een vergelijking van de residuele transporten voor de verschillende processen (getij, golven) kan een inschatting van de maatgevende processen en condities worden gemaakt. Veranderingen in de residuele patronen tussen de referentie simulatie en simulatie met het suppletieontwerp 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.

### 5.1.3 Golven

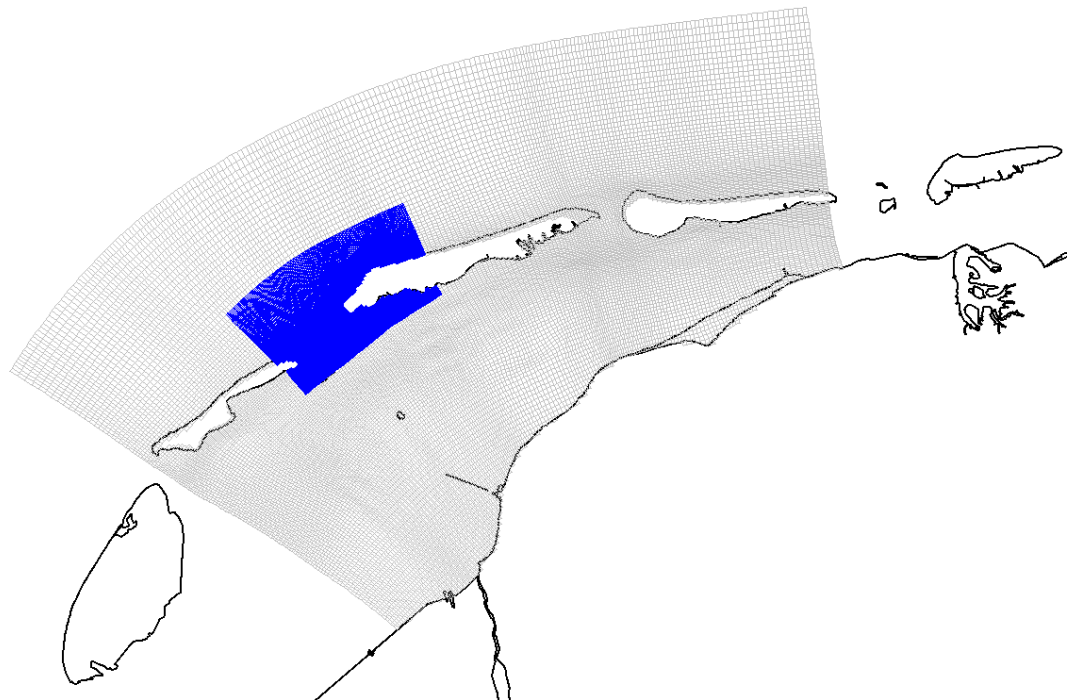
In de grote geulen worden de sedimenttransporten gedomineerd door het getij. Op de ondieptes van de buitendelta en langs de eilandkusten spelen golven echter ook een belangrijke rol in de sedimenttransporten. Golfbreking zorgt voor de opwekking van golf-gedreven stromingen en de opwoeling van sediment, dat vervolgens door de gecombineerde getij- en golf-gedreven stroming wordt verplaatst. Door koppeling van het stromingsmodel met het SWAN golfmodel kunnen deze effecten meegenomen worden in de simulaties.

Voor een nauwkeurige weergave van de golf-stroom interactie wordt het golfmodel elke 30 minuten opnieuw berekend. Elke 30 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 het FLOW model en meegenomen in de volgende 30 minuten van de stromingsberekening. De gebruikte instellingen van het golfmodel zijn gebaseerd op het Kustgenese model (Nederhoff et al., 2016). SWAN is gerund in 3e-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 2.5 % voor relatieve en absolute golfhoogte verschillen in 98% van de natte roostercellen.

Het SWAN golfrooster is weergegeven in Figuur 5-2, het grootschalige golfrooster is weergegeven in grijs (gemiddelde resolutie 400-600m). Het blauwe rooster toont het verfijnde rooster bij het interessegebied (het Vlie) en heeft een gemiddelde resolutie van 50 tot 70m.

De golfcondities zijn bepaald op basis van de golfboei Eierlandse Gat voor de periode 1989 tot 2017. De golfcondities zijn gebaseerd op een schematisatie van significante golfhoogtes in klassen: 0-1, 1-5 en >5 m. De richtingen zijn gebaseerd op 2 klassen, golven die transport richting Ameland genereren en golven die transport richting Terschelling genereren. Golfhoogtes met een significante golfhoogte van meer dan vijf meter kwamen ongeveer twee procent van de tijd voor, daarom is ervoor gekozen deze golfklasse te verwaarlozen. Tabel 5-1 laat de vier golfklassen zien die gebruikt zijn voor deze modelstudie, welke representatief zijn voor het totale sedimenttransport.



Figuur 5-2: Overzicht van de gebruikte golfroosters in het Waddenzee model. Het grijze rooster geeft het grootschalige golfrooster weer en het blauwe rooster de verfijning bij het Vlie.

Tabel 5-1: Informatie per golfklasse voor het Waddenzee model.

Golfklasse	Significante golfhoogte [m]	Gemiddelde golfperiode [s]	Richting [°]	Kans van voorkomen [%]
1	0,71	4	224	12
2	0,68	4	353	30
3	2,06	5	235	20
4	2,03	6	328	36

## 5.2 SedTRAILS

Op basis van de berekende sedimenttransporten van het Delft3D model kan meer inzicht worden verkregen in het morfologische systeem en de impact of verstoring van de verschillende suppletie varianten op dit systeem. Een veel gebruikte analysemethode is het afleiden van de residuele transporten. Veranderingen in de residuele patronen geven dan inzicht in de toekomstige morfologische veranderingen.

Naast de berekening van de residuele transporten wordt de SedTRAILS methode gebruikt om de sedimenttransporten in het gebied van interesse en de relatie met het omliggende systeem verder in kaart te brengen. SedTRAILS, (Sediment TRANsport vIsualization & Lagrangian Simulator) is geen nieuwe of apart uit te voeren modelsimulatie maar een nabewerking op de resultaten van de al uitgevoerde sedimenttransportmodellering. Op basis van de in Delft3D berekende sedimenttransportvectoren worden transportpaden berekend. In Figuur 5-3 wordt een voorbeeld van de methode getoond (zie Elias et al. 2020 voor een uitleg).

Deze transportpaden illustreren hoe sediment zich door het systeem verplaatst en stellen ons in staat fenomenen zichtbaar te maken als:

- Waar sediment van een bepaalde bron zich heen verspreidt;
- Vanwaar het sediment komt dat op bepaalde plekken accumuleert;
- Langs welke wegen het sediment reist tussen twee punten.

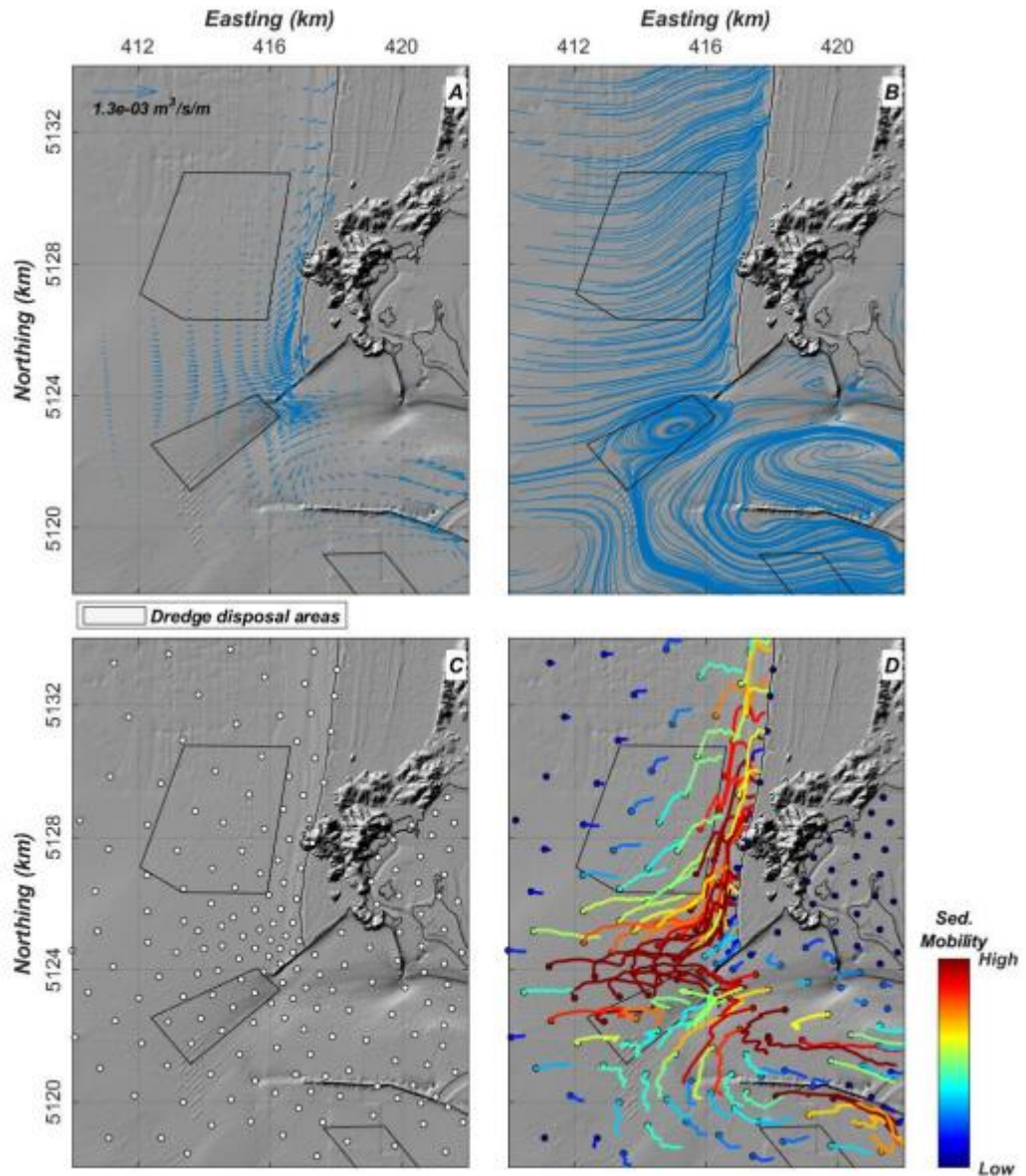
Met reguliere Delft3D modellering zouden deze vragen niet direct kunnen worden beantwoord. Er zouden dan aanvullende “particle-tracking” simulaties, met software zoals Delft3D PART, moeten worden gemaakt. Een nadeel van deze modellen is echter dat ze veel rekentijd kosten en de Van Rijn transportformulering niet geïmplementeerd is. Dit maakt het lastig om de resultaten onderling te vergelijken. Omdat SedTRAILS de al berekende transportvectoren gebruikt speelt dit probleem hier niet. Door middel van SedTRAILS onderzoeken we of en hoe de suppletievariant op de grotere schaal van het zeegat invloed kan uitoefenen.

Vanuit de berekende sediment transporten worden de suppletievariant(en) met de waarschijnlijk grootste ruimtelijke beïnvloeding geselecteerd. Voor deze varianten worden de sedimenttransportpaden gevisualiseerd door 500 bronnen aan te brengen verspreid over het zeegat (Figuur 5-4A). Deze bronnen zijn evenwichtig verdeeld over de verschillende morfologische elementen (de karakteristieke geulen en platen). Daarnaast zijn er bronnen, in hoge resolutie, aangebracht ter plaatse van de suppletielocaties om de transportpatronen vanaf de suppletielocaties weer te geven (Figuur 5-4B). Ten derde zijn er bronnen geplaatst langs zes transecten bij de kust van Terschelling-West (Figuur 5-4C).

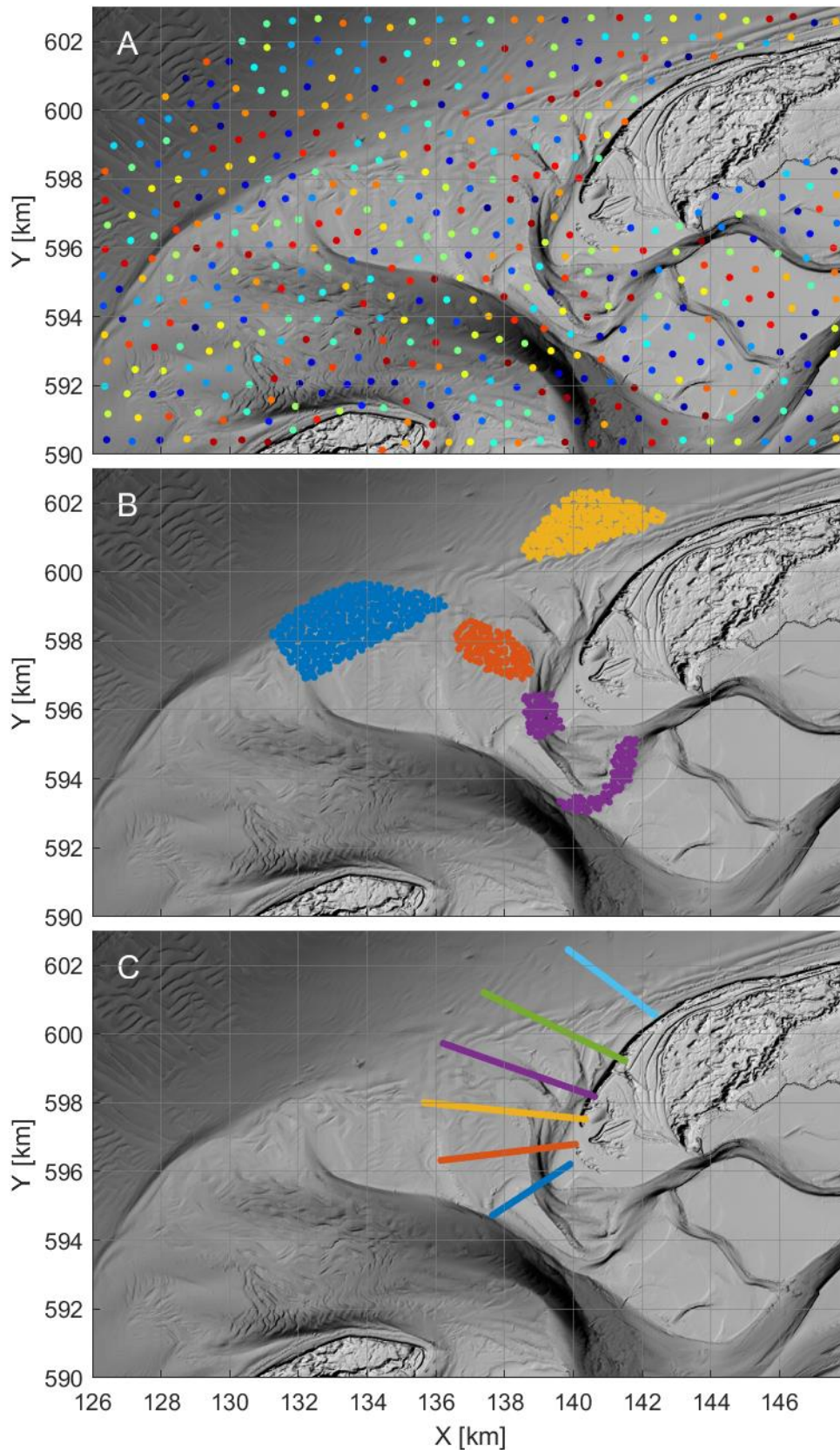
Als basis van de SedTRAILS berekening wordt een morfologisch, jaarlijks representatief, getij gebruikt. Voor iedere suppletievariant worden hiervoor de per golfconditie berekende 10-minuten gemiddelde sedimenttransporten gewogen bij elkaar opgeteld. Er ontstaat zo een tijdserie van sedimenttransporten die de jaarlijks gemiddelde condities representeert. Deze tijdserie dient als basis voor SedTRAILS. SedTRAILS wordt vervolgens in “cyclische mode” gedraaid, waarbij de tijdserie van gewogen sedimenttransporten een x aantal keer wordt herhaald. Hierdoor kunnen goed ontwikkelde transportpaden worden gegenereerd. Dit wil zeggen dat deze transportpaden voldoende lang zijn om de uitwisseling van het deeltje met de omliggende morfologische eenheden weer te geven. In de huidige implementatie van SedTRAILS is de verplaatsingssnelheid van de deeltjes nog niet gekalibreerd, maar gekozen op basis van numerieke stabiliteit van de uitkomsten. De transportpaden geven wel aan hoe een deeltje beweegt, maar de snelheid van verplaatsing heeft nog geen fysische betekenis. De absolute verplaatsing heeft geen waarde, maar de relatieve verplaatsing van het ene deeltje



ten opzichte van andere deeltjes geeft wel aan of er verschillen in dynamiek of transportsnelheid aanwezig zijn.



Figuur 5-3: 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 dan op basis van de stroomlijnen propageren door het rekenrooster. Het stroomlijnenveld 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 betekent meer verplaatsing dan een kortere staart (uit: Elias et al., 2021).



Figuur 5-4: Startpositie van de sources voor SedTRAILS. (A) gelijkmatig verdeelde sources over het gehele mondingsgebied; (B) Sources startend vanaf de verschillende suppleties; (C) 6 transecten bij Terschelling-West.

## 5.3 Overzicht van de modelsimulaties en suppletievarianten

Het Waddenzee Delft3D model is gebruikt om een referentie simulatie (T0) met de 2022 bodem door te rekenen gevolgd door simulaties van vier suppletievarianten. Alle simulaties gebruiken identieke randvoorwaarden (getij en golven) en instellingen.

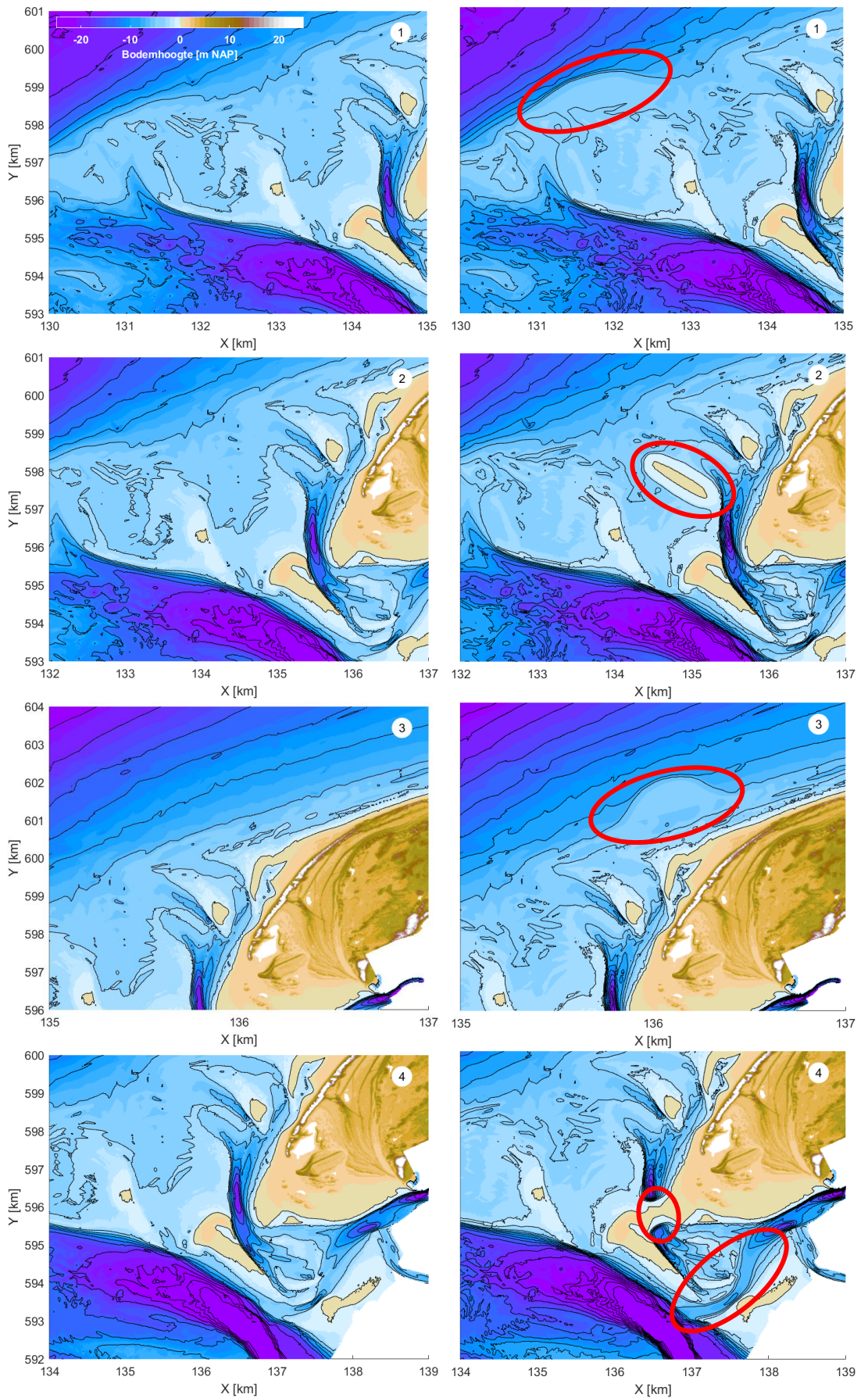
### **Referentie simulatie (T0 – 2022)**

De T0 simulatie gebruikt een bodem die bestaat uit meerdere databronnen. De data van het mondingsgebied is gemeten in 2022. De data van het bekken achter de monding komt uit 2017. De T0 bodem is gebruikt als referentie en vormt de basis voor de verschillende suppletieontwerpen (Figuur 5-5; linker kolom).

### **Samenwerkdag suppletieontwerpen**

Tijdens de samenwerkdag in mei 2023 zijn er vier suppletielocaties bepaald. Hierna zijn 4 suppletieontwerpen gedefinieerd met ieder een volume van ~5 miljoen m<sup>3</sup>. De resulterende bodems en de referentie (T0) bodem worden weergegeven in Figuur 5-5.

- 1) *Suppletievariant 1*: een buitendeltasuppletie met als doel het zandvolume in de buitendelta te vergroten. Dit zorgt ervoor dat er ook op lange termijn voldoende sediment op de buitendelta aanwezig blijft voor de vorming van aanlandingsbanken. In deze variant wordt de zeewaartse rand van de Westergonden opgevuld tot een hoogte van -5 m NAP. Een suppletie van 5,4 miljoen m<sup>3</sup> beslaat dan een oppervlakte van 7,5 km<sup>2</sup>. Een kleinere oppervlakte kan worden bereikt door het ophogen van de suppletie, uitvoeringstechnisch is dit echter minder praktisch;
- 2) *Suppletievariant 2*: deze suppletie wordt uitgevoerd op de Noordergronden. Hier wordt direct een extra aanlandingsbank gecreëerd door over een oppervlakte van 2,5 km<sup>2</sup> de bodem op te vullen tot 0 m NAP. Voor deze variant is 4,5 miljoen m<sup>3</sup> aan sediment benodigd;
- 3) *Suppletievariant 3*: deze suppletie wordt uitgevoerd aan de rand van de buitendelta, op de Noordergronden. Dit gebied wordt gekenmerkt door een grote natuurlijke erosie en is dan waarschijnlijk ook een goede dispersieve locatie om zand in het systeem te verspreiden. Binnen de suppletiepolygoon is de bodem opgevuld tot -5 m NAP over een oppervlakte van 4,6 km<sup>2</sup>. Voor deze suppletie is dan 4,3 miljoen m<sup>3</sup> zand benodigd;
- 4) *Suppletievariant 4*: deze variant is een geulsuppletie in het Boomkensdiep. De suppletie sluit het Boomkensdiep geheel af. Tevens is de verbinding tussen het Schuitengat en Vliestroom vergroot. Het Boomkensdiep is hierbij opgevuld tot 0 m NAP, waarvoor 5 miljoen m<sup>3</sup> aan sediment benodigd is. Een deel van dit suppletiezand komt uit de verdieping van het drempelgebied tussen Schuitengat en Vliestroom. Een verdieping van dit drempelgebied tot -7 m NAP levert 1,8 miljoen m<sup>3</sup> aan sediment.



Figuur 5-5 Bodem van het T0 model (linker kolom) en de verschillende suppletievarianten (rechts; 1-4).

## 6 Modelresultaten

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van de modelsimulaties, waarbij de gepresenteerde analyses bestaan uit twee delen. Het eerste deel van de analyse beschrijft de stromingen en transporten op basis van de T0 situatie. De T0 geeft een representatief beeld van de huidige situatie (2022 bodem) vóór aanleg van de suppletie. Een goed begrip van het functioneren van het systeem voor aanleg van de suppletie is essentieel om de invloed van de suppletie goed te begrijpen. Het tweede deel richt zich op de simulaties van de suppletievarianten (T1 situatie).

Ten behoeve van de leesbaarheid zijn voor de suppletievarianten enkel de figuren met de (verschillen in) sediment transporten getoond. In Appendix A zijn ook figuren te vinden van de gemiddelde stroomsnelheid, gemiddelde schuifspanning en gemiddelde golfhoogte over het morfologisch getij. Deze afbeeldingen zullen verder niet behandeld worden in dit rapport, maar dienen ter ondersteuning voor de keuze van een suppletievariant.

Een probleem in het weergeven van de resultaten is het grote ruimtelijke verschil in de transportvectoren. In de figuren is daarom de schaalvector per figuur aangepast om een zo duidelijk mogelijk beeld van de vectoren te genereren. Let dus op met een directe vergelijking tussen figuren.

### 6.1 Modelresultaten T0 situatie

De T0 situatie zal geanalyseerd worden a.d.h.v. simulaties met en zonder golven, om de verschillende processen te onderscheiden. De dieptegemiddelde stroomvelden in Figuur 6-1 illustreren de complexe getijbeweging in het mondingsgebied voor de simulatie zonder golven. Tijdens vloed propageert het getij vanaf de Noordzee over het mondingsgebied richting het bekken en de stroming volgt daarbij de grote hoofdgeul Vliestroom (NW-ZO oriëntatie) en het Boomkensdiep (Figuur 6-1A,B). De stromingen in deze geul zijn duidelijk hoger dan de stromingen over de tussengelegen bankgebieden (Wester-/Noordergronden en Engelschhoek). Ten noorden van de buitendelta propageert het getij van het westen naar het oosten richting de noordkust van Terschelling. Op de platen Westergronden en Noordwestgronden buigt de stroming voornamelijk af richting de Vliestroom en deels richting het Boomkensdiep. Vanuit de Vliestroom stroomt het water verder het bekken in. Vanuit het Boomkensdiep draait de stroming ten zuiden van Terschelling richting het oosten naar het Schuitengat.

Na de kentering van het getij (Figuur 6-1D,E,F) is het stroombeeld omgedraaid. Vanuit het bekken stroomt het water voornamelijk via de Vliestroom richting het noordwesten. Vanuit het Schuitengat is de afstroming voornamelijk via verschillende geultjes naar het Boomkensdiep. Bovendien is er een kleine verbinding tussen het Schuitengat en de Vliestroom. Op de Noordwestgronden komt het water vanuit het Boomkensdiep en de Vliestroom samen waarna het in noordelijke richting verder stroomt. Vanuit het Boomkensdiep stroomt het water ook richting het bankensysteem van de Noordergronden en via de verschillende geulen tussen de banken stroomt het water naar de Noordzee. Het komt hier samen met de westelijk gerichte ebstroom vanaf de noordelijke kust van Terschelling. De snelheden in de geulen zijn daarbij veel hoger dan de snelheden op de tussenliggende platen. Op basis van het morfologische getij kan geconcludeerd worden dat er een grote snelheidsasymmetrie in het Boomkensdiep optreedt (Figuur 6-1). De piek vloedsnelheden van 1,3 m/s zijn veel hoger dan de piek eb snelheden van 0,9 m/s.

Figuur 6-2 illustreert de bijbehorende transportvelden. Doordat sedimenttransport bij benadering door de snelheid tot een macht 3 (bodemtransport) of macht 5 (suspensief transport) beschreven kan worden, zijn de transportvectoren groot tijdens maximale eb- en vloedstroming (Figuur 6-2A en D,E) en klein (nauwelijks zichtbaar) in de overige deelfiguren. De grootste transporten zijn ook zichtbaar in de geulen, waar de snelheid het hoogst is. Het residuele transport over het morfologisch getij (Figuur 6-3) vat de serie vectoren samen. Ter herhaling, deze resultaten zijn met de forcering van het getij en zonder golven. Op basis van het residuele transportpatroon kan geconcludeerd worden dat in het Boomkensdiep een vloeddominant transport overheerst. Dit transport is relatief klein op de buitendelta en maximaal langs de zuidwestelijke punt van de Noordsvaarder. Deze transporten dragen bij aan de vorming van het drempelgebied tussen Boomkensdiep en Schuitemgat. De Vliestroom vertoont een tweedeling in transportrichting. Op de buitendelta is de Vliestroom ebdominant en in het bekken vloeddominant. Langs de kust van Vlieland en in de Zuiderstortemelk overheerst een vloeddominant transport.

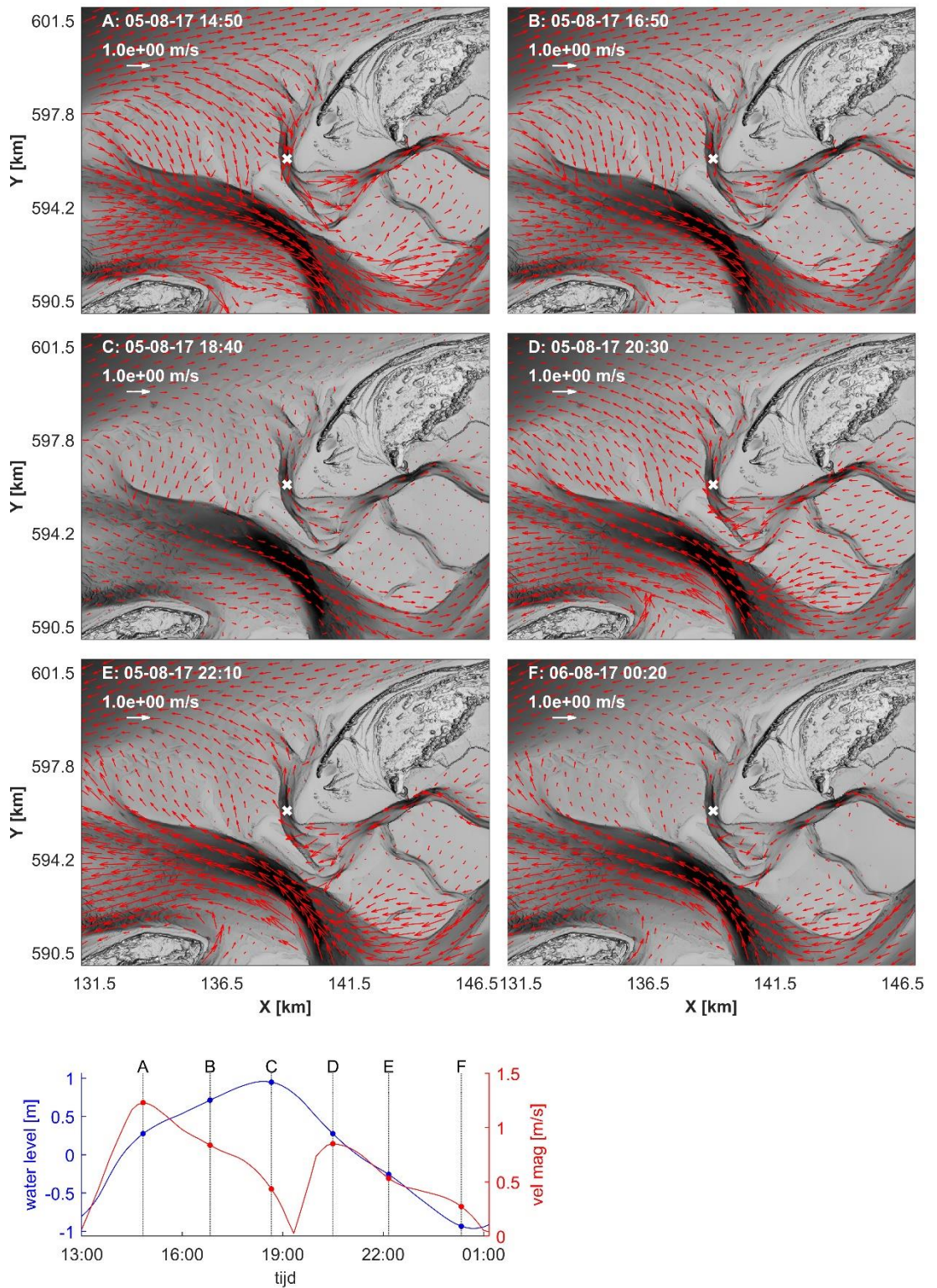
Deze transportvectoren geven al een goed beeld van het “sediment bypassing mechanisme” op de buitendelta. De noordoostgerichte transporten langs de kust van Vlieland worden via de kust en het de Zuiderstortemelk het zeegat in getransporteerd. Een deel van deze transporten zal bijdragen aan de vorming van banken in het bekken (bijv. Richel), maar een groot deel is richting het ebgedomineerde deel van de Vliestroom gericht. Dit sediment wordt dan via de Vliestroom terug de buitendelta op getransporteerd en draagt bij aan de vorming van de Westergonden. Getijgedreven transporten op de Westergonden en de naastliggende banken zijn klein en golven zijn daar cruciaal voor een verdere verspreiding van het sediment (Figuur 6-4).

De golven zorgen rechtstreeks voor sedimenttransport door golfbreking, waarbij golfgedreven stromingen worden gegenereerd. Ten tweede ontstaat asymmetrie van de orbitaalstromingen, waarbij een landwaarts gerichte transportcomponent ontstaat (Figuur 6-4). Golven dragen ook indirect bij aan de transporten door opwoeling van sediment, dat vervolgens door de getijstromingen weer verplaatst kan worden. De invloed van golven is het grootst op de ondiepe plaatgebieden (Figuur 6-3 en Figuur 6-4). Op de Westergonden en Noordwestgronden zorgen de golven voor een landwaarts sedimenttransport. Dit verklaart de eerder geobserveerde landwaartse verplaatsing van de banken richting het centrale deel van het zeegat (zie H3 en 4).

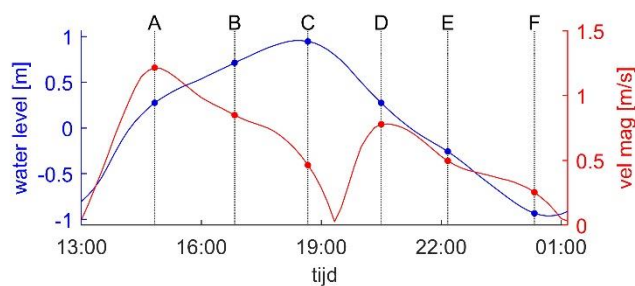
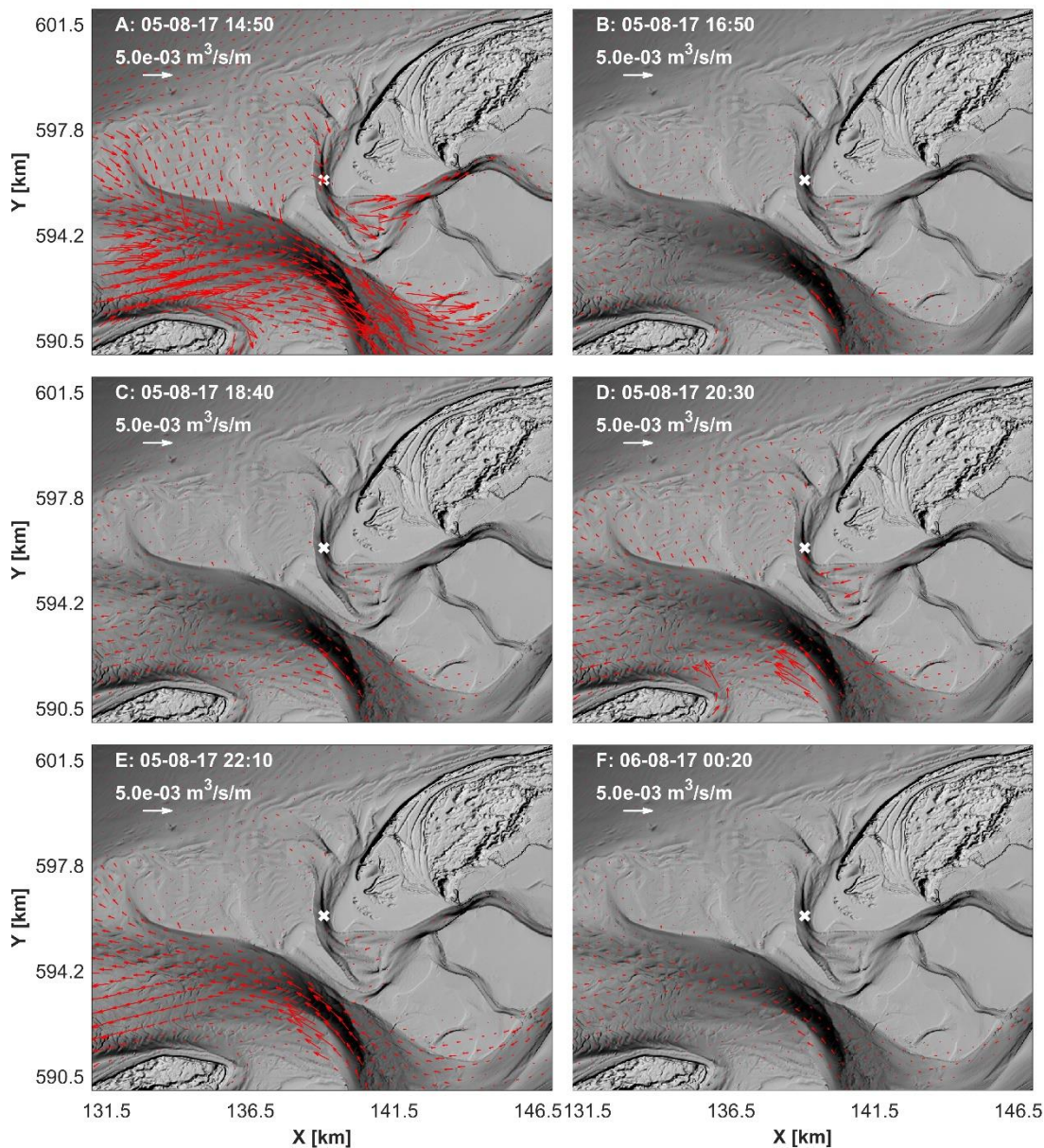
De residuele sedimenttransporten geven ook een goed beeld van de processen achter de vorming van de kustdwarse banken. De golfgedreven transporten op het centrale deel van de buitendelta zijn richting het Boomkensdiep gericht. Tijdens vloed wordt dit sediment richting het bekken getransporteerd en draagt bij aan de vorming van het drempelgebied tussen Boomkensdiep en Schuitemgat. Tijdens eb wordt het materiaal zeewaarts getransporteerd en bij de zeewaartse uitstroming van het Boomkensdiep afgezet. Er ontstaat hier een groot ebschild met een zwaartepunt aan de noordoostelijke zijde. Dit ondiepe gebied zorgt dan weer voor extra golfbreking en landwaarts-gerichte golfgedreven transporten. Dit leidt tot de hypothese dat in het verleden het Boomkensdiep geen rol speelde in het sediment bypassing proces (de west-oost verplaatsing van banken over de buitendelta heen). Golven domineren de verplaatsing van de banken over het platform van de buitendelta.

De recente bankverplaatsingen staan echter onder invloed van het Boomkensdiep. Deze geul zorgt ervoor dat de banken zich als een ebschild om de uitstroming van de geul vormen. Dit ebschild is asymmetrisch met een hogere rand aan de oostzijde en dit zorgt voor de karakteristieke vorm van kustdwarse banken. De verplaatsing van de bank wordt niet alleen meer gedreven door golven (landwaarts) maar ook door de rotatie van de uitstroom van de geul (kustdwars). Als het ware roteren de banken dus om de uitstroom van het Boomkensdiep

heen. Deze combinatie geeft de karakteristieke kustdwarse banken die sinds 2005 zichtbaar zijn op de buitendelta.

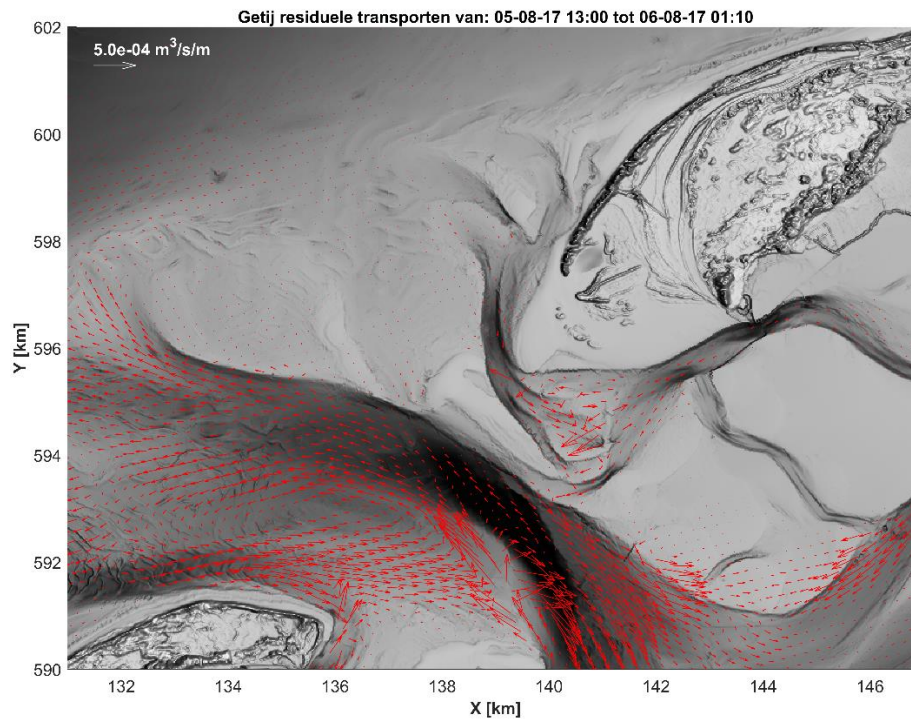


Figuur 6-1 Enkele karakteristieke snapshots van de stromingen in het zeegat Vlie op basis van de T0 getijsimulatie. De tijdserie in de onderste plot geeft het verloop van de waterstand en snelheid in het Boomkensdiep weer (locatie van het witte kruis).

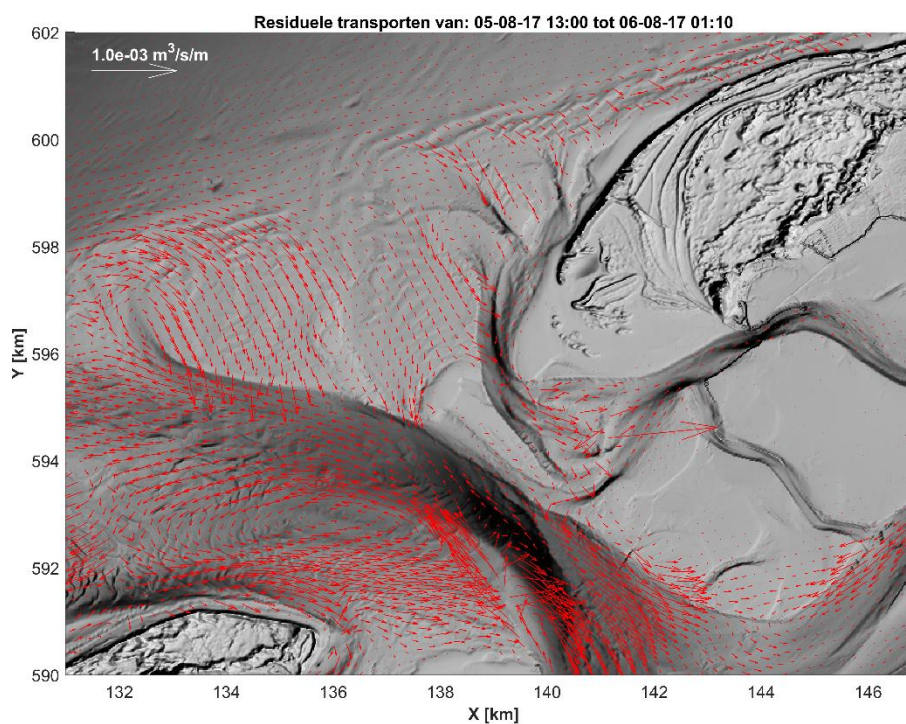


Figuur 6-2 Enkele karakteristieke snapshots van de sedimenttransporten in het zeeget Vlie op basis van de T0 getijsimulatie (zelfde tijdstippen als Figuur 6-1). De tijdserie in de onderste plot geeft het verloop van de waterstand en snelheid in het Boomkensdiep weer (locatie van het witte kruis).

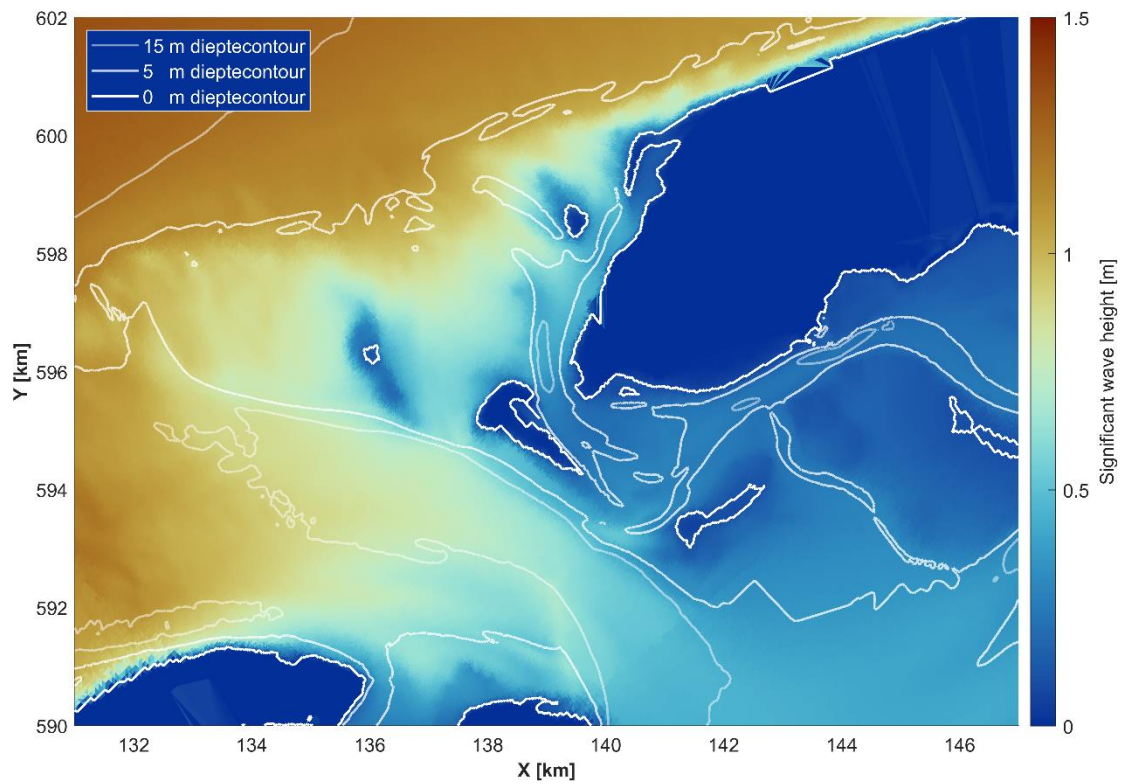




Figuur 6-3 Residuele transporten over het morfologische getij voor het T0 model zonder golven (alleen getijstroming).



Figuur 6-4 Residuele transporten over het morfologische getij voor het T0 model voor het gewogen gemiddelde van de 4 golfcondities.



*Figuur 6-5 Gewogen gemiddelde significante golfhoogte van de 4 golfcondities voor de T0 analyse. De witte contourlijnen laten respectievelijk de 0, 5 en 15 m dieptecontour zien.*

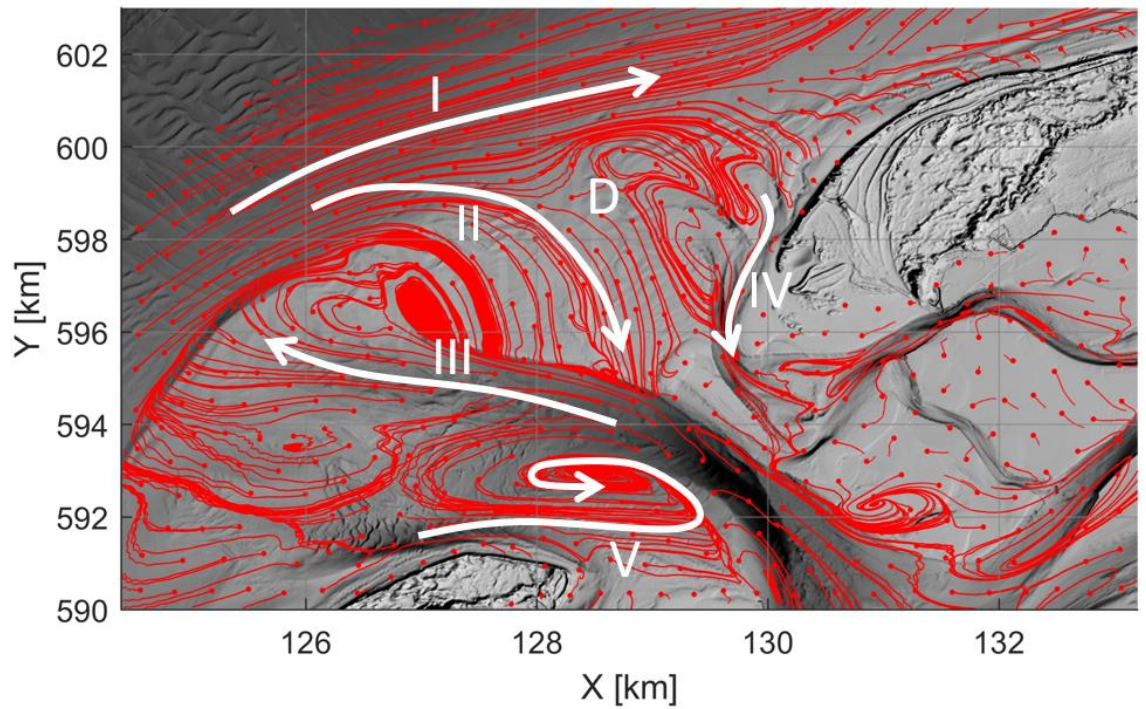
## 6.2 SedTRAILS resultaten T0 situatie

De residuele transporten kunnen beter inzichtelijk gemaakt worden met behulp van een SedTRAILS visualisatie. Figuur 6-6 illustreert de resultaten voor 500 bronnen verspreid over het mondingsgebied zoals in Figuur 5-4A, de hoofdpatronen in de buitendelta zijn duidelijk te herkennen. Let hierbij op dat de intensiteit van de lijnen niets zegt over de grootte van de transporten. In de geulen en gebieden van divergentie worden de deeltjes snel weg getransporteerd waardoor hier slechts een beperkt aantal lijnen zichtbaar zijn. In gebieden van convergentie komen juist vele lijnen samen. Dit zijn dan vaak gebieden van sedimentatie.

De residuele transportvectoren zeewaarts van de buitendelta zijn klein, waardoor deze in Figuur 6-3 en in Figuur 6-4 eigenlijk niet zichtbaar zijn. Op basis van de SedTRAILS visualisatie is duidelijk te zien dat alhoewel de transporten klein zijn t.o.v. de transporten op de buitendelta deze wel een noordoostelijke dominantie hebben. De geobserveerde erosie op de vooroever aan de noordoostzijde van de buitendelta wordt dan ook onder invloed van het getij noordoostelijk verplaatst (Figuur 6-6-I). Wat hierbij ook opvalt is dat er een duidelijke tweedeling in richting ontstaat bij de centrale eilandkust. In de ondiepe vooroever verplaatsen de deeltjes noordoostelijk en landwaarts en in de diepere vooroever juist noordoostelijk en zeewaarts. Deze splitsing is een indicatie dat de erosie van het diepere deel van de buitendelta niet direct ten goede komt aan de eilandkust en misschien als verlies uit de kustzone kan worden gezien.

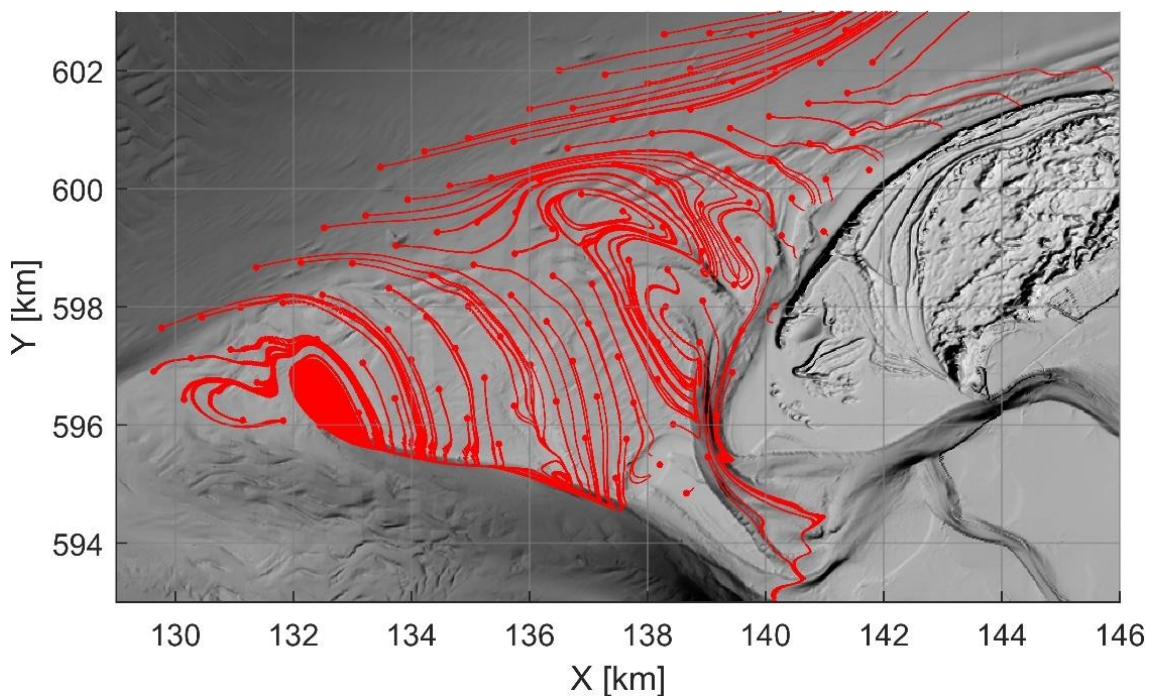
De SedTRAILS resultaten op de buitendelta laten een duidelijke tweedeling in transporten op de buitendelta zien (Figuur 6-6-II, D). Deze tweedeling komt doordat in de bodem van 2022 de Westergronden en Noordwestergronden gescheiden worden van de Noordergronden door een relatief diep deel van de buitendelta (zie D in Figuur 6-6-II). Op de Westergronden en Noordwestgronden zijn de transporten voornamelijk richting de Vliestroom gericht en de Vliestroom zorgt ervoor dat deze weer richting het front van de buitendelta worden getransporteerd (III). Dit zorgt voor een min of meer gesloten transportsysteem. Dit kan als volgt geïnterpreteerd worden. Op dit deel van de buitendelta zijn de transporten groot, maar de netto verandering klein. Er wordt veel materiaal gecirculeerd, maar dat gaat niet direct verloren. Het sediment accumuleert in banken die langzaam verplaatsen. Het sedimentverlies van de buitendelta komt hier dan ook niet direct vanuit de transporten, maar juist uit de verplaatsing van deze banken. Op de Westergronden verplaatst het bankvolume zich vooral landwaarts richting de Engelschhoek en een klein deel verplaatst zich in de vorming van aanlandingsbanken richting het eiland.

Op de Noordergronden worden de transportpaden gedictieerd door de twee groten banken en de interactie met het Boomkensdiep. De afwisseling tussen geul en bank en de uitwisseling tussen die twee creëert complexe transportpaden om de banken heen. De SedTRAILS resultaten geven ook een goed inzicht in de erosieve processen langs de noordwestzijde van de Noordsvaarder. Hier zijn de transportpaden richting de eilandkop en het bekken gericht (Figuur 6-6-IV). Zo'n bekkengericht (vloeddominant) transport is ook langs de eilandkop van Vlieland zichtbaar (Figuur 6-6-V).



*Figuur 6-6 Transportpatronen voor 500 bronnen verspreid over het mondingsgebied van het Vlie. De witte pijlen laten enkele hoofdpatronen zien en het punt D geeft een divergentiepunt aan.*

Als we dezelfde bronnen laten zien, maar de transporten in de hoofdgeul niet meenemen, wordt duidelijk wat er op de noordelijke platen gebeurd van de buitendelta van het zeegat. Dit is te zien in Figuur 6-7. Sediment van de Westergonden zal voornamelijk getransporteerd worden naar de Vliestroom. Sediment vanaf de Noordwestgronden zal gedeeltelijk naar de Vliestroom en het Boomkensdiep getransporteerd worden.

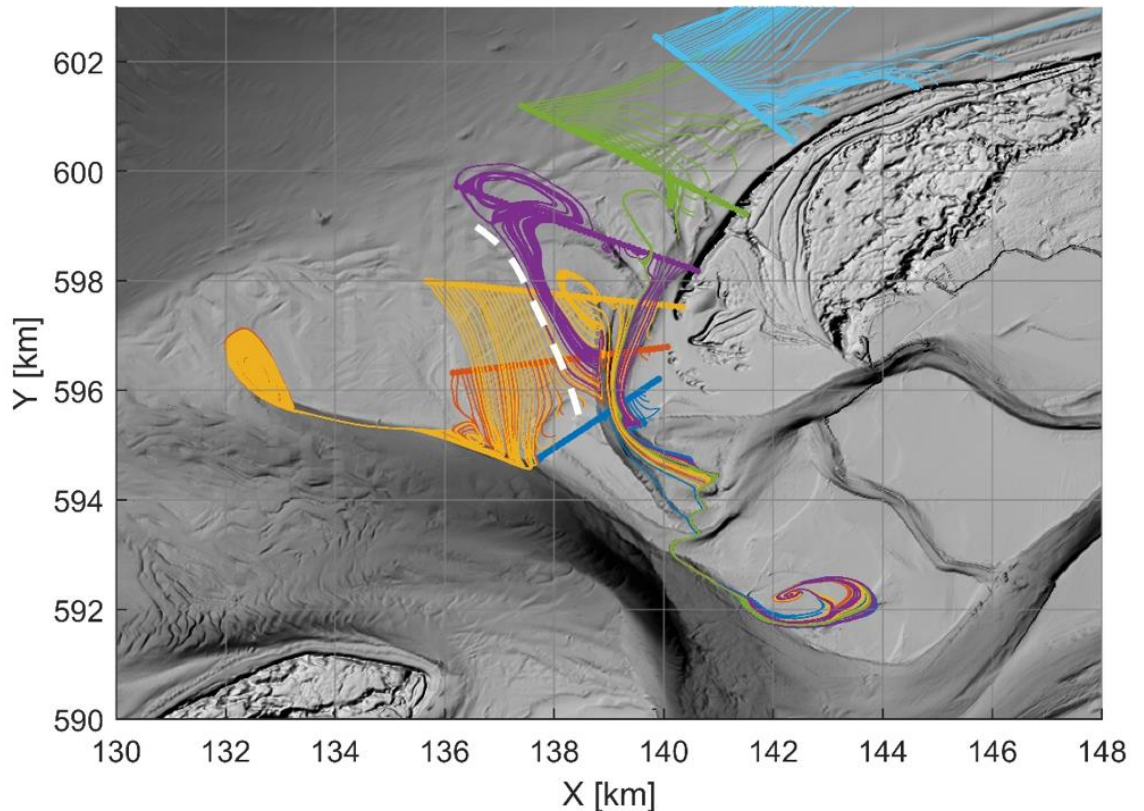


*Figuur 6-7 Transportpatronen voor bronnen op de platen in de buitendelta van het zeegat het Vlie.*

De transporten langs de eilandkust van de Noordsvaarder en Boomkensdiep worden verder geïllustreerd in Figuur 6-8. In deze visualisatie zijn de sedimentbronnen in 6 doorsnedes die

loodrecht op de kust staan geplaatst. In het Boomkensdiep zien we netto vooral een vloeddominant transport. Het sediment wordt netto dus zuidwaarts richting het drempelgebied tussen Schuitemgat en Boomkensdiep getransporteerd. Hier eindigen ook de transportpaden. De uitstroom van het Boomkensdiep is klein en voornamelijk ebdominant, richting de aanlandingsbanken.

De witte stippellijn laat duidelijk de grens zien tussen het zeewaartse deel van de buitendelta dat uitwisselt met de Vliestroom en het meer landwaartse deel waarop sediment richting het Boomkensdiep wordt getransporteerd. De paarse transect wisselt alleen uit met het Boomkensdiep. De transporten vanaf de blauwe transect zijn altijd noordoostelijk gericht. Deze transect illustreert nogmaals de tweedeling in transporten, waarbij de zeewaartse deeltjes meer zeewaarts transporteren en de landwaartse deeltjes richting het eiland.



*Figuur 6-8 Transportpatronen voor 6 transecten bij Terschelling West. De witte lijn laat de divergentie tussen de Vliestroom en het Boomkensdiep zien.*

## 6.3 Resultaten voor de suppletievarianten

In dit hoofdstuk worden hoofdzakelijk de SedTRAILS resultaten weergegeven voor de suppletievarianten. Deze zullen vergeleken worden met de T0 situatie om zo veranderingen in residueel transport en transportpatronen te duiden. In Appendix A worden de bijbehorende stromings- en transportresultaten gegeven. Verder staan in Appendix A.6 SedTRAILS resultaten voor dwarsraaien bij de kust van Terschelling, deze visualiseren op een andere manier de transportpatronen die hier worden besproken.

In Figuur 6-10 zijn de transportpatronen voor de vier suppletievarianten getoond. Op de schaal van de gehele buitendelta zijn de verschillen tussen de T0 en de suppletievarianten beperkt. Dit is ook te verwachten omdat de grootschalige transportpatronen gedomineerd worden door de Vliestroom, hier hebben de suppleties geen effect op. Suppletievariant 4 heeft de grootste invloed. Door afsluiting van het Boomkensdiep verandert de aansturing richting het Schuitengat en richting de buitendelta waardoor hier de transportpatronen duidelijk afwijken.

De lokale effecten van de suppletievarianten kunnen verder inzichtelijk gemaakt worden door alleen bronnen op de locatie te visualiseren (Figuur 6-12). Deze resultaten geven een eerste inschatting van hoe de uitwisseling tussen suppletie en buitendelta plaatsvindt en waar er mogelijk een invloed van de suppletie is te verwachten.

Suppletievarianten 1 tot 3 geven vooral lokaal verschillen in transportvectoren ter plaatse van de suppletie (Figuur 6-11). De transporten op de suppletielocatie nemen over het algemeen toe. Dit komt ten eerste doordat de waterdiepte afneemt en er meer golfbreking kan optreden, waardoor transporten toenemen. Ten tweede concentreert de stroming zich om de suppletie heen waardoor hier de snelheden en dus ook de transporten toenemen. Deze twee effecten zorgen er ook voor dat de transportpatronen op het buitendelta platform afhankelijk van de suppletielocatie iets afwijken ten opzichte van de T0 (Figuur 6-10). In detail:

*Suppletie 1* ligt op de zeewaartse rand van de Noordwestgronden. De suppletie zorgt ervoor dat de bodemhoogte na aanleg toeneemt waardoor er meer golfbreking optreedt dan voor aanleg. Dit resulteert in een sterke toename van de transporten. Het sediment wordt vervolgens vanaf de suppletielocatie over het buitendelta platform richting de Vliestroom getransporteerd (Figuur 6-12). Dit transport richting de Vliestroom treedt ook op in de T0 situatie. De suppletie lijkt niet veel sediment te verliezen, maar vergroot vooral de recirculatie van het sediment. Het is de verwachting dat deze suppletie dan ook zal bijdragen aan de vorming van aanlandingsbanken en de zandvolumes van Engelschhoek.

*Suppletie 2* vergroot de sedimentvolumes van de kustdwarse bank. Het sediment van suppletie 2 verplaatst vooral over en rondom de suppletie. Er lijkt slechts een kleine verlies naar het Boomkensdiep op te treden. De verwachting is dan ook dat deze suppletie ervoor zal zorgen dat de onderliggende bank beter gehandhaafd blijft. Deze bank zal zich verder oostwaarts verplaatsen en de uitstroom van het Boomkensdiep versnelt dichtdrukken. Het centrale deel van het Boomkensdiep is onveranderd, waardoor de uitstroom zich waarschijnlijk terug zal verplaatsen naar de westzijde van de bank. Dit wegdrukken van het Boomkensdiep zal er dan voor zorgen dat de aanlandingsbanken oostelijk ervan kunnen verhelen met de eilandkust van Terschelling. Het is echter niet de verwachting dat dit de erosie in het probleemgebied verkleint, omdat de aanlanding oostelijk ervan zal optreden.

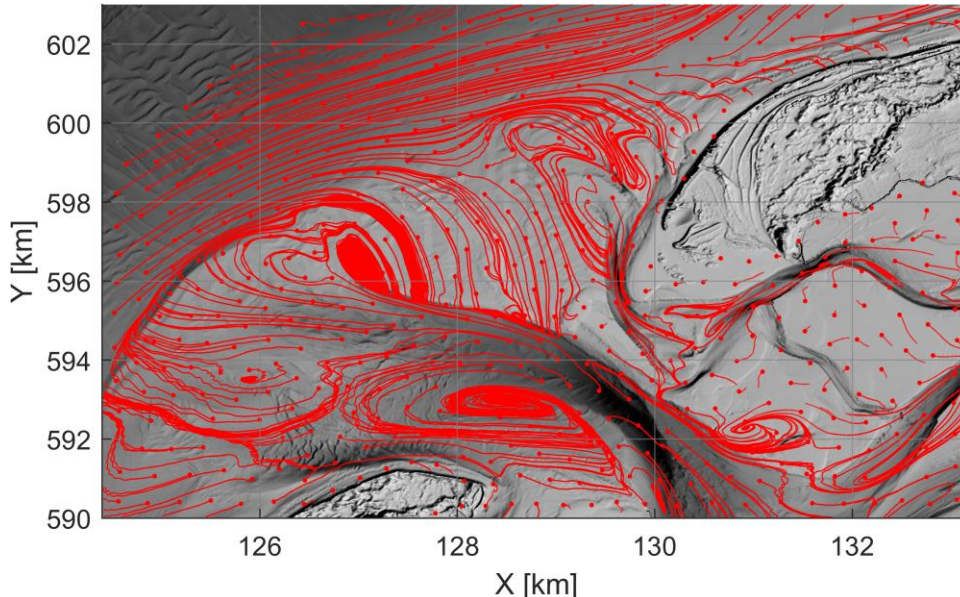
*Suppletie 3* is aangelegd op de diepere vooroever van de Noordergronden. De autonome trend in dit gebied is erosief. Door aanleg van de suppletie neemt ook hier de bodemhoogte toe, waardoor er meer golfbreking en omwoeling van sediment zal optreden. Doordat hier voor aanleg van de suppletie de transporten klein zijn, nemen ze sterk toe na aanleg. De suppletie heeft in dit opzicht een groot effect. Het vergrote sedimentaanbod volgt wel de transportpaden

die ook in de T0 zichtbaar zijn. Een deel van het suppletiemateriaal verplaatst landwaarts, over de Noordergronden richting de eilandkust. Een deel van het sediment verplaatst echter ook zeewaarts naar diep water en zal dan niet direct bijdragen aan de sedimentvolumes in de kustzone. Ten opzichte van de andere suppletievarianten zal de verplaatsing van sediment sneller gaan en het verlies van deze suppletie groter zijn. Hier staat wel tegenover dat de suppletie locatie waarschijnlijk op korte termijn de (noord) kust van Terschelling kan voeden.

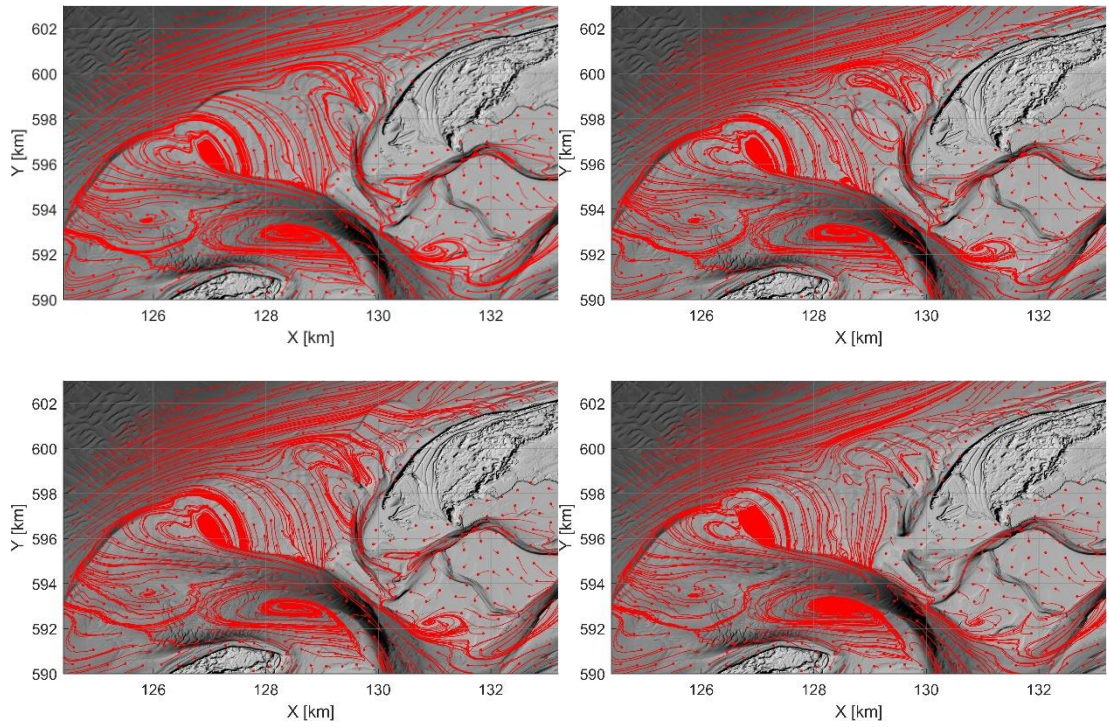
*Suppletie 4* geeft de grootste beïnvloeding van de autonome transporten. Doordat het centrale deel van het Boomkensdiep is dichtgezet, verandert zowel de uitstroming van het Boomkensdiep de buitendelta op als de uitstroming richting het Schuitengat. Na de suppletie ontstaat ten noorden en ten zuiden ervan een diepe put waarin het sediment direct wordt gevangen. Dit betekent dat het materiaal van de suppletie zich niet verder verspreidt dan de diepe putten aan weerszijden (Figuur 6-12). Transporten richting het drempelgebied tussen Schuitengat en Vliestroom zijn dan volledig gestopt.

Wat opvalt in de residuele transporten is de toename van de transporten aan de westzijde van Engelschoek (Figuur 6-11). Deze toename komt waarschijnlijk doordat een deel van het debiet dat eerst door het Boomkensdiep propageert nu om de bank wordt geleid. Deze toename in transport laat zien dat Engelschoek meer sediment zal verliezen naar de Vliestroom. Dit sediment komt in het netto vloedgedomineerde deel van de Vliestroom waardoor het gedeeltelijk het bekken in getransporteerd zal worden. Een deel zal tijdens eb ook terug richting de buitendelta circuleren en weer deel gaan nemen aan het sediment bypassing proces. Een relatief groot verschil in transportgrootte is ook zichtbaar in het Schuitengat. Op basis van de hier gepresenteerde analyse is het niet direct vast te stellen of dit een gunstig of ongunstig effect heeft op de ligging en diepte van het Schuitengat.

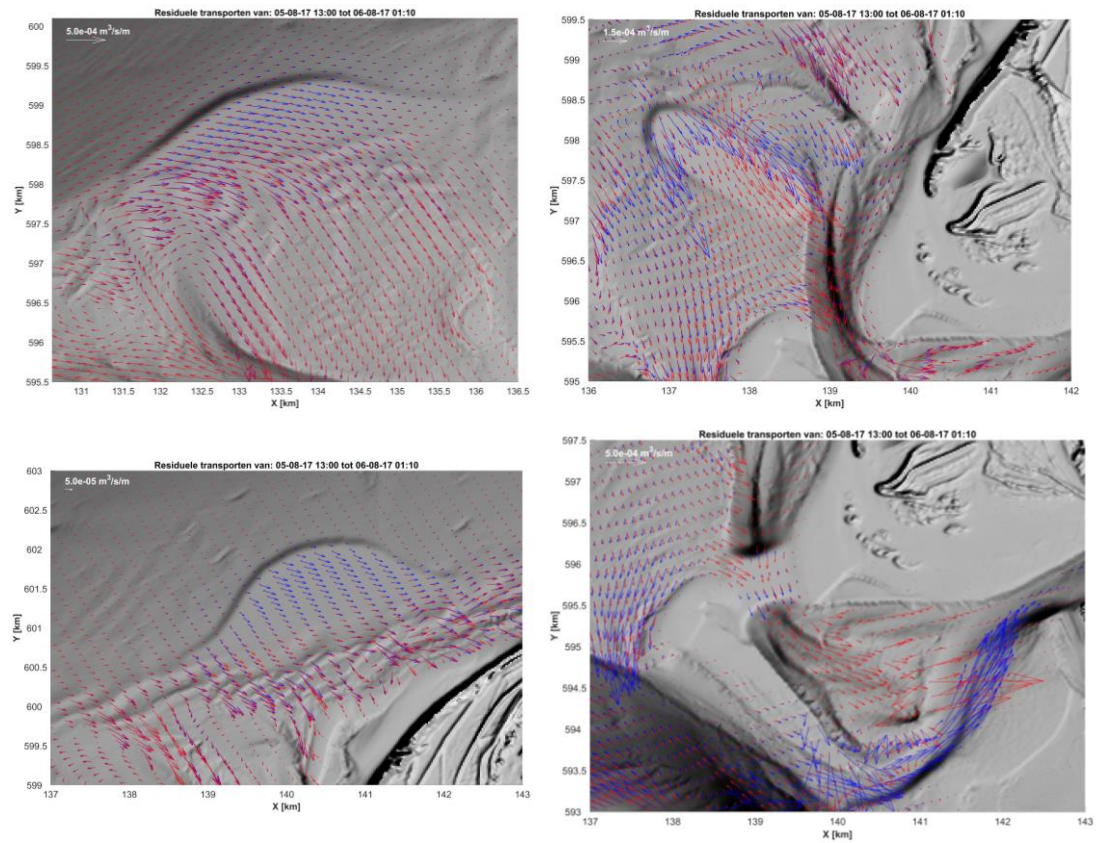
Deze suppletie kan op termijn er voor zorgen dat de erosieproblematiek van de Noordsvaarder afneemt. Door afsluiting van het Boomkensdiep zal initieel de geul opvullen wat een verlies van sediment geeft. Dit kan tijdelijk voor een vergroting van de erosie van de Noordsvaarder zorgen, maar op lange termijn creëert dit wel de mogelijkheid voor bankaanlandingen die dicht op de eilandkop optreden i.p.v. ver oostelijk richting de centrale eilandkust.



Figuur 6-9: Herhaling van Figuur 6-6 om de transportpatronen van de verschillende suppletievarianten te vergelijken met de T0 situatie.

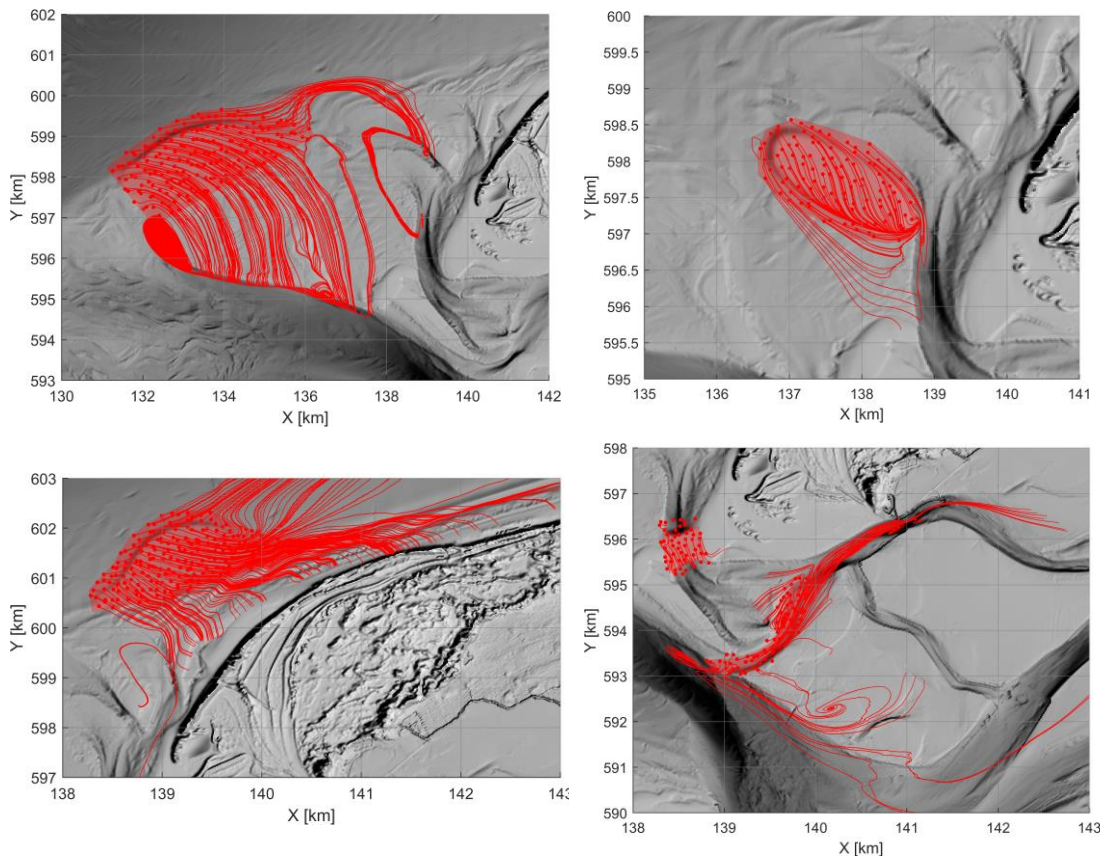


*Figuur 6-10 Transportpatronen voor het gehele mondingsgebied voor elke suppletievariant. Linksonder: suppletie 1, Rechtsboven: suppletie 2, Linksonder: Suppletie 3, Rechtsonder: Suppletie 4.*



*Figuur 6-11 Residuele transporten van de suppletie (blauw) ten opzichte van de T0 situatie (rood) ingezoomd per suppletielocatie. Linksonder: suppletie 1, Rechtsboven: suppletie 2, Linksonder: Suppletie 3, Rechtsonder: Suppletie 4.*





Figuur 6-12 Transportpatronen voor bronnen neergelegd op de suppletielocatie. Linksboven: suppletie 1, Rechtsboven: suppletie 2, Linksonder: Suppletie 3, Rechtsonder: Suppletie 4.

## 7 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

De kust van West-Terschelling is aan erosie onderhevig, wat resulteert in een overschrijding van de BKL voor een deel van de kustlijn. Een mogelijke oplossing is om sediment toe te voegen in het systeem het Zeegat van het Vlie door middel van een systeemsuppletie. Vier mogelijke suppletievarianten zijn hiervoor geanalyseerd. Deze conclusie geeft de resultaten van een morfologische studie van het Zeegat van het Vlie a.d.h.v. bodemdata. Door modellering is verdere systeemkennis opgedaan en is de effectiviteit bepaald van elk van de suppletievarianten.

### 7.1 Samenvatting en conclusies

De zuidwestzijde van Terschelling is gevormd door aanlanding van de bank de Noordsvaarder rond 1850. Na aanlanding van een bank vindt altijd een herverdeling van sediment plaats, waardoor er gebieden met lokaal (veel) erosie of sedimentatie zullen ontstaan. Een grootschalige bankaanlanding is sinds 1850 niet meer opgetreden, maar zou wel nodig zijn om de gehele eilandkop in zijn geheel uit te bouwen. Kleinschalige bankaanlandingen treden wel op, alleen landen deze banken aan richting de centrale eilandkust van het eiland. Deze banken hebben de afgelopen 40 jaar een gemiddeld volume van 10 miljoen m<sup>3</sup>. Het Boomkensdiep speelt hierbij een belangrijke rol. De getijstrooming in deze geul kan efficiënt zand afvoeren en zorgt ervoor dat bankaanlandingen niet op de eilandkop, maar verder oostelijk richting de centrale eilandkust plaatsvinden. De kleinschalige bankaanlandingen vinden aanvankelijk (tot 2000) plaats met een herhalingstijd van 30-40 jaar. Recentelijk ligt de herhalingstijd rond de 10-15 jaar en is de vorm van de bank veranderd van een kustlangse naar kustdwarse bank. Met een netto oostelijk gericht brandingstransport dragen deze bankaanlandingen wel bij aan het behoud van de eilandkust ten oosten van de aanlandingslocatie, maar niet westelijk ervan.

De huidige ligging van het Boomkensdiep is gerelateerd aan de afsluiting van de Zuiderzee waardoor de stroming in het zeegat sterk veranderde. De Vliestroom werd de dominante uitstroomgeul en het Boomkensdiep maakt hier eigenlijk geen directe verbinding meer mee. Alhoewel de geul geen directe aansturing meer heeft vanuit de Vliestroom en sterk in omvang en grootte is veranderd, blijft de geul wel gehandhaafd en verhindert deze geul een directe uitwisseling van sediment tussen de buitendelta en aanliggende eilandkust. De relatief grote kustlangse getijstroomingen in de geul zorgen ervoor dat sediment dat vanuit de buitendelta landwaarts verplaatst, kustlangs verder wordt verplaatst. Een deel verplaatst richting het bekken, waar het bijdraagt aan de vorming van het drempelgebied tussen Schuitengat, Boomkensdiep en Vliestroom. Een ander deel van het sediment wordt de buitendelta op getransporteerd, waar het een ebschild vormt om de uitstroming van het Boomkensdiep heen. Dit ebschild is waarschijnlijk een reden voor de vorming van kustdwarse banken zoals we die sinds 2005 kunnen observeren.

Suppletievarianten 1, 2 en 3 zijn suppleties op het platform van de buitendelta, maar door de verschillende locaties vertonen ze een eigen uniek gedrag en respons. Deze suppleties lijken niet direct de erosie van de kustlijn van de Noordsvaarder te reduceren, maar vergroten wel de volumes van de aanlandingsbanken. Dit komt doordat het Boomkensdiep niet direct beïnvloed wordt en de autonome processen daar onverminderd doorgaan. *Suppletie 2* heeft de grootste potentie om indirect wel het Boomkensdiep te beïnvloeden. Deze suppletie ligt direct westelijk van de uitstroom van het Boomkensdiep en zal onder invloed van golven oostelijk verplaatsen, waardoor de uitstroom van Boomkensdiep dicht gedrukt wordt. Het lijkt waarschijnlijk dat deze uitstroom zich naar de westzijde van de suppletie zal verplaatsen. Het

zou daardoor mogelijk zijn dat de banken iets verder westelijk aanlanden. Het lijkt echter niet waarschijnlijk dat deze suppletie het gehele erosiegebied van zand kan voorzien.

Suppletievarianten 1 en 3 zijn verder zeewaarts op de buitendelta aangelegd. Deze suppleties vergroten vooral de zandvolumes in het kustvak. *Suppletie 1* lijkt het meest geschikt om het sedimentvolume van de buitendelta te vergroten. Golfbreking over de suppletie zorgt voor een landwaarts transport over de Noordwestgronden richting de Vliestroom en vanuit de Vliestroom terug de Westergonden op. Op basis van de gemodelleerde transporten lijkt het sediment vooral te recirculeren met weinig verlies van de buitendelta. Deze suppletie lijkt dan ook een geschikte methode om de buitendelta van meer sediment te voorzien waardoor in de toekomst meer of grotere aanlandingsbanken kunnen ontstaan. *Suppletie 3* is op de vooroever van de Noordwestgronden aangelegd. Deze locatie is in de autonome situatie aan grote erosie onderhevig en de suppletie vertoont dan ook een grote verspreiding van het sediment. Een deel van het sediment verplaatst landwaarts, maar een ander deel verplaatst zich naar de diepere vooroever. Deze locatie is relatief makkelijk toegankelijk en lijkt vooral geschikt om veel zandvolume aan te brengen en het natuurlijk over het gehele kustvak (inclusief vooroever) te verspreiden.

Alleen *suppletie 4* heeft een direct effect op de kustlijn van de Noordvaarder. Afsluiting van het Boomkensdiep zorgt ervoor dat kustlangse verspreiding van het sediment niet meer kan optreden. Initieel zal dit wel een vergroting van de kusterosie geven. Door afsluiting van de geul ontstaan aan weerszijden van de suppletie twee diepe putten waar sediment efficiënt kan bezinken. Op langere termijn, als deze putten zijn opgevuld, ontstaat er juist een vooroever waarover het sediment zich van de buitendelta naar de eilandkust kan verplaatsen. Bankaanlandingen kunnen dan verder westelijk plaatsvinden, waardoor erosie op het westelijk deel van de eilandkop zal afnemen. Het is dan echter wel waarschijnlijk dat er minder sediment beschikbaar is in het huidige aanlandingsgebied (km. 5-6). In dit gebied zal dan een afvlakking van de kustlijn en dus kustlijninterugtrekking plaatsvinden. Afsluiting van het Boomkensdiep zal echter effect hebben richting het bekken, waardoor bijv. het Schuitengat zeker beïnvloed gaat worden. Modelsimulaties laten ook zien dat transporten vanaf de Engelschhoek richting de Vliestroom toenemen, waardoor deze bank in volume zal afnemen.

## 7.2 Aanbevelingen

### 1 *Interactie Zeegat van het Vlie en de kust van Terschelling*

In hoofdstuk 3 en 4 zien we een duidelijke ontwikkeling van de buitendelta van het Zeegat van het Vlie en de daaropvolgende reactie van de kust van Terschelling. Het diepere deel van de buitendelta van het Zeegat van het Vlie en de vooroever van Terschelling vertonen beide grote, structurele erosie. Deze erosie zal voor een deel te maken hebben met de nog steeds doorgaande aanpassing van de Westelijke Waddenzee na afsluiting van de Zuiderzee. De buitendelta voor de afsluiting is waarschijnlijk groter dan benodigd voor de huidige situatie en het sedimentvolume van de buitendelta ligt niet op de juiste plaats. Door rotatie van de Vliestroom is een meer zuidelijk gerichte ebgeul ontstaan. De heroriëntatie van de geul gaat snel, maar het opruimen van het oude platform van de buitendelta gaat veel langzamer. De buitendelta kan dan ook niet gehandhaafd worden en verliest hierdoor veel sediment (hetzelfde is te zien voor het zeegat van Texel).

Naast de structurele erosie van de buitendelta vertoont ook het eiland Terschelling een structurele erosie van zowel de eilandstaart en eilandkop. De eilandkop erodeert door de ongunstige ligging van het Boomkensdiep waardoor er langs de achterliggende eilandkust wel zand wordt weg gevoerd, maar niet aangevoerd. Kleinschalige bankaanlandingen vinden meer oostelijk plaats, richting de centrale eilandkust, en zijn in staat het centrale deel van het eiland te behouden. De langstransporten langs het eiland zijn echter niet in staat de eilandstaart te

behouden. Dit komt vooral doordat groei en terugtrekking van de Boschplaat samenhangt met de morfologische veranderingen in het Zeegat van Ameland (zie hiervoor Elias et al., 2019).

## 2 Aanbeveling voor het uitvoeren van de suppletie varianten.

Ieder van deze suppletievarianten geeft een eigen gedrag en respons. De keuze van een voorkeursvariant zal afhangen van het beoogde doel van de suppletie.

*Suppletievariant 1* is het meest geschikt voor het vergroten van de sedimentvolumes op de buitendelta. Erosie van de suppletie treedt zeker op, maar dit sediment circuleert via de Vliestroom terug de Westergronden op. Het zal hier bijdragen aan het lange-termijn behoud van het buitendeltaplatform en de vorming van aanlandingsbanken.

*Suppletievariant 2* vertoont een vergelijkbare respons, alleen is de suppletie hier aangelegd aan het einde van de sediment-bypassing cyclus (west-oost verplaatsing van de banken). Deze suppletie vertoont ook een behoud van volume, maar zal veel sneller aanlanden op de kust van Terschelling. De suppletie draagt niet bij aan het behoud van het buitendeltaplatform maar wel aan de voeding van het eiland. Aangezien de suppletie ver landwaarts is aangelegd op het ondiepe deel van de buitendelta zal deze uitvoering technisch complexer en kostbaarder zijn dan suppletievarianten 1 en 3.

*Suppletievariant 3* is bij uitstek geschikt voor het vergroten van de zandvolumes in het kustvak van Terschelling. Deze suppletie is aangelegd aan de zeewaartse zijde van de buitendelta. Deze locatie is relatief makkelijk bereikbaar waardoor veel zandvolume geplaatst kan worden. De locatie is in een sterk erosief deel van de buitendelta en de suppletie zal na aanleg veel sediment verliezen. Een deel van dit sediment verplaatst landwaarts richting het eiland, maar een ander deel zal naar de vooroever verplaatsen.

*Suppletievariant 4* is een suppletie die de processen rondom de eilandkop sterk verandert. Een dergelijke suppletie heeft potentie om de erosie van de eilandkop op middellange en lange termijn op te lossen. Deze suppletie zal echter ook op grotere schaal invloed uitoefenen. Zo zijn veranderingen van Engelschoek en Schuitengat te verwachten. Deze veranderingen kunnen positief, maar ook negatief uitpakken. Het goed begrijpen van deze grootschalige invloed vraagt aanvullend en uitgebreid onderzoek.

Alhoewel suppletievariant 4 een onzekerheid in grootschalige morfologische ontwikkeling geeft, is deze suppletievariant wel een interessant concept. Erosie van de eilandkoppen speelt langs vrijwel alle Zeeuwse eilanden en Waddeneilanden. Deze erosie hangt vaak samen met de aanwezigheid van een relatief kleine, maar persistente geul. Er is niet per definitie een tekort aan sediment, maar het sediment dat aanwezig is kan de erosie-locatie niet bereiken. Het kleinschalig ingrijpen om zo'n geul te beïnvloeden en de voeding van de kustlijn te optimaliseren, kan dan een efficiënte optie zijn in het beheerinstrumentarium. Een pilot met een dergelijke suppletie zal bij voorkeur uitgevoerd moeten worden op een locatie waar er verder geen risico op kustveiligheid optreedt. Dit is zeker het geval hier bij de Noordsvaarder met het brede achterliggende strand- en duincomplex.

## 3 Aanvullend onderzoek naar het BKL criterium

Aanleiding voor dit onderzoek is de erosie langs de eilandkop van Terschelling, en de daaruit volgende BKL overschrijding. Het is hier echter de vraag of de huidige ligging van de BKL optimaal is. De eilandkoppen van de Waddeneilanden zijn onderhevig aan grootschalige periodieke (vaak cyclische) ontwikkelingen. Door aanlanding van grote bankcomplexen bouwen de kusten bij aanlanding instantaan sterk uit, waarna een lange periode van herverdeling (erosie) volgt. Afhankelijk van de fase in zo'n cyclus kan de BKL relatief ongunstig en ver zeewaarts liggen, waardoor deze tijdens de eroderende periode in de cyclus

overschreden wordt. Dit probleem speelt ook bij de eilandkop van Terschelling. Deze eilandkop is ver zeewaarts uitgebouwd na aanlanding van de Noordsvaarder rond 1860 en sindsdien trekt de eilandkop terug. Deze terugtrekking gaat tot op heden door dus het is in dit opzicht niet verbazingwekkend dat de 1990 gedefinieerde BKL niet gehandhaafd kan worden.

Op locaties waar cyclische variabiliteit (bijv. door bankaanlandingen) verwacht kan worden en waar de kustveiligheid niet in het geding is, is het aan te bevelen een minimum BKL te definiëren. Deze minimum BKL wordt bepaald door de minimum ligging van de kustlijn binnen de cyclus en mag nooit overschreden worden. De gemiddelde BKL ligt verder zeewaarts en mag overschreden worden, wanneer we in de eroderende periode van de cyclus zijn.

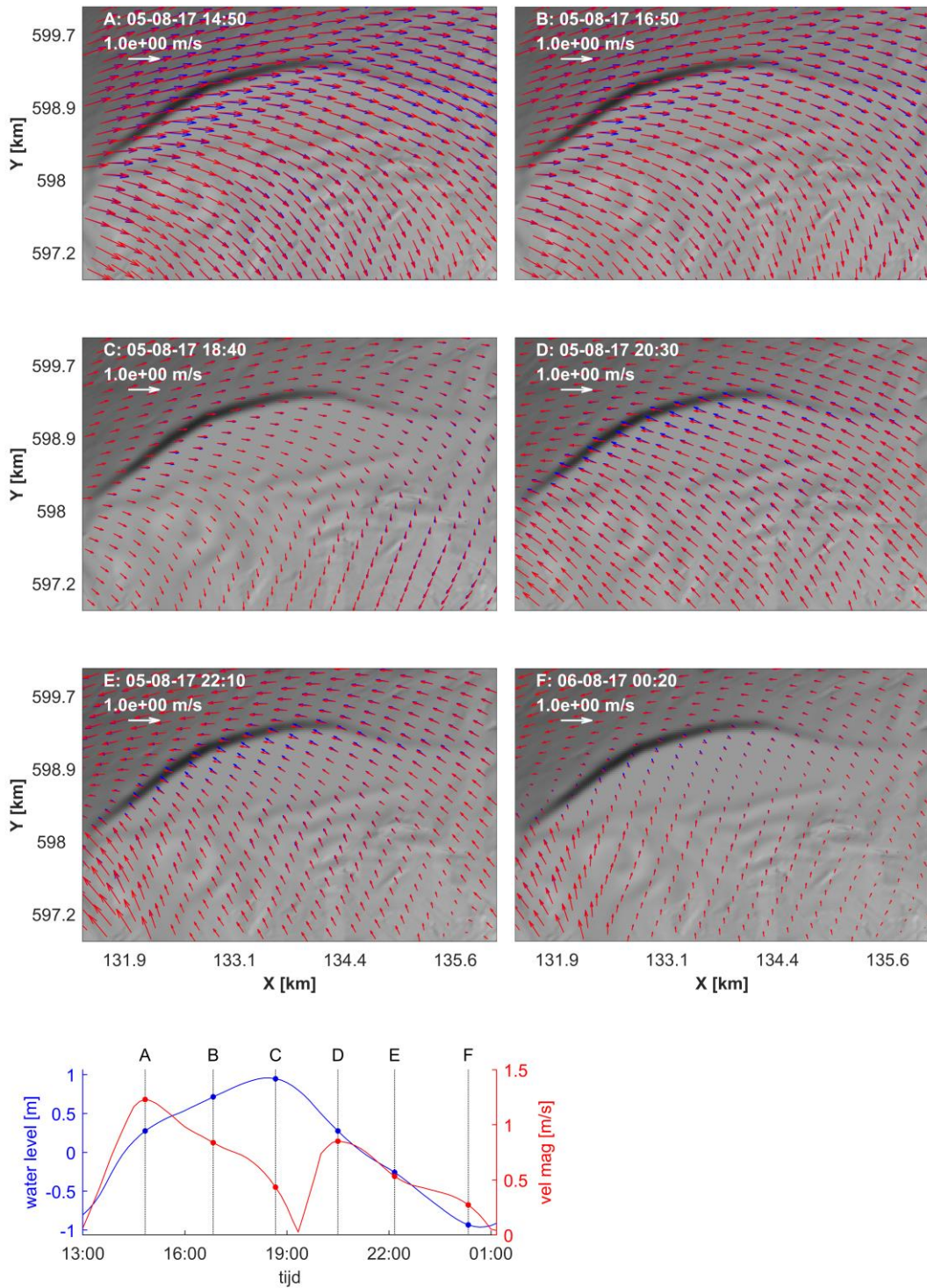
Doordat de morfologische cyclus zich over lange tijd uitstrekt (decaden) en deze niet volledig voorspelbaar is, is het ook noodzakelijke aanvullende indicatoren op te stellen om te toetsten of de morfologische cyclus zich als verwacht gedraagt (is er inderdaad een volgende bankaanlanding zichtbaar, met welk volume en wat is de verwachte respons van de kustlijn) en bij overschrijding van de minimumligging zouden suppleties ingezet moeten worden om de kustveiligheid te garanderen. Zo'n indicator zou bijvoorbeeld het volume in de toekomstige aanlandingsbanken kunnen zijn die op basis van de actieve volumebalans kunnen worden bepaald.

## 8 Referenties

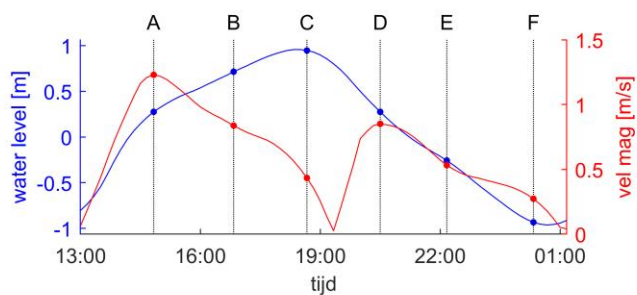
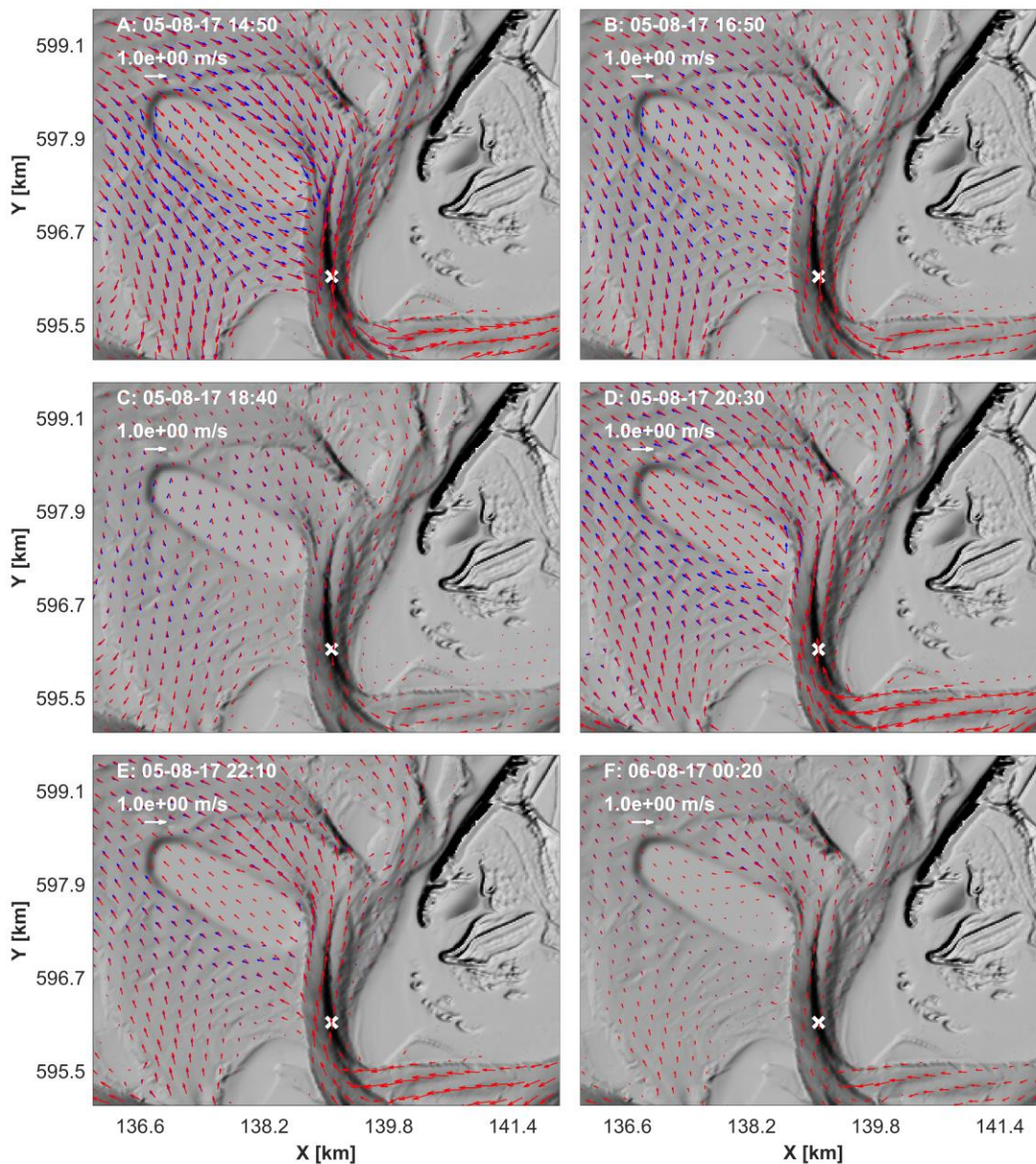
- Elias, E.P.L., 2018. Een actuele sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee (1933-2015). Rapport 11202190-000-ZKS-0013, Deltares, Delft.
- Elias, E.P.L., Roelvink, F, and Pearson, S., 2021. Systeemsuppleties op Eilandkoppen. Rapport 1205236-005, Deltares, Delft, 202 p.
- Elias, E. P., Van der Spek, A. J., Pearson, S. G., & Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology*, 415, 105956.
- Elias, E.P.L., Pearson, S., 2020. SedTRAILS - Sediment TRANsport visualization & Lagrangian Simulator. A novel method to visualize and analyse sediment transport pathways sedtrails. Rapport 236-003-ZKS-0002, Deltares, Delft, 37 p.
- Elias E.P.L., 2021. Morfologie van het Zeegat van het Vlie. Een overzicht van de morfologische ontwikkelingen over de periode 1831-2020. Rapport 11206794-004, Deltares, Delft, 106 p.
- de Graaff, R.F., 2009. SBW Wadden Sea, water level modelling; Calibration hydrodynamic model. Technical report, Deltares, Delft.
- Laan, S.C., 2019. Understanding coastal dynamics at an ebb-tidal delta in the Wadden Sea. A case study of Schiermonnikoog NW with Delft3D Flexible Mesh. MSc. Thesis, Delft University of Technology, Delft, 105 pp.
- Lesser, G.R., J.A. Roelvink, J.A.T.M. van Kester, and Stelling, G.S., 2004, Development and validation of a three-dimensional morphological model: *Coastal Engineering*, v. 51, p. 883–915.
- Nederhoff, C.M., Schrijvershof, R., Tonnon, P.K., van der Werf, J.J., 2016. The Coastal Genesis II Terschelling - Ameland inlet (CGII-TA) model. Model setup, calibration and validation of a hydrodynamic-wave model. Report 1220339-008-ZKS-0004, Deltares, Delft, 88 p.
- Salmon, J., & Holthuijsen, L. H. (2011). Re-scaling the Battjes-Janssen model for depth-induced wave-breaking. *Proceedings of the 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*.
- Van Rijn, L.C., 2007a, Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport: *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, p. 19.
- Van Rijn, L.C., 2007b, Unified view of sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport: *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, p. 22.
- Van Rijn, L.C., 2007c, Unified view of sediment transport by currents and waves. III: Graded beds: *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, p. 15
- Zijl, F., Verlaan, M., & Gerritsen, H., 2013. 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(7), 823–847. <http://doi.org/10.1007/s10236-013-0624-2>.
- Visser, J.C. 1986. Rapport Vlieland, Rijkswaterstaat, dir. Noord-Holland, arr. Hoorn.

# A Modelresultaten

## A.1 Stromingen suppletievarianten ten opzicht van T0 situatie

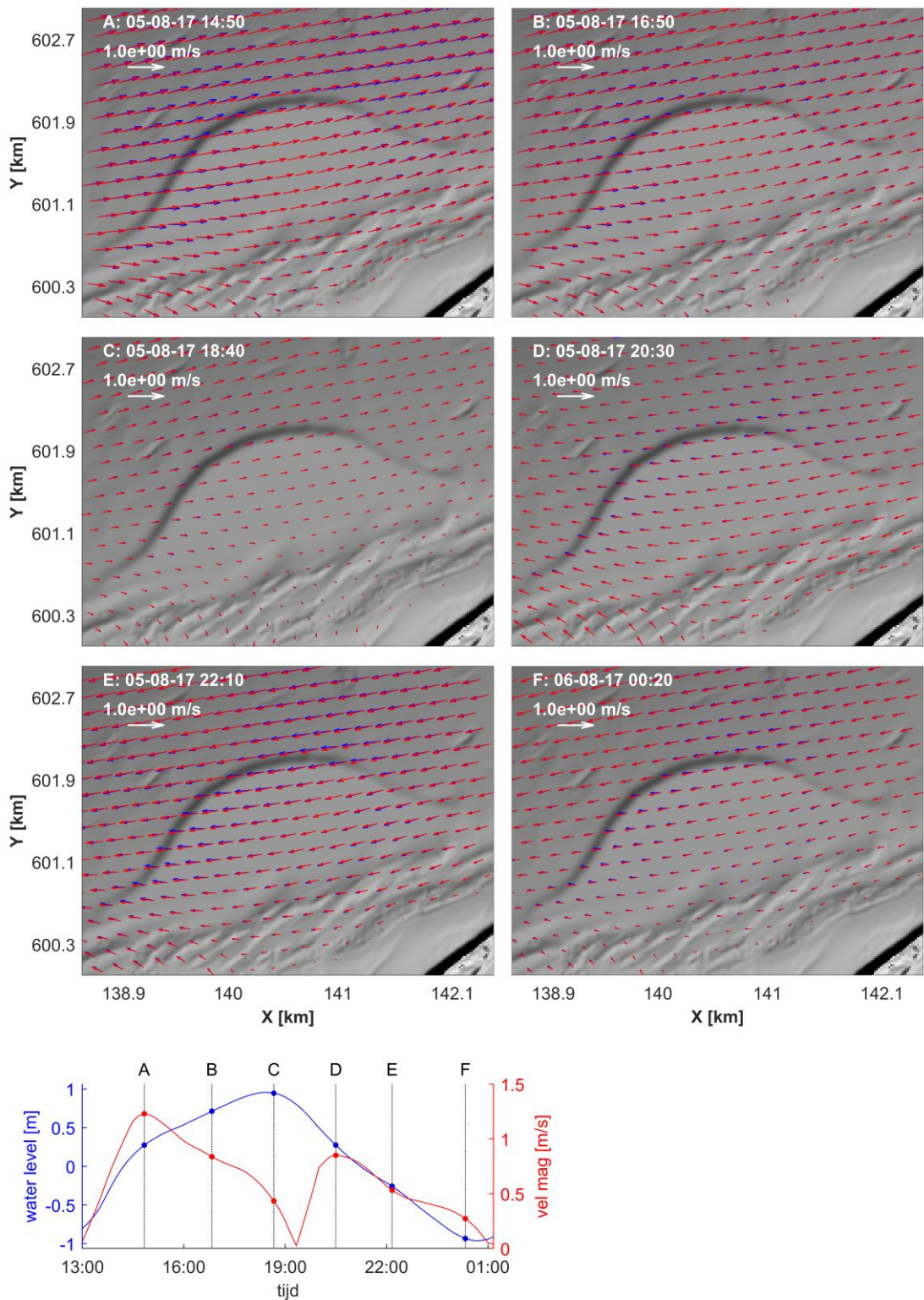


Figuur A-1 Karakteristieke snapshots van de stromingen voor suppletievariant 1 (blauw) en de T0 situatie (rood).

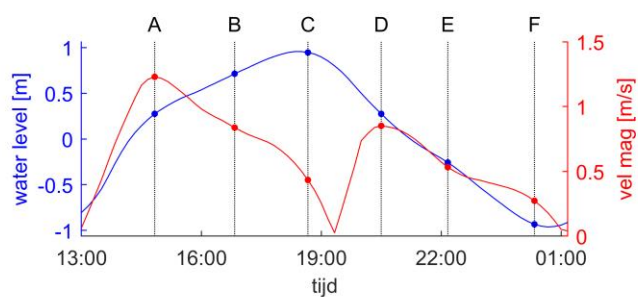
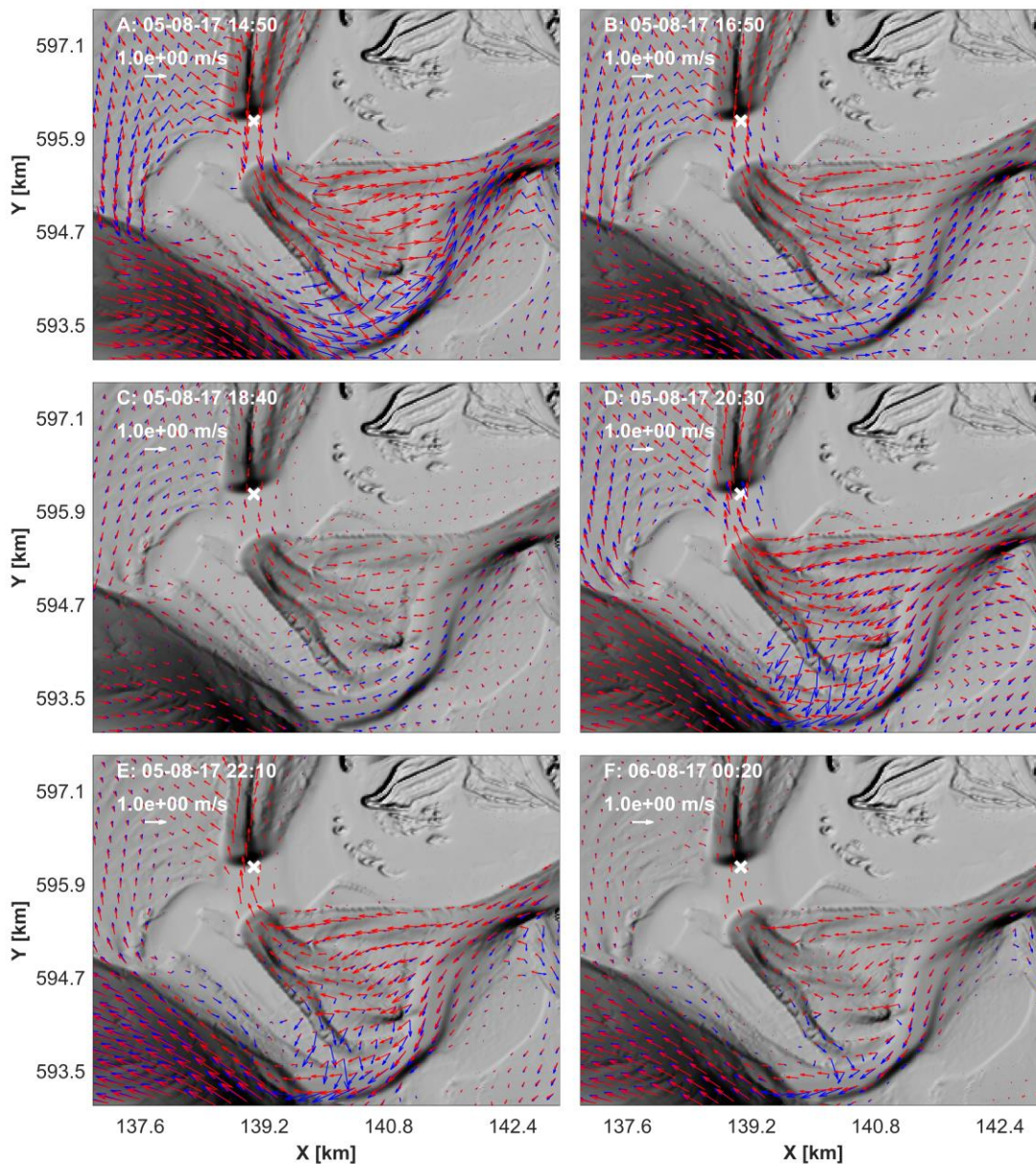


Figuur A-2 Karakteristieke snapshots van de stromingen voor suppletievariant 2 (blauw) en de T0 situatie (rood).



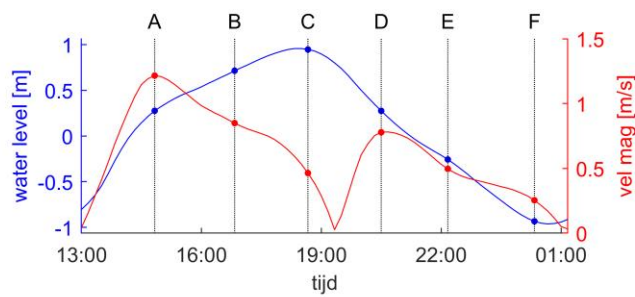
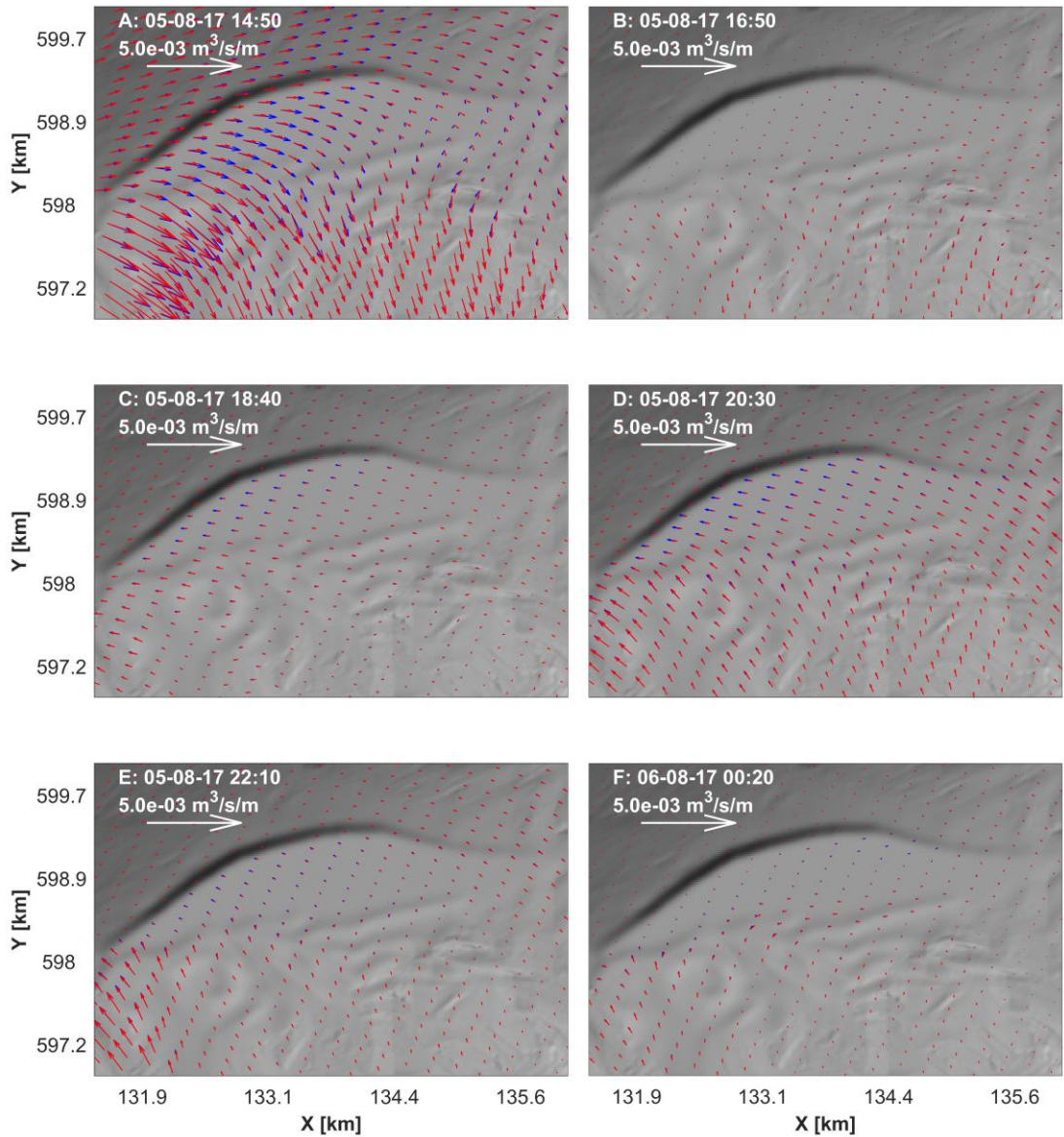


Figuur A-3 Karakteristieke snapshots van de stromingen voor suppletievariant 3 (blauw) en de T0 situatie (rood).

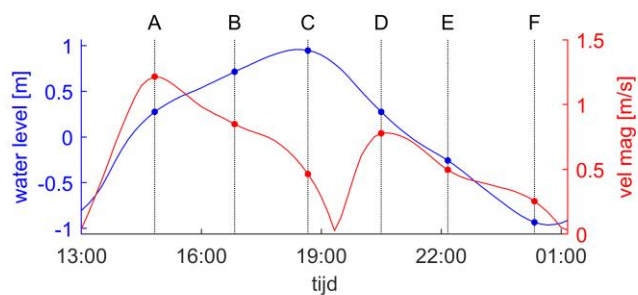
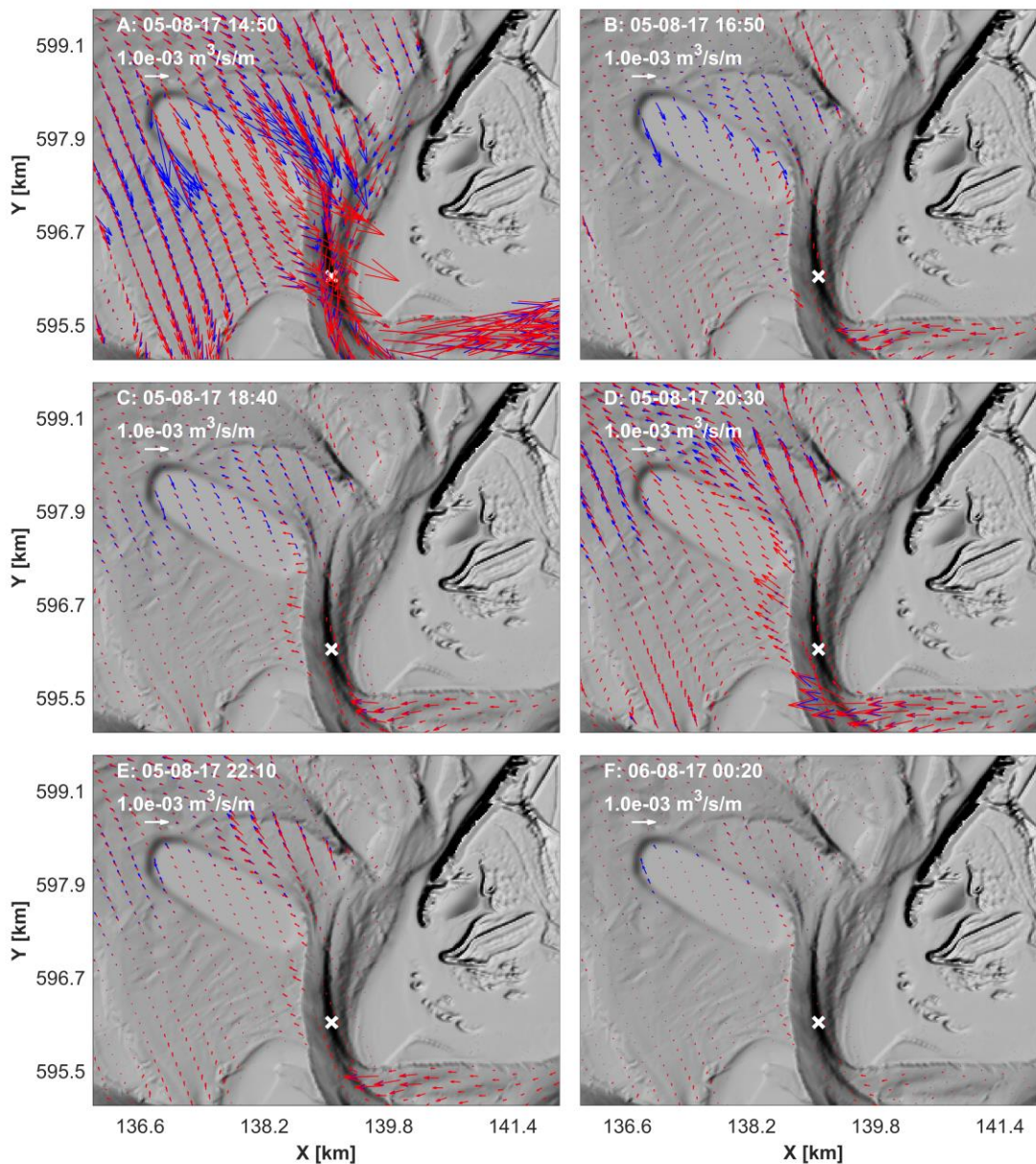


Figuur A-4 Karakteristieke snapshots van de stromingen voor suppletievariant 4 (blauw) en de T0 situatie (rood).

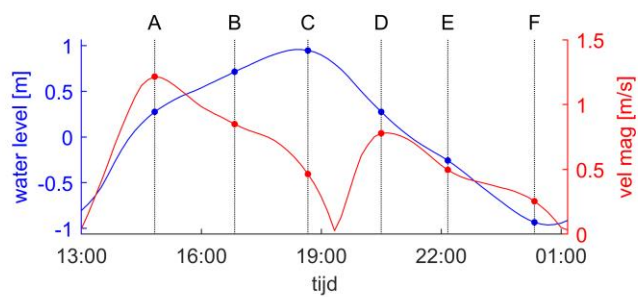
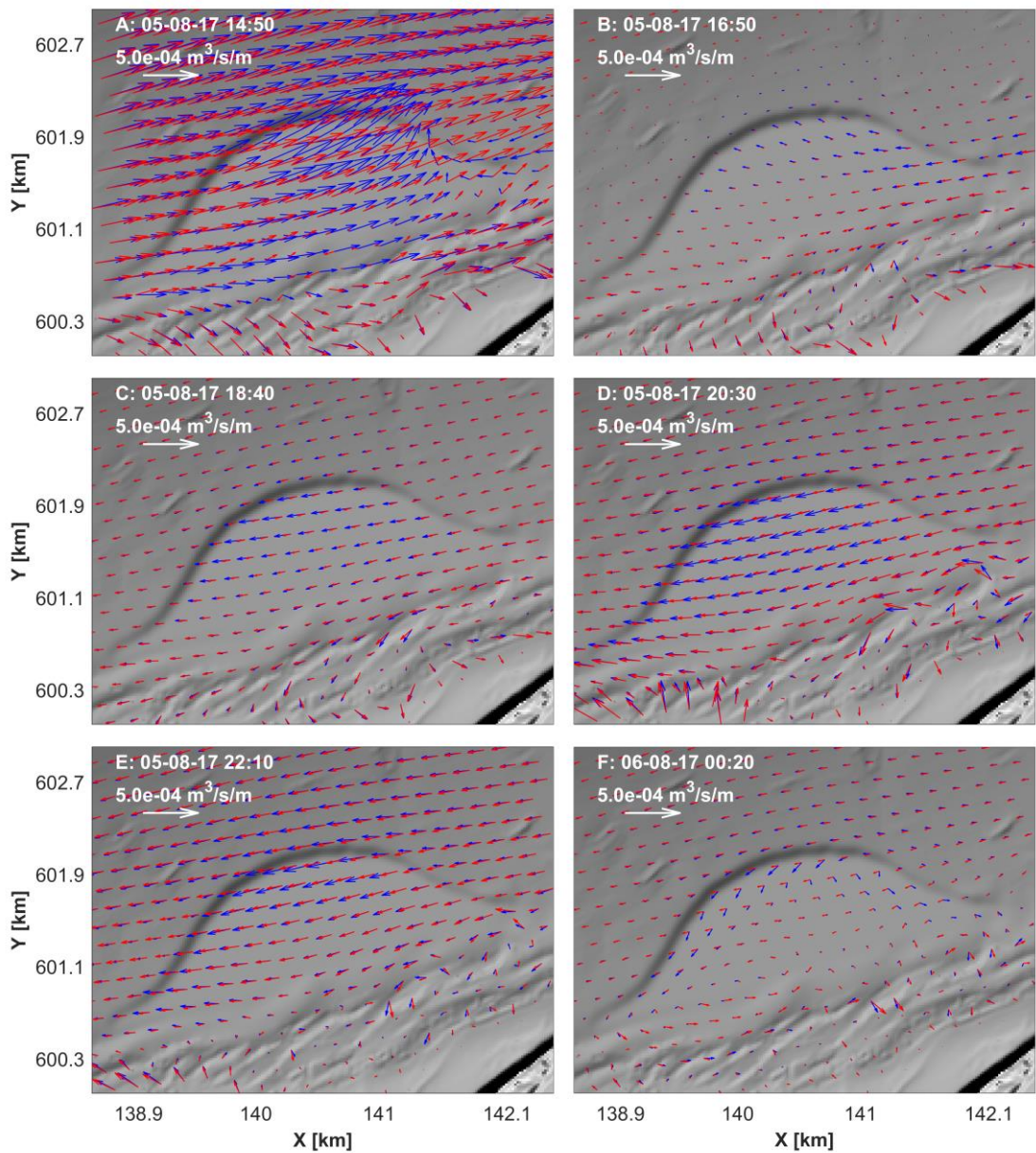
## A.2 Sedimenttransporten suppletievarianten ten opzicht van T0 situatie



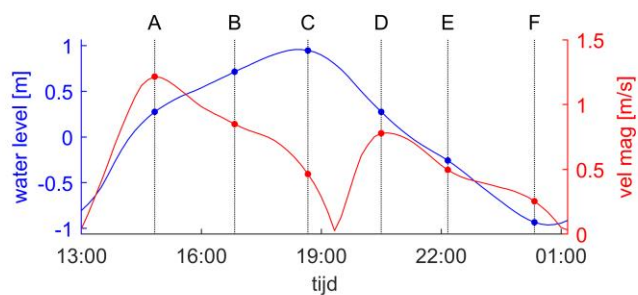
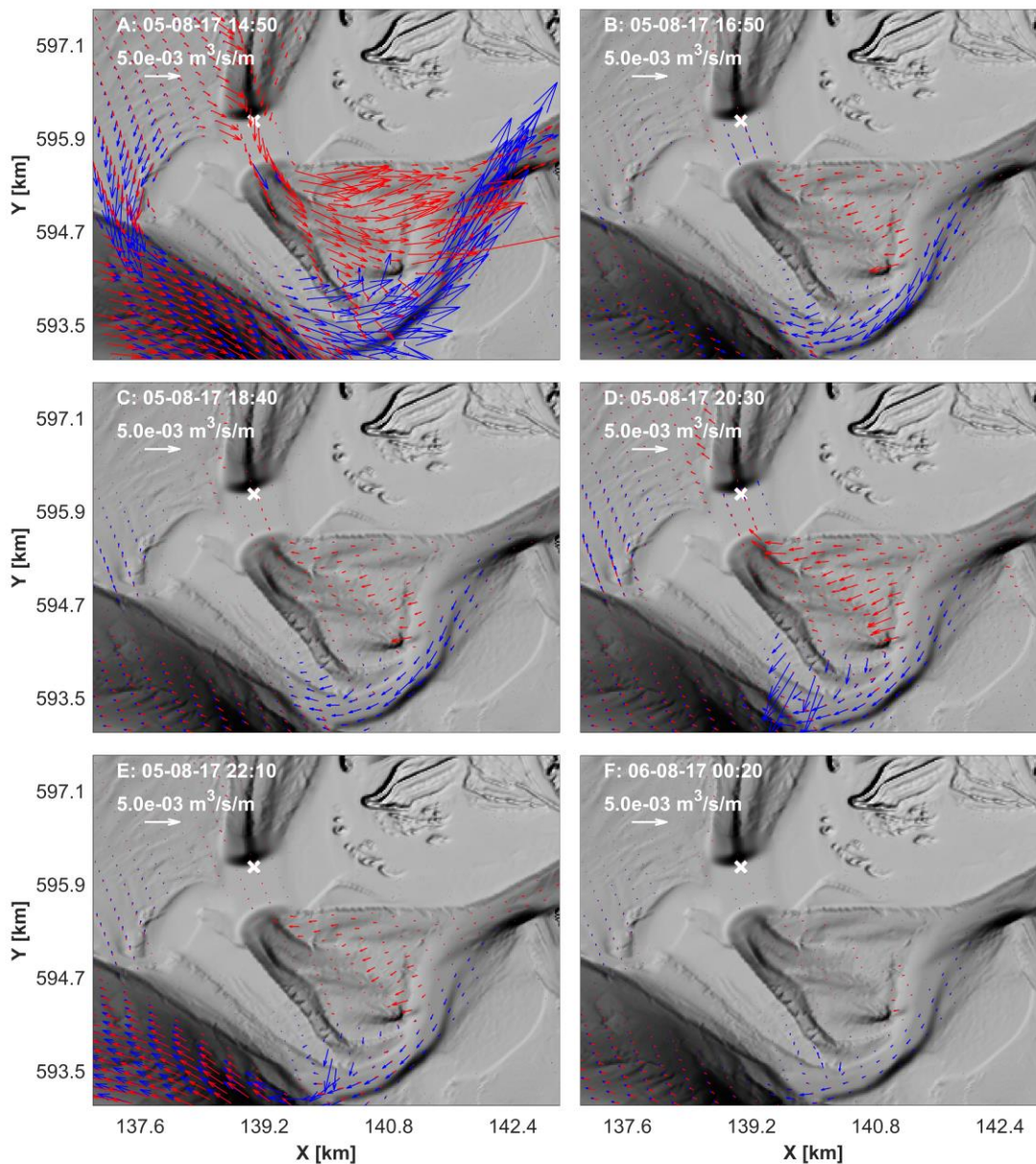
Figuur A-5 Karakteristieke snapshots (zelfde als voor de stromingen) van de sedimenttransporten voor suppletievariant 1 (blauw) en de T0 situatie (rood).



Figuur A-6 Karakteristieke snapshots (zelfde als voor de stromingen) van de sedimenttransporten voor suppletievariant 2 (blauw) en de T0 situatie (rood).

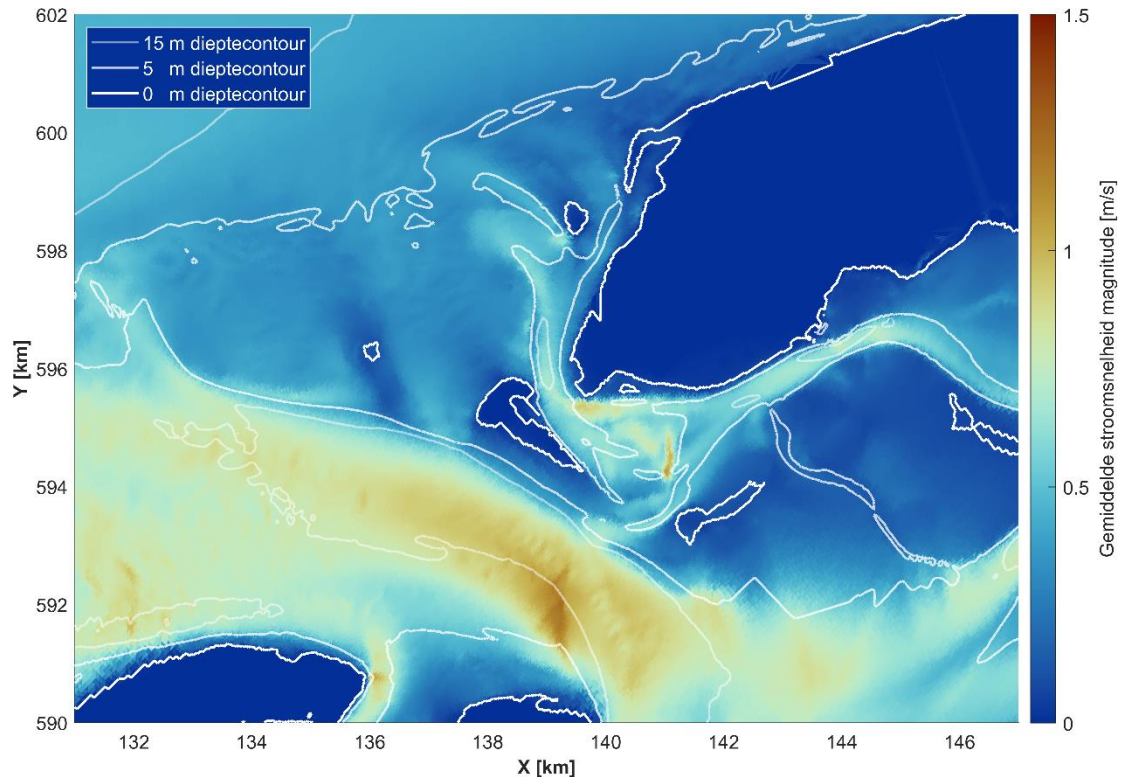


Figuur A-7 Karakteristieke snapshots (zelfde als voor de stromingen) van de sedimenttransporten voor suppletievariant 3 (blauw) en de T0 situatie (rood).

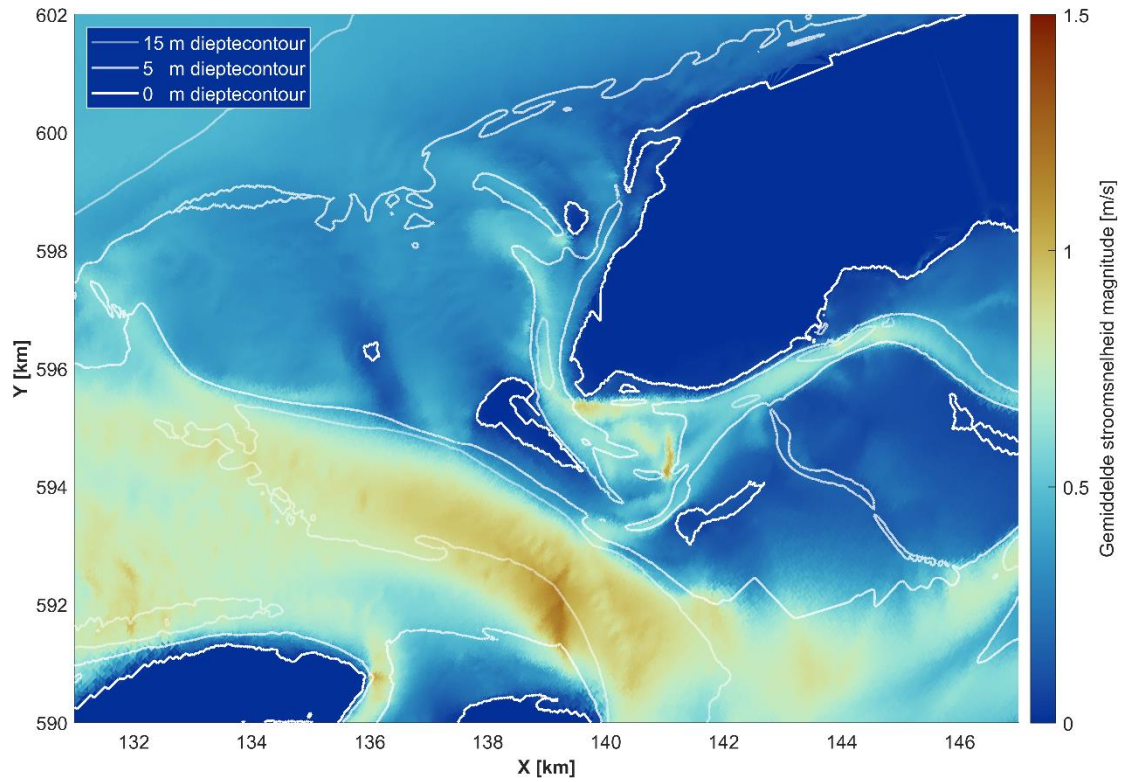


Figuur A-8 Karakteristieke snapshots (zelfde als voor de stromingen) van de sedimenttransporten voor suppletievariant 4 (blauw) en de T0 situatie (rood).

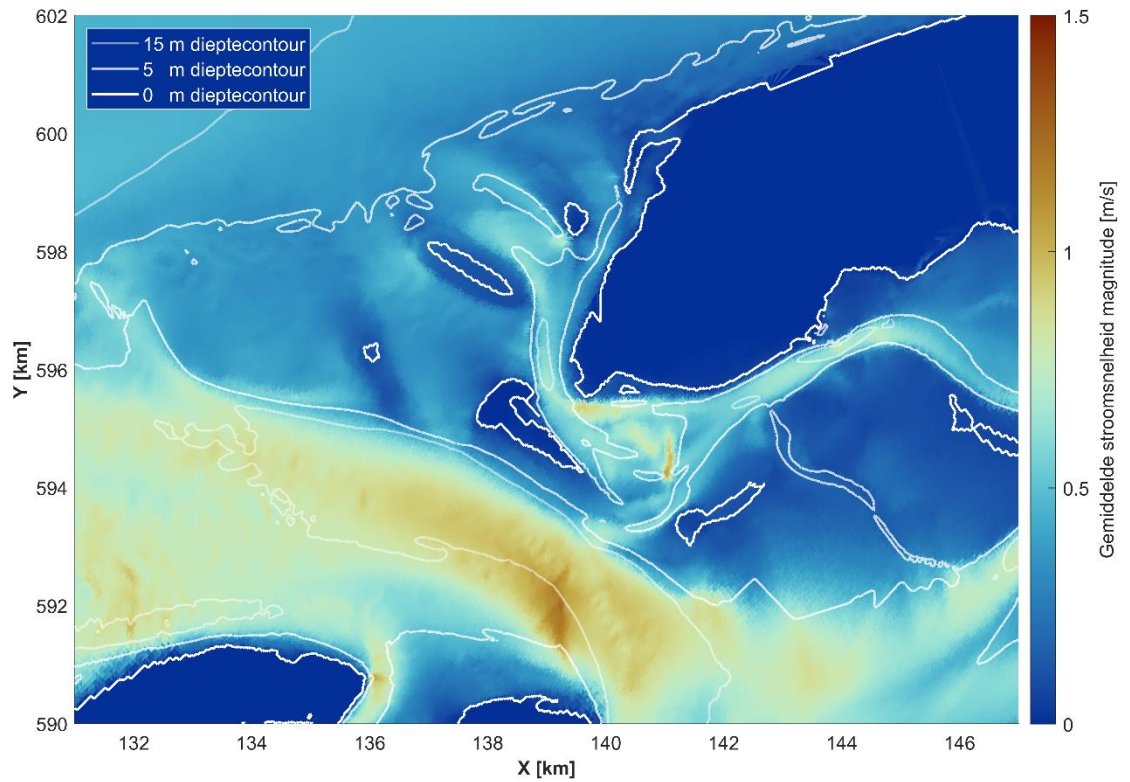
### A.3 Snelheidsmagnitude



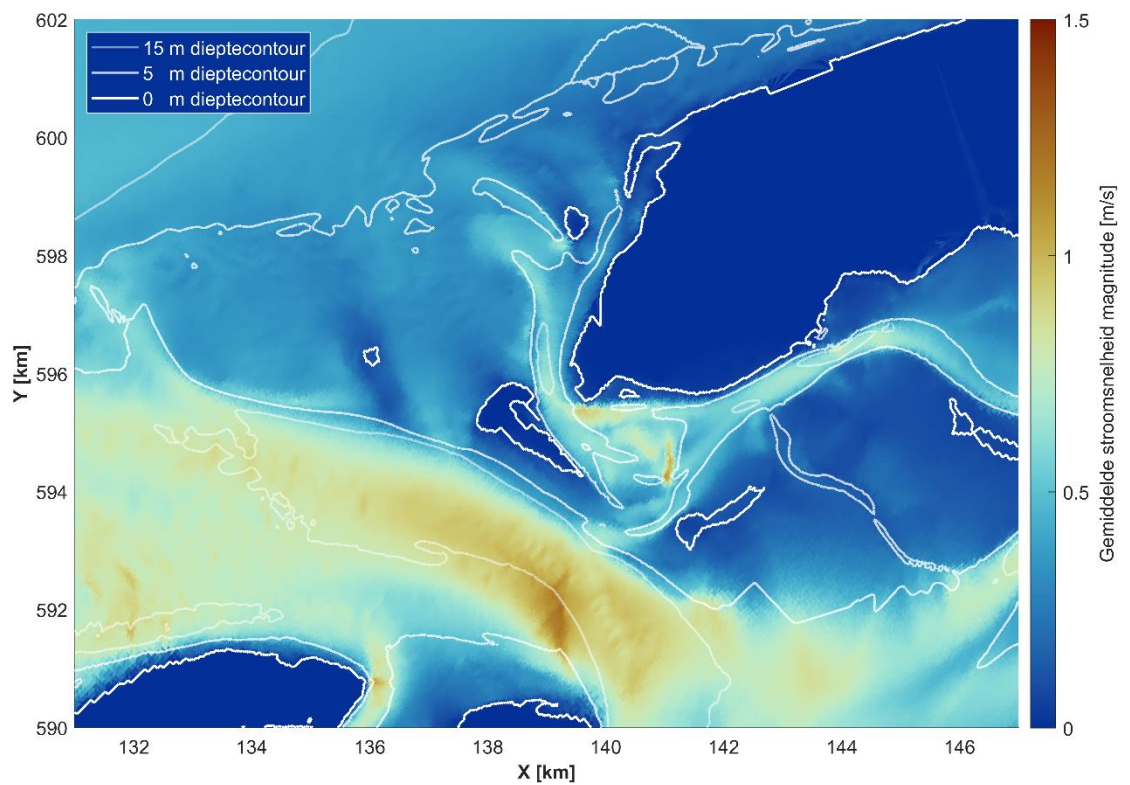
Figuur A-9 Gemiddelde snelheidsmagnitude van het morfologische getij voor de T0 situatie.



Figuur A-10 Gemiddelde snelheidsmagnitude van het morfologische getij voor supplementvariant 1

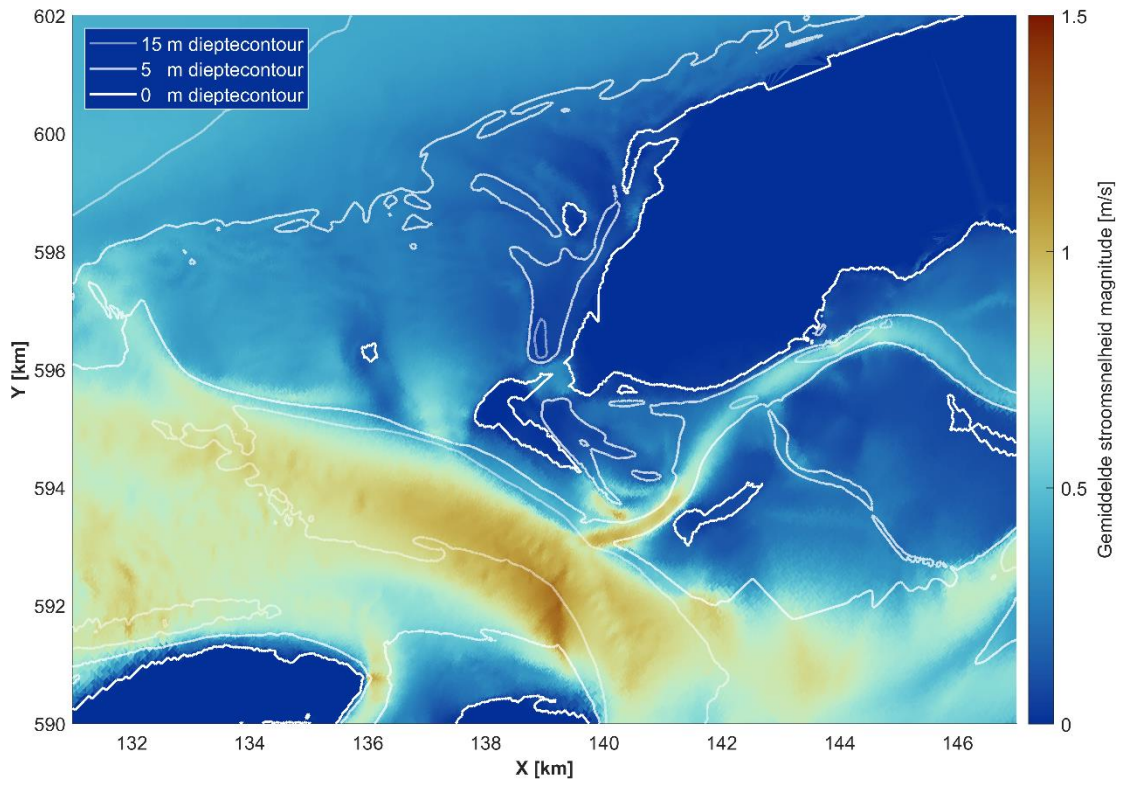


Figuur A-11 Gemiddelde snelheidsmagnitude van het morfologische getij voor suppletievariant 2



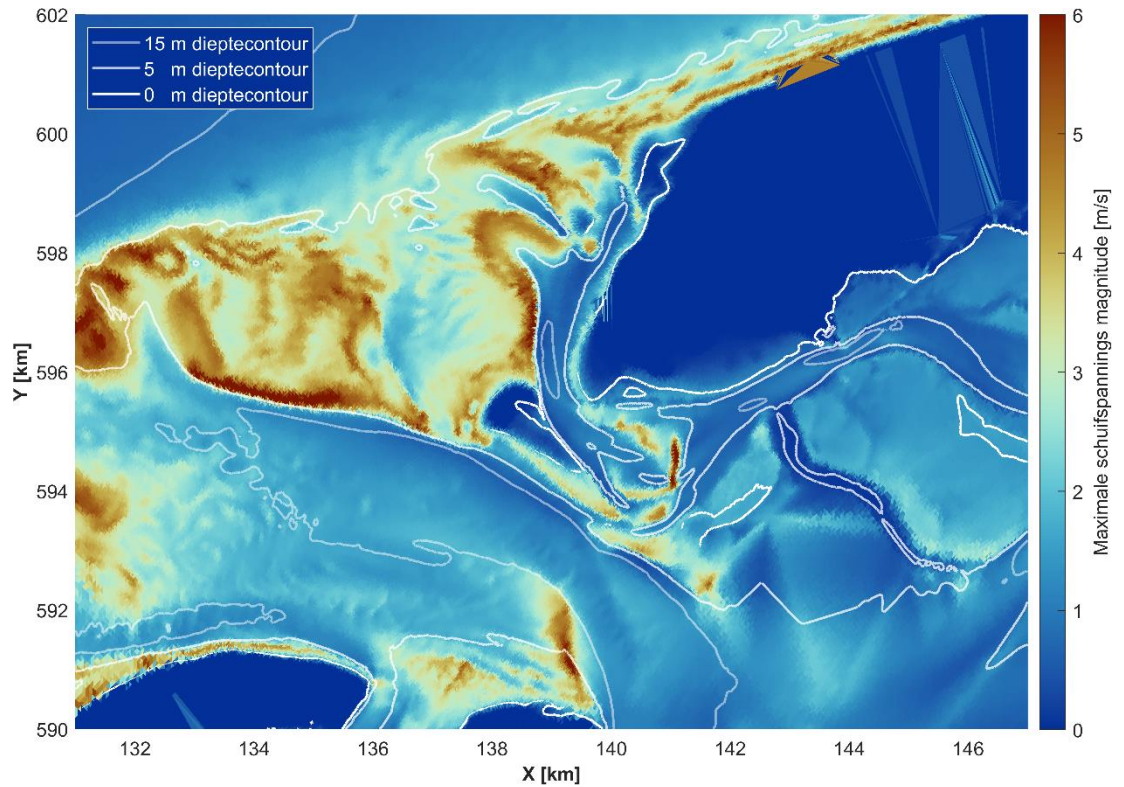
Figuur A-12 Gemiddelde snelheidsmagnitude van het morfologische getij voor suppletievariant 3



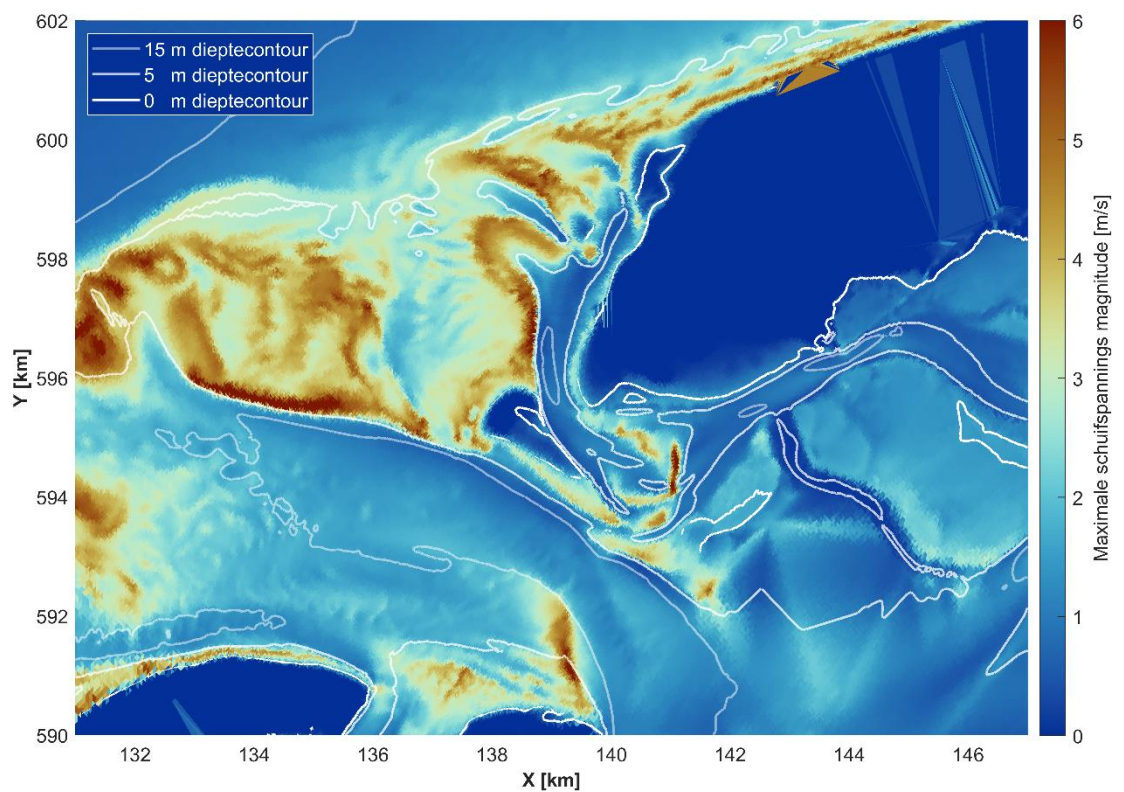


Figuur A-13 Gemiddelde snelheidsmagnitude van het morfologische getij voor suppletievariant 4

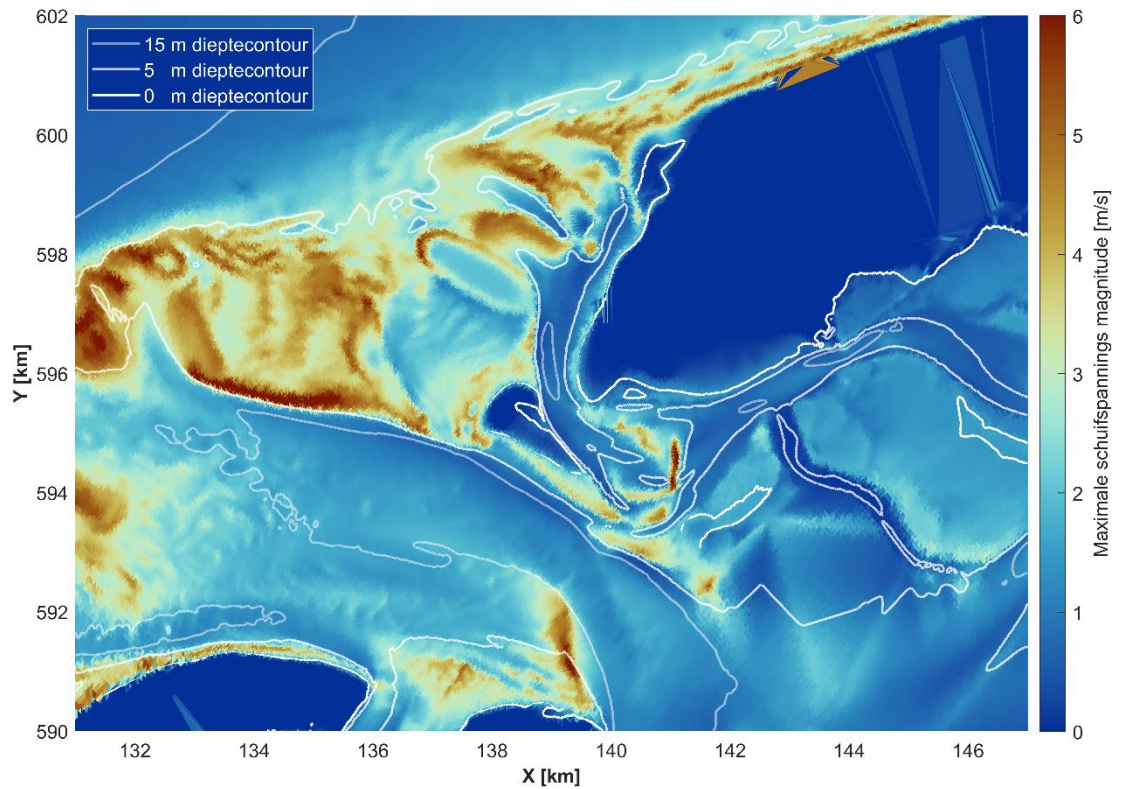
## A.4 Bodemschuifspanningsmagnitude inclusief golven



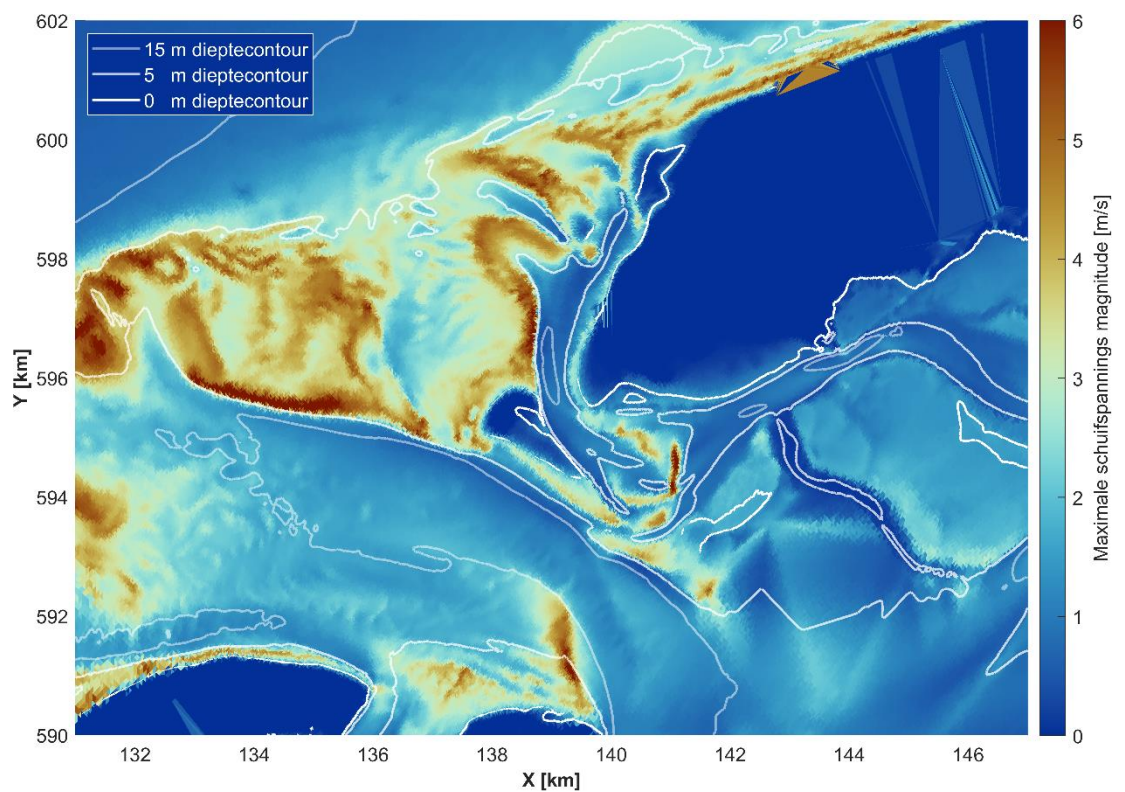
Figuur A-14 Gemiddelde bodemschuifspanningsmagnitude van het morfologische getij voor de T0 situatie. De bodemschuifspanning bestaat uit de maximale magnitude van de stroming-golf interactie.



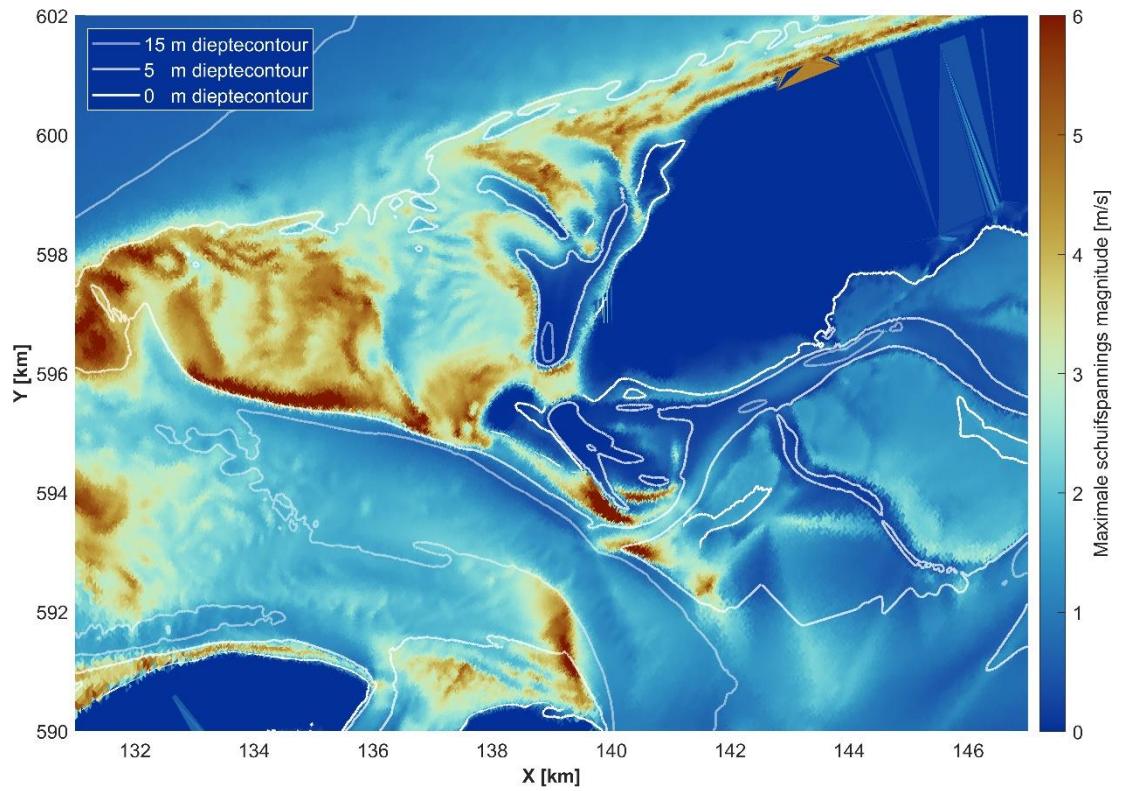
Figuur A-15 Gemiddelde bodemschuifspanningsmagnitude van het morfologische getij voor suppletievariant 1. De bodemschuifspanning bestaat uit de maximale magnitude van de stroming-golf interactie.



*Figuur A-16 Gemiddelde bodemschuifspanningsmagnitude van het morfologische getij voor suppletievariant 2. De bodemschuifspanning bestaat uit de maximale magnitude van de stroming-golf interactie.*

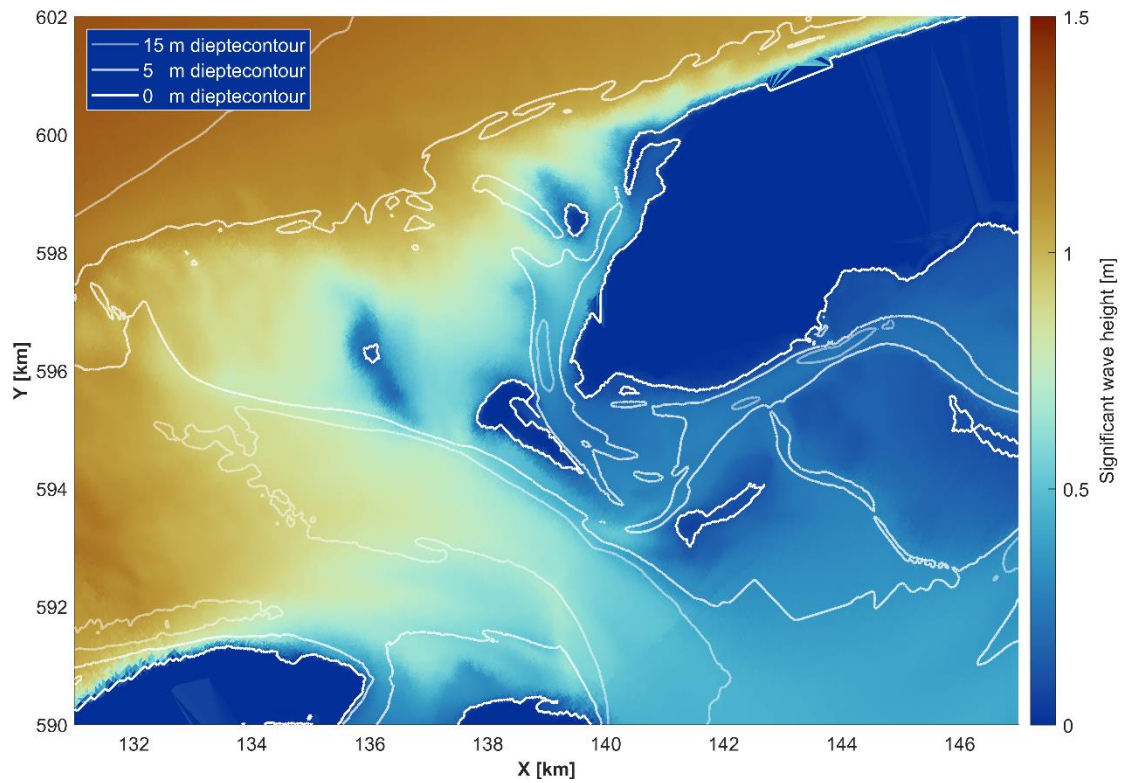


*Figuur A-17 Gemiddelde bodemschuifspanningsmagnitude van het morfologische getij voor suppletievariant 3. De bodemschuifspanning bestaat uit de maximale magnitude van de stroming-golf interactie.*

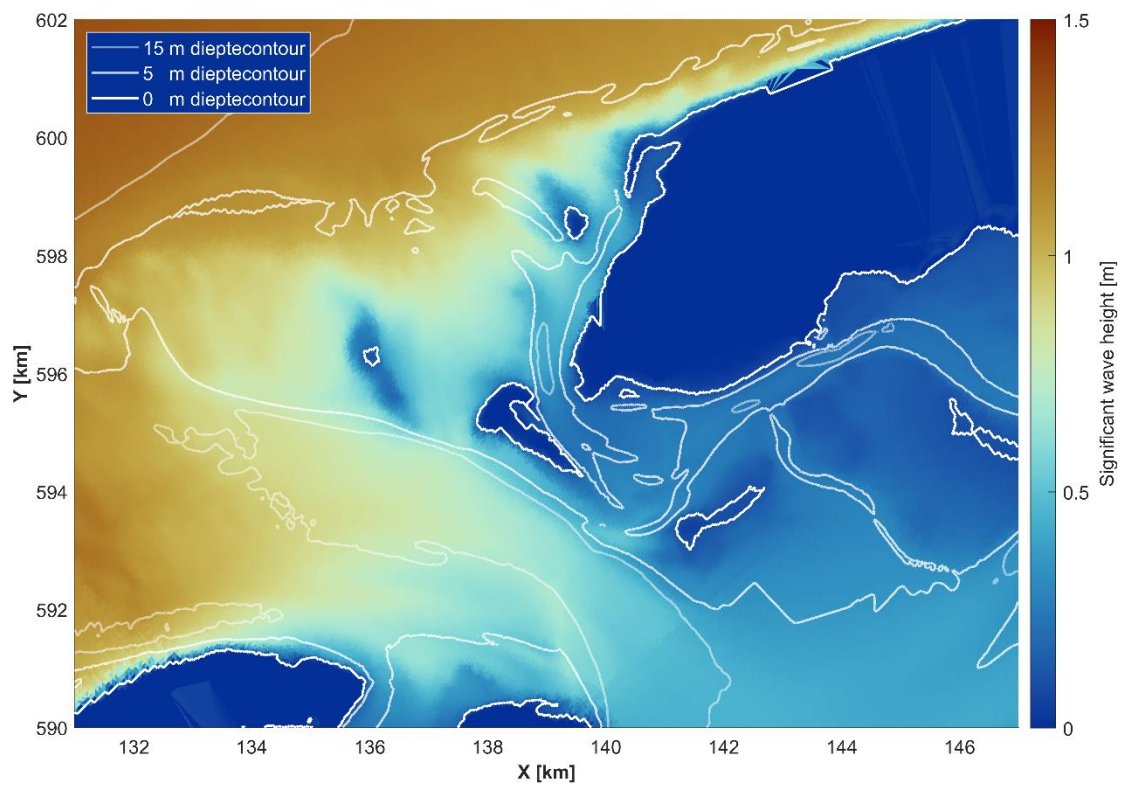


*Figuur A-18 Gemiddelde bodemschuifspanningsmagnitude van het morfologische getij voor suppletievariant 4. De bodemschuifspanning bestaat uit de maximale magnitude van de stroming-golf interactie.*

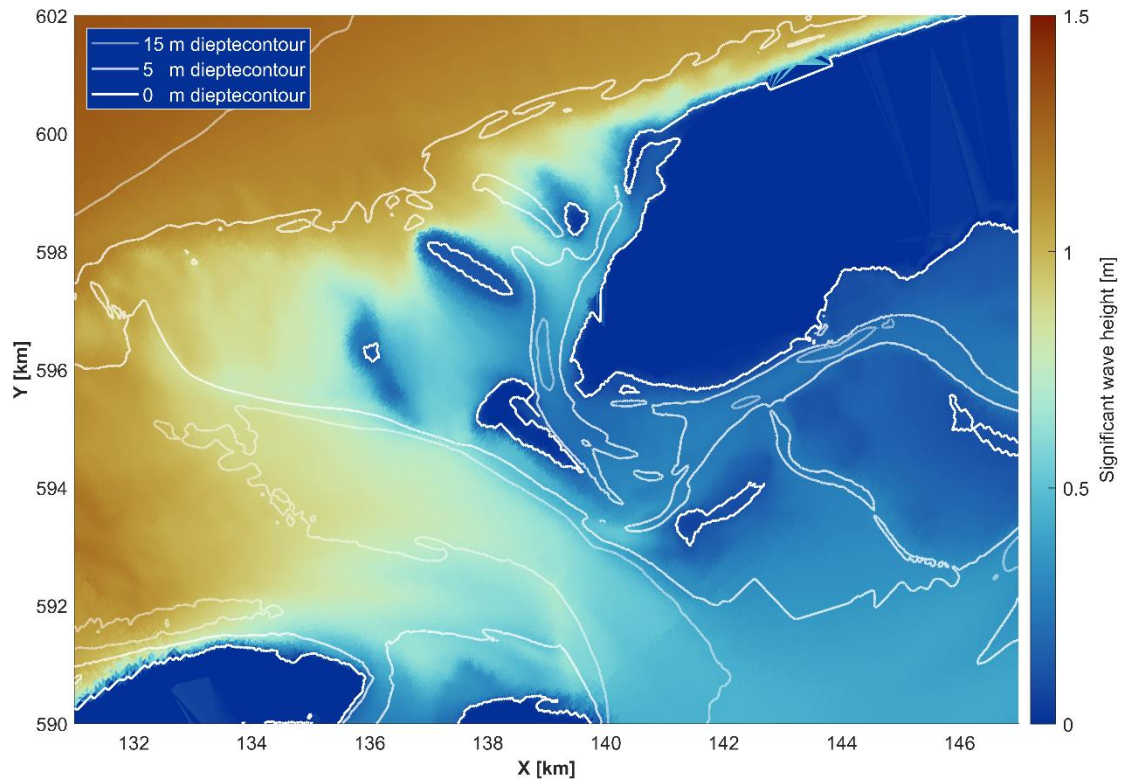
## A.5 Significante golfhoogte



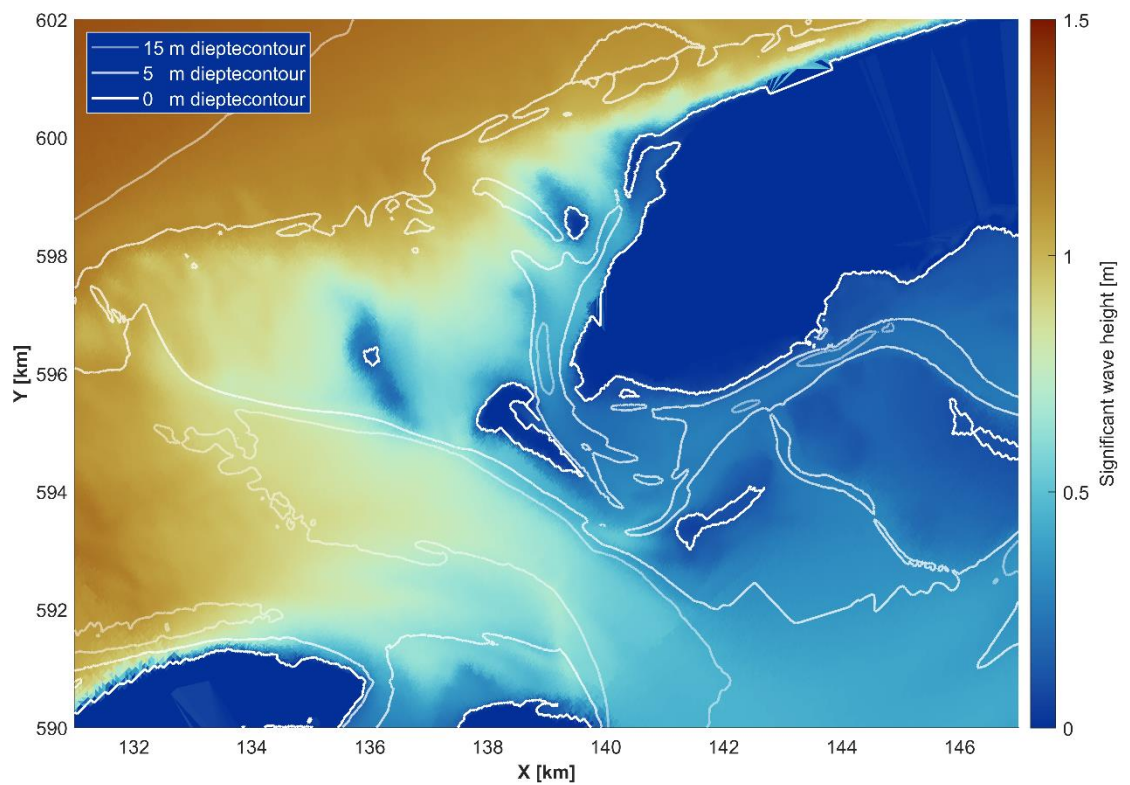
Figuur A-19 Gemiddelde significante golfhoogte van het morfologische getij voor de T0 situatie.



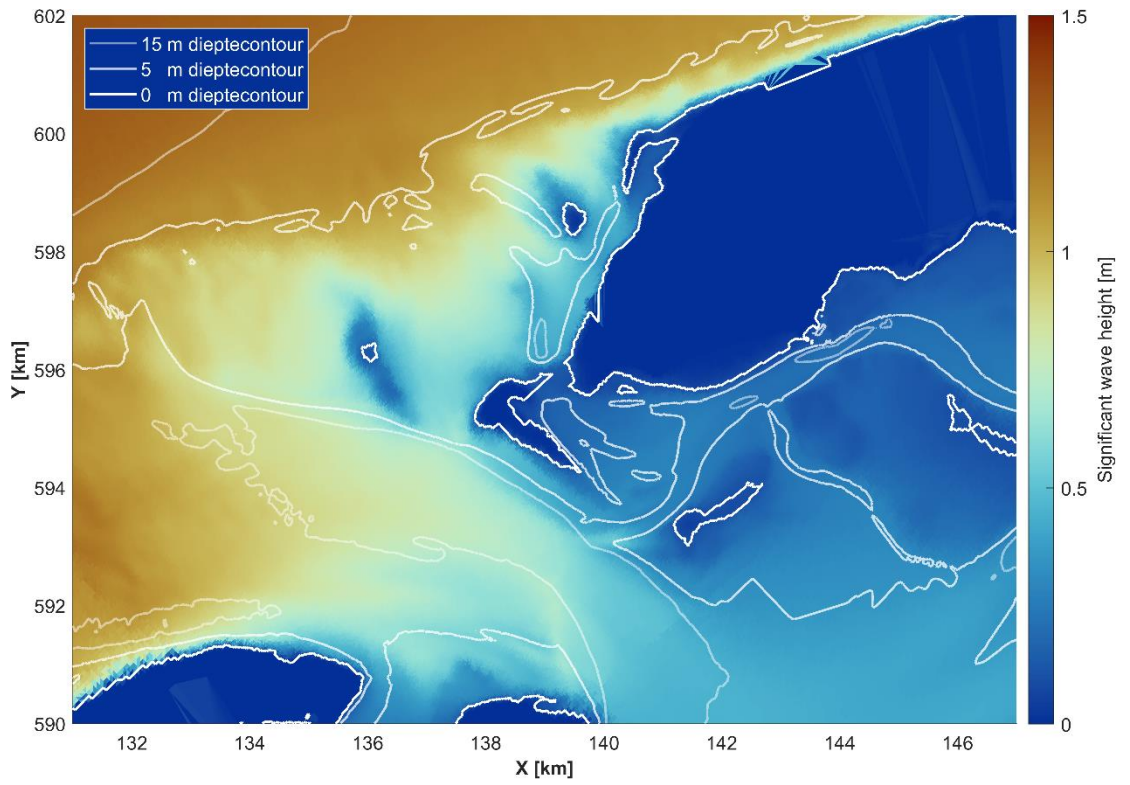
Figuur A-20 Gemiddelde significante golfhoogte van het morfologische getij voor suppletievariant 1.



Figuur A-21 Gemiddelde significante golfhoogte van het morfologische getij voor suppletievariant 2.

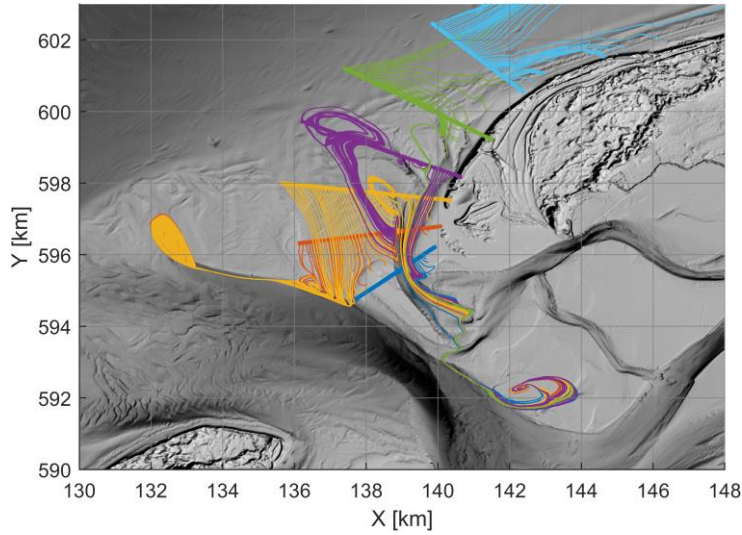


Figuur A-22 Gemiddelde significante golfhoogte van het morfologische getij voor suppletievariant 3.

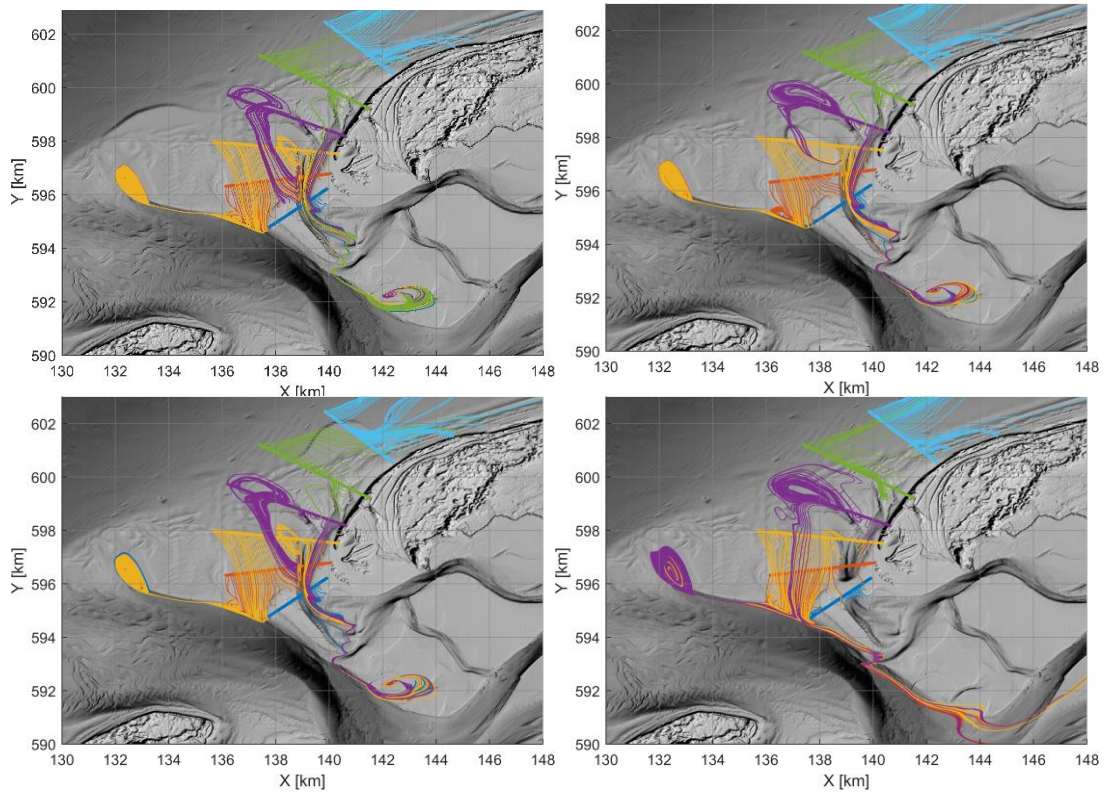


Figuur A-23 Gemiddelde significante golfhoogte van het morfologische getij voor suppletievariant 4.

## A.6 SedTRAILS raaien Terschelling



Figuur A-24: Herhaling van Figuur 6-8; SedTRAILS resultaten voor bronnen langs de kust van Terschelling-West voor de T0 situatie.



Figuur A-25: SedTRAILS resultaten voor bronnen langs de kust van Terschelling-West. Linksboven: suppletie 1, Rechtsboven: suppletie 2, Linksonder: Suppletie 3, Rechtsonder: Suppletie 4.



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](http://www.deltares.nl)