

Evaluatie Pilot Westgat

Een analyse van de stroming en sedimenttransporten in de verdieping



Evaluatie Pilot Westgat

Een analyse van de stroming en sedimenttransporten in de verdieping

Auteur(s)

Edwin Elias

Tommer Vermaas

Evaluatie Pilot Westgat

Een analyse van de stroming en sedimenttransporten in de verdieping

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Herman Mulder
Referenties	-
Trefwoorden	Sedimenttransport, Baggeren, Buitendelta, Westgat, Friesche Zeegat, Delft3D

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	09-01-2020
Projectnummer	11203669-005
Document ID	11203669-005-ZKS-0002
Pagina's	85
Status	

Auteurs(s)

	Edwin Elias	
	Tommer Vermaas	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Edwin Elias 	Bart Grasmeijer 	Toon Segeren	
	Tommer Vermaas 			

Samenvatting

In juli 2018 is de noordelijke drempel in het Westgat in de buitendelta van het Friese Zeegat bij wijze van proef verdiept. In voorliggende studie zijn met behulp van een Delft3D-model de stromingen en sedimenttransporten in en nabij het Westgat en de effecten van de verdieping hierop in kaart gebracht. Met veldmetingen en de modelresultaten is gekeken naar het effect van de verdieping en de verwachte snelheid van aanzanding in de toekomst.

De combinatie van uitvoerige metingen en de toepassing van een proces-gebaseerd model stelt ons in staat het gedrag van de verdieping te begrijpen en daardoor een voorspelling naar de toekomst te maken. Zowel het model als de bodemmetingen geven ons een duidelijk beeld achter de redenen van de geobserveerde stabiliteit van de geul en de opgetreden sedimentatie.

Met een goed gekozen locatie, in een relatief laag dynamisch deel van de buitendelta, kan een verdieping ook voor langere tijd, natuurlijk gehandhaafd worden. Op dit moment zijn er geen indicaties dat er ter plaatse van de verdieping grootschalige veranderingen optreden. Drempelvorming tussen de verdieping en het Westgat lijkt het belangrijkste knelpunt te zijn. Deze drempelvorming is voorspelbaar aan de hand van de gemeten aanzanding. Afhankelijk van het stormseizoen zal er meer of minder aanzanding optreden. De voorspelbaarheid van deze aanzanding is beperkt, maar onder gemiddelde omstandigheden, zal waarschijnlijk de drempelvorming de maatgevende factor vormen.

Een belangrijke les die uit de aanleg van de verdieping getrokken kan worden is dat dit soort ingrepen wel degelijk uitgevoerd kunnen worden. Grootschalige beïnvloeding treedt door de gekozen verdieping niet op, grootschalige effecten zijn dan ook niet te verwachten. De natuurlijke dynamiek geeft veel grotere veranderingen dan de verdieping zelf.

Over Deltares

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme innovaties, oplossingen en toepassingen voor mens, milieu en maatschappij. We richten ons voornamelijk op delta's, kustregio's en riviergebieden. Omdat het beheer van deze dichtbevolkte en kwetsbare gebieden complex is, werken we nauw samen met overheden, ondernemingen, kennisinstellingen en universiteiten in binnen- en buitenland. Ons motto is 'Enabling Delta Life'.

Als toegepast kennisinstituut zijn we succesvol wanneer onze kennis wordt verzilverd in en voor de samenleving. We stellen hoge eisen aan de kwaliteit van onze kennis en adviezen, rekening houdend met nieuwe wetenschappelijke inzichten, maar ook met de gevolgen die onze adviezen hebben voor milieu en samenleving.

Al onze opdrachten en projecten leveren een bijdrage aan het verstevigen van de kennisbasis. We kijken vanuit een lange termijn perspectief, naar bijdragen voor de oplossingen voor nu. Wij hechten zeer aan openheid en transparantie. Die houding is onder meer terug te zien in het vrij toegankelijk maken van de door Deltares ontwikkelde software en modellen. Open source werkt, is onze vaste overtuiging. Deltares heeft ruim 800 medewerkers en is gevestigd in Delft en Utrecht.

www.deltares.nl

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond en aanleiding van het pilotproject vaargeulverdieping Westgat	7
1.2	Onderzoeksvragen voor de Pilot Westgat	8
1.3	Doelstelling huidige studie	9
2	Model en methode	11
2.1	Delft3D Stromings- en golfmodel	11
2.2	Sedimenttransportparameters en modelbodems	12
2.3	Schematisatie van getij en golven	16
2.4	Modelvalidatie	18
3	Ontwikkeling verdieping o.b.v. metingen	25
4	Model resultaten	33
4.1	Stromingen	33
4.2	Golven	37
4.3	Sediment transport	40
4.3.1	Sediment transportpatronen	40
4.3.2	Sediment budget	43
4.3.3	Sediment tracer simulaties	47
5	Synthese en conclusies	50
5.1	Synthese	50
5.2	Conclusies	51
6	Referenties	54
A	Son golfdata	55
B	SWAN modelresultaten	57
C	Kaarten stromingen	61
D	Kaarten sedimenttransporten	74

1 Inleiding

Rijkswaterstaat is 2016 gestart met een programma voor de ontwikkeling van kennis over de morfologie van de Nederlandse Waddenzee en voor het inbedden hiervan in beleid en beheer. In het programma wordt morfologische kennis op een structurele manier verzameld, geanalyseerd, geordend en geborgd. Daarnaast wordt de kennis toegankelijk gemaakt voor beleids- en beheervraagstukken op het gebied van veiligheid, bereikbaarheid, natuur en overige gebruiksfuncties. Hiertoe wordt afstemming gezocht met beleidsmakers, beheerders, adviseurs, wetenschappers en gebruikers van het wad.

In het kader van het programma worden ter bevordering van de onderlinge uitwisseling en borging van de morfologische kennis ook onderzoeksopdrachten uitgevoerd vanuit een specifiek project. Dit rapport wordt uitgebracht als onderdeel van het onderzoek naar de sedimentatie in een gebaggerde geul in de buitendelta van de Zoutkamperlaag voor het pilotproject vaargeulverdieping Westgat, in opdracht van Rijkswaterstaat Noord-Nederland. De vaargeulverdieping is uitgevoerd door de provincie en de haven van Lauwersoog om de doorvaart voor visserij en andere scheepvaart te verbeteren.

1.1 Achtergrond en aanleiding van het pilotproject vaargeulverdieping Westgat

Het Westgat is de noordelijkste eb-gedomineerde buiten-deltageul in de Zoutkamperlaag, in het Friesche Zeegat (zie Figuur 1.1). Deze geul wordt gebruikt als vaarroute tussen Lauwersoog en de Noordzee en is belangrijk voor met name de visserij en de recreatievaart. Het Westgat wordt niet onderhouden door Rijkswaterstaat, omdat volgens de Planologische Kern Beslissing-Waddenzee en daaronder vallende beheerplannen in principe niet wordt gebaggerd in de buitendelta's van de Waddenzee. Dit, omdat het een beschermd natuurgebied betreft en de gevolgen voor het onderhoud in een dergelijk hoog dynamisch systeem zeer moeilijk te voorspellen zijn (Mulder & Lofvers, 2015).

Sinds 2013 heeft zich in het Westgat een hoge rug (drempel) ontwikkeld, op de overgang naar de Noordzee. Daardoor voldoet een gedeelte van de vaargeul niet meer aan de streefdiepte van minimaal NAP -5 m op het traject tussen Lauwersoog en de Noordzee. De vaargeul kan daardoor niet meer bij gemiddelde getijcondities betrouwbaar worden gebruikt door de aanwezige scheepvaart.

In het beheerplan voor de Noordzeekustzone is opgenomen dat in de buitendelta's van de Waddenzee in principe niet wordt ingegrepen gezien de grote natuurlijke dynamiek en onduidelijkheid over de mogelijkheid om er duurzaam en economisch verantwoord te kunnen ingrijpen. Vanwege dit risico heeft Rijkswaterstaat geen opdracht om hier te baggeren. In samenspraak met alle betrokkenen heeft de provincie Groningen, gemeente het Hogeland en de haven van Lauwersoog besloten om eenmalig een baggeringreep uit te voeren. Daarbij bestond de behoefte om te onderzoeken in hoeverre de ingreep past in de morfologische ontwikkelingen en of het (economisch en ecologisch) verantwoord is hier door baggerwerk de vaarweg te onderhouden. Met Rijkswaterstaat is vervolgens de afspraak gemaakt om samen met Deltares de ingreep met bestaande en nieuwe kennis over dit gebied te evalueren. ,

In juli 2018 is de noordelijke drempel in het Westgat in de buitendelta van het Friese Zeegat verdiept met ca. een meter en een oppervlakte van ca. 250.000 m² en een volume van ca. 180.000 m³, in opdracht van de haven van Lauwersoog, gemeente het Hogeland en de Provincie Groningen. Dit is een eenmalige ingreep en heeft de functie van een pilot. Ten behoeve van de evaluatie en algehele morfologische kennisontwikkeling zijn door Rijkswaterstaat extra monitoring en extra metingen rondom de verdieping uitgevoerd. De (morfologische) evaluatie van de ingreep is uitgevoerd door Deltares in 2018 en 2019.

1.2 Onderzoeksvragen voor de Pilot Westgat

De hoofdvraag voor de evaluatie is als volgt geformuleerd:

Wat is de verwachte snelheid van aanzanding van een gebaggerde geul door het Westgat? (de achterliggende vraag hierbij is "hoe duurzaam is deze ingreep")

Onderzoek voor deze hoofdvraag is in twee stappen opgepakt:

- Analyse over grootschalige (morfologische) werking in het Friesche zeegat
- Werking op kleinere schaal van het Westgat (huidige studie).

De analyse op grotere schaal heeft inzicht gegeven in hoe de configuratie van de buitendelta – de ligging van de geulen en platen – invloed heeft op de ontwikkeling van het Westgat. De stromingspatronen en debieten geven inzicht in de hydrodynamische sturing van deze morfologie. Om de kleinschalige ontwikkelingen rondom de verdiepte geul goed te kunnen begrijpen is allereerst inzicht nodig in de grootschalige (morfologische) werking van het gehele zeegat. Deze grootschalige ontwikkelingen bepalen mede de veranderingen van de individuele geulen en platen. Voor het begrijpen van een relatief kleine ingreep, zoals het baggeren van een vaargeul door het ebschild van het Westgat, is het noodzakelijk goed te begrijpen wat de rol is van het Westgat in het zeegatsysteem.

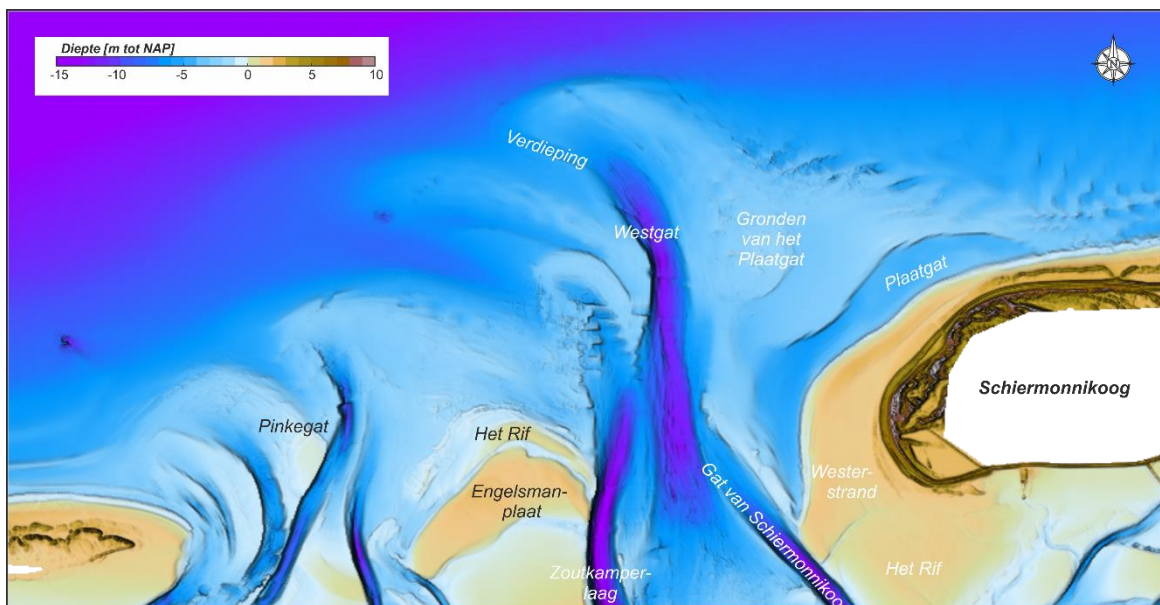
Deltares heeft in een recentelijke studie deze grootschalige morfologische aspecten onderzocht (Vermaas en Elias, 2019). Dit is gedaan door gebruik te maken van Delft3D stromingsberekeningen, voortbouwend op voorgaande studies van Oost et al. (2015) en Vermaas en Oost (2016). De volgende vragen werden onderzocht:

- Hoe ziet het stromingspatroon er in het Friesche Zeegat uit?
- Hoe beïnvloedt de stroming de ontwikkeling van de geulen en platen, en hoe heeft dit effect op de drempel en (de stabiliteit van) de geul?
- Wat zijn de stroomsnelheden door het Westgat, en welk effect hebben de verschillende windcondities daarop?
- Wat zijn de debieten over de wantijen en door de keel onder verschillende condities?

De focus van deze modelstudie was op de invloed van het getij en wind op de stromingen door het zeegat. De analyse op grotere schaal heeft inzicht gegeven in hoe de configuratie van de buitendelta – de ligging van de geulen en platen – invloed heeft op de ontwikkeling van het Westgat. De stromingspatronen en debieten geven inzicht in de hydrodynamische sturing van deze morfologie.

1.3 Doelstelling huidige studie

Figuur 1.1 geeft een overzicht van de belangrijkste geulen en platen in het Friesche Zeegat. Deze recente bodem toont duidelijk de verdieping die aan het einde van Westgat is aangebracht. In deze rapportage onderzoeken we het effect van deze verdieping op de buitendelta en proberen de toekomstige ontwikkeling van de verdieping te voorspellen.



Figuur 1.1: Ligging van de verdieping en de belangrijkste geulen en platen in het Friesche Zeegat op basis van de 2019 bodem.

De focus van deze modelstudie ligt op het in kaart brengen van de stroming en de sedimenttransporten in en nabij de verdieping van het Westgat. De kennis over de werking van het gehele zeegat, die is opgedaan in de vorige studie (Vermaas en Elias, 2019), draagt bij aan een beter begrip van de lokale aspecten die in deze studie worden onderzocht. Dit is essentieel om het gedrag van de verdieping te begrijpen en de toekomstige ontwikkeling te voorspellen, en daarmee de juiste beheersmaatregelen te kunnen nemen. Door middel van een serie modelexperimenten geven we antwoord op onderstaande vragen:

- 1 Wat is de stromingskarakteristiek van de verdieping. Is dit een stroomvoerende geul – zorgt de verdieping voor een grotere stroomsnelheid.
- 2 Wat is het transportpotentieel van de verdiepte geul. Volgt uit de modelresultaten een aanwijsbare verandering in de sedimenttransporten in de buitendelta ten gevolge van de verdieping?
- 3 Kunnen de geobserveerde veranderingen (uit metingen) verklaard worden met de modelberekeningen?
- 4 Wat is het effect van de verschillende processen (golven, getij, morfologie) op de ontwikkelingen in en om de verdiepte geul?
- 5 Hoe zal de verdieping zich in de toekomst gaan ontwikkelen?

Ter beantwoording van deze vragen berekenen we stroming, golven en sedimenttransporten met een Delft3D-model. We berekenen hierbij geen bodemveranderingen maar bepalen het potentiële sedimenttransport. Deze methode is ook toegepast in bijvoorbeeld Elias et al. (2012). Het model wordt niet gebruikt om toekomstige aanzanding te voorspellen, aangezien analyse van de bodemopnames hier een veel betere schatting voor kan geven. Het model wordt wel gebruikt om te analyseren wat de oorzaak is van de aanzanding en daarmee in hoeverre deze aanzanding zal veranderen. Zo draagt het wel bij aan de inschatting voor toekomstige aanzanding.

Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft het model, de schematisatie van getij en golven en de validatie van het model. Hoofdstuk 3 beschrijft de ontwikkeling van de verdieping op basis van metingen en hoofdstuk 4 de modelresultaten in termen van stroming, golven en sedimenttransport. We evalueren het geobserveerde gedrag in de context van de modelresultaten. In hoofdstuk 5 presenteren we de synthese.

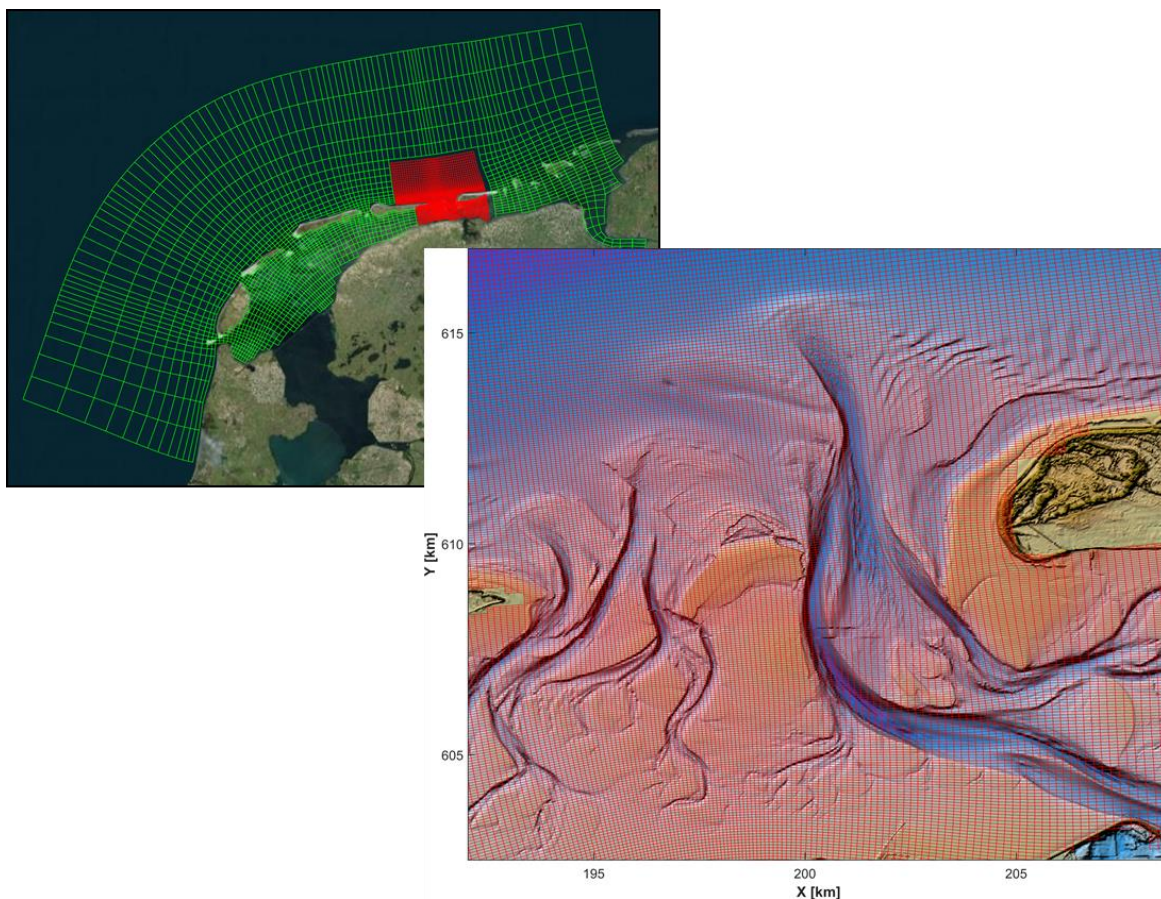
2 Model en methode

2.1 Delft3D Stromings- en golfmodel

De basis van de simulaties wordt gevormd door een stromings- en golvenmodel van het Friesche Zeegat zoals beschreven in Vermaas en Elias (2019). Delft3D-Flow vormt de kern van het model en berekent de waterbeweging ten gevolge van getij en meteorologische forcering (zie Lesser et al., 2004). Het hier toegepaste stromingsmodel bestaat uit 2 delen, namelijk een grootschalig model en een daarin genest detailmodel van het Friesche zeegat met achterliggend bekken en de aanliggende eilandkusten van Ameland en Schiermonnikoog. De roosters zijn kromlijinig. Het rekenrooster van het detailmodel is zodanig gekozen dat zowel de ondiepe zone langs de kust (brandingszone) als de hoofdgeul in het zeegat in hoge resolutie worden weergegeven. De resolutie neemt af richting de modelranden zodat nauwkeurige en tevens efficiënte modelsimulaties gemaakt kunnen worden. De resolutie van 50 – 100m in het zeegat en langs de aanliggende kust word gezien als toereikend om de maatgevende stromingen en transporten weer te geven. Figuur 2.1 toont de rekenroosters.

Het detailmodel wordt aangestuurd door het grootschalige zogenaamde WadSea model (zie De Graaf, 2009). De modellen zijn gekoppeld door middel van domein-decompositie. Hierdoor kunnen de modellen gelijktijdig draaien en worden alle gegevens elke rekentijdstap uitgewisseld. Het WadSea model bevat de gehele Waddenzee met randvoorwaarden ver op de Noordzee. Deze combinatie stelt ons in staat de waterbeweging door de Waddenzee op te lossen waarbij ook de uitwisseling tussen de bekkens en de uitwisseling tussen Waddenzee en Noordzee worden meegenomen.

Voor het Friesche Zeegat is ook een golfmodel opgezet. De golven worden berekend met het gekoppelde spectrale golfmodel SWAN. Het golfrooster heeft eenzelfde resolutie als het stromingsrooster (Figuur 2.1) maar is zeewaarts een aantal roostercellen uitgebreid. De grotere dekking van het grove rooster zorgt ervoor dat verstoringen door randeffecten zijn uitgedempt voordat het stromingsmodel wordt bereikt. Golfgedreven stromingen zijn vooral van belang langs de aanliggende eilandkusten en op de ondieptes van de buitendelta waar golven breken. Voor een nauwkeurige weergave van de golf-stroom interactie wordt het golvenmodel elke 60 minuten opnieuw berekend. Elke 60-minuten is er dus een uitwisseling tussen het golf- en stromingsmodel waarbij het stromingsmodel de waterstanden, stromingen etc. doorgeeft aan SWAN. SWAN berekent vervolgens het bijbehorende golfveld (stationair) en de golfinformatie wordt weer teruggegeven aan FLOW en meegenomen in de volgende 60 minuten van de stromingsberekening. De golfcondities zijn gebaseerd op een morfologische schematisatie zoals uitgewerkt in hoofdstuk 2.3.



Figuur 2.1 Boven: Weergave van de 2 gekoppelde roosters Wadsea en Friesche Zeegat. De roosters zijn weergegeven met een factor 5 vergroving. Onder: Weergave van het detailrekenrooster met onderliggende bathymetrie van het Friesche Zeegat. De ruimtelijke resolutie is ca. 100 x 50 m (oost-west x noord-zuid) in het zeegat en langs de aanliggende kust.

2.2 Sedimenttransportparameters en modelbodems

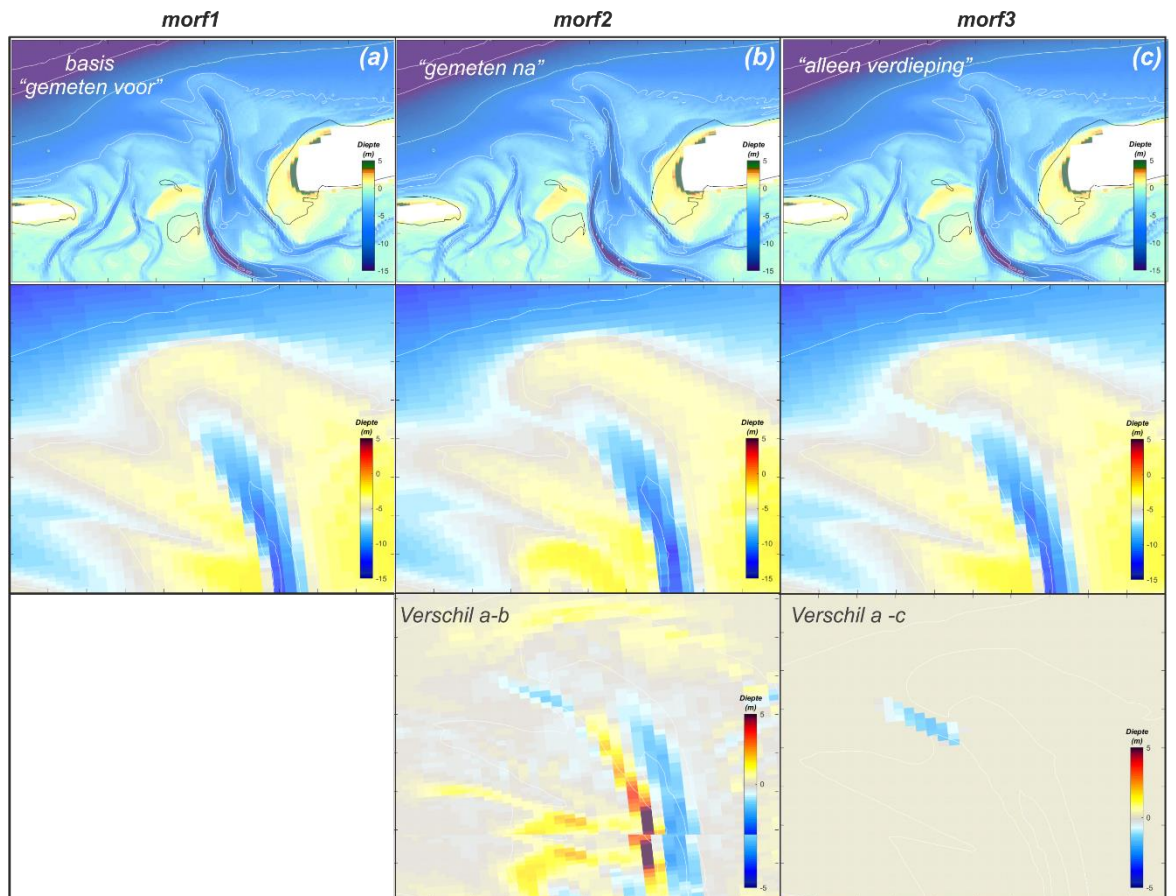
De transportberekeningen zijn gebaseerd op de formuleringen volgens Van Rijn (2007a, b, c).

Tabel 2.1 toont de gebruikte parameter-instellingen. Deze zijn gebaseerd op de meest recente inzichten uit het Kustgenese 2 project.

Tabel 2.1 Instellingen van de Sedimenttransportparameters.

Parameter	Instelling	Beschrijving
EpsPar	False [-]	Vertical mixing distribution according to van Rijn
lopKCW	1 [-]	Flag for determining Rc and Rw
RDC	0.01 [m]	Current related roughness height (only used if lopKCW <> 1)
RDW	0.02 [m]	Wave related roughness height (only used if lopKCW <> 1)
MorStt	0.00e+000[min]	Spin-up interval from TStart till start of morphological changes
Thresh	5.01e-002 [m]	Threshold sediment thickness for transport and erosion reduction
MorUpd	false [-]	Update bathymetry during FLOW simulation
EqmBc	true [-]	Equilibrium sand concentration profile at inflow boundaries
DensIn	false [-]	Include effect of sediment concentration on fluid density
AksFac	5.00e-001 [-]	van Rijn's reference height = AKSFAC * KS
RWave	2.00e+000 [-]	Wave related roughness = RWAVE * estimated ripple height.
AlfaBs	1.00e+000 [-]	Streamwise bed gradient factor for bed load transport
AlfaBn	2.00e+001 [-]	Transverse bed gradient factor for bed load transport
Sus	7.00e-001 [-]	Multiplication factor for suspended sediment reference concentration
Bed	2.00e-001 [-]	Multiplication factor for bed-load transport vector magnitude
SusW	3.00e-001 [-]	Wave-related suspended sed. transport factor
BedW	7.00e-001 [-]	Wave-related bed-load sed. transport factor
SedThr	1.00e-001 [m]	Minimum water depth for sediment computations
ThetSD	1.00e+000 [-]	Factor for erosion of adjacent dry cells
HMaxTH	2.00e-001 [m]	Max depth for variable THETSD.
FWFac	1.00e+000 [-]	Vertical mixing distribution according to van Rijn
CaMax	0.05 [-]	
DzMax	0.05 [%]	'Afknijs-criterium'
NeuBcSand	true [-]	Neumann boundary conditions for Sand

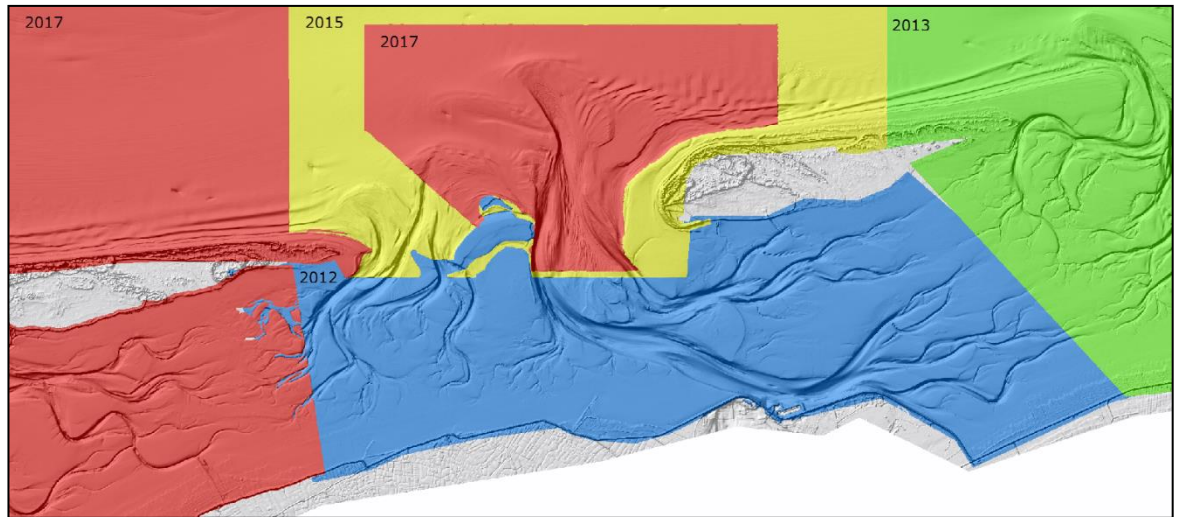
Gedurende de simulatie wordt de hoogte van de modelbodem niet aangepast (geen morfologische verandering). De sedimenttransporten verkregen door deze methode worden ook wel de "potentiële sedimenttransporten" genoemd. In werkelijkheid zou de convergentie of divergentie van de transporten een bodemaanpassing veroorzaken. Hierdoor variëren de transporten continue door de tijd. Doordat we in het model juist de bodem constant houden, kunnen we juist de verandering in sedimenttransport onder verschillende hydrodynamische forcering (de verschillende golfcondities) in kaart brengen. Dit zogenaamd morfostatisch modeleren maakt het ook mogelijk om de resultaten van de verschillende golfcondities gewogen bij elkaar op te tellen om zo een schatting van de lange-termijn transporten te verkrijgen. Door deze simulaties over de verschillende modelbodems te draaien kunnen we objectief het effect van de bodemverandering (bijv. door de verdieping) in kaart brengen. We berekenen dan de morfologische respons niet direct, maar uit het verschil in sedimenttransportpotentieel tussen de verschillende scenario's kunnen we deze respons wel afleiden.



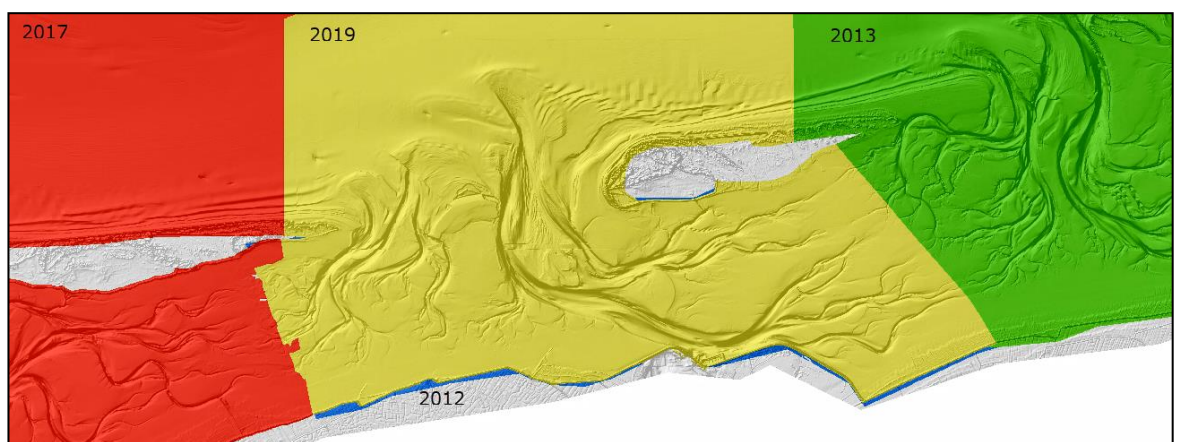
Figuur 2.2 Een overzicht van de gebruikte modelbodems (boven en midden) voor (a) Bodem gebaseerd op de metingen vóór de verdieping, (b) bodem gebaseerd op meting na verdieping, (c) Bodem gebaseerd op meting vóór de verdieping, maar inclusief een opgelegde verdieping. Onderste figuren geven het verschil in bodemligging weer tussen (a-b) en (a-c).

De modelsimulaties zijn gebaseerd op 3 verschillende modelbodems (Figuur 2.2). Als referentie (morf1) gebruiken we een bodem representatief voor de situatie vóór de verdieping. Deze bodem is samengesteld uit data van de jaren 2012 – 2017 (Figuur 2.3). De tweede bodem (morf2) is gebaseerd op metingen na aanleg van de verdieping (2019, Figuur 2.4). Als we deze twee bodems vergelijken dan zien we een verschil in bodemligging ter plaatse van de verdieping (Figuur 2.2b, onder) maar ook buiten de verdieping. Deze laatste zijn van gelijke orde grootte als de verdieping. In de vergelijking van de modelresultaten zullen we dan zowel de effecten van de verdieping als de effecten van de veranderingen daarbuiten terugzien. In de derde simulatie gebruiken we daarom de bodem vóór de verdieping waarin we de verdieping zelf handmatig hebben aangebracht (morf3). Een vergelijking tussen morf1 en morf3 geeft dan alleen het effect van de verdieping op de modelresultaten (Figuur 2.2c, onder).

De bodemsamenstelling gaat uit van een onbeperkte hoeveelheid sediment met een mediane (d_{50}) korreldiameter van 200 μm . 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.



Figuur 2.3 Jaar van opname van de samengestelde 'morf1-bodem' voor het Friesche Zeegat



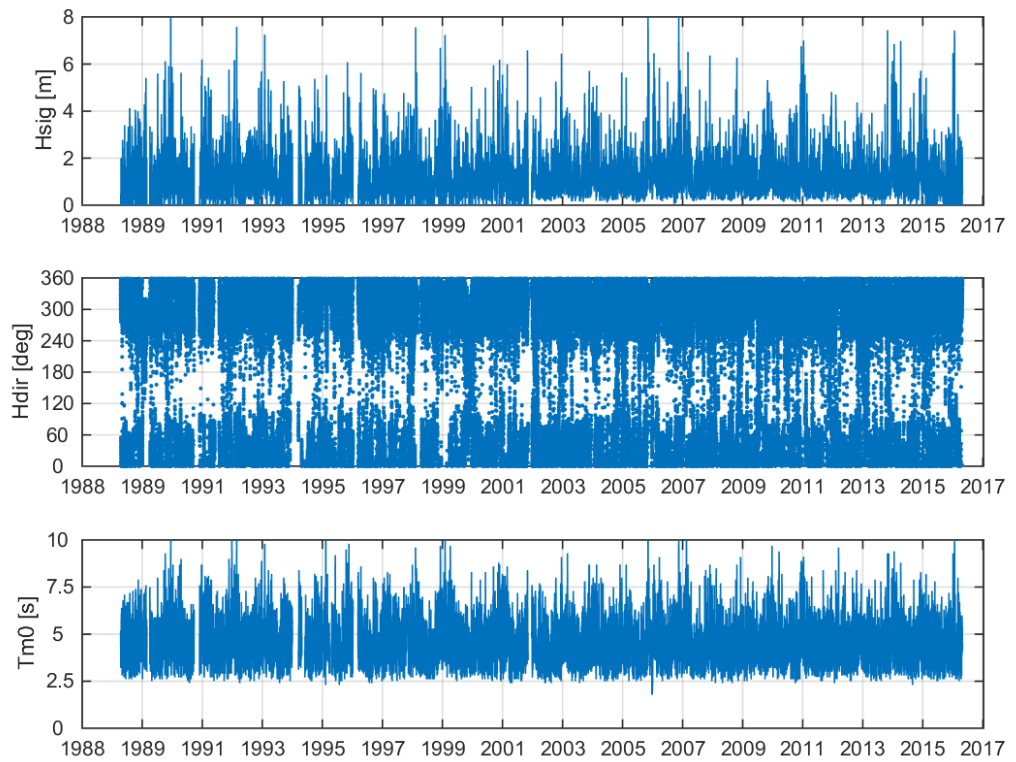
Figuur 2.4 Jaar van opname van de samengestelde 'morf2-bodem' voor het Friesche Zeegat

2.3 Schematisatie van getij en golven

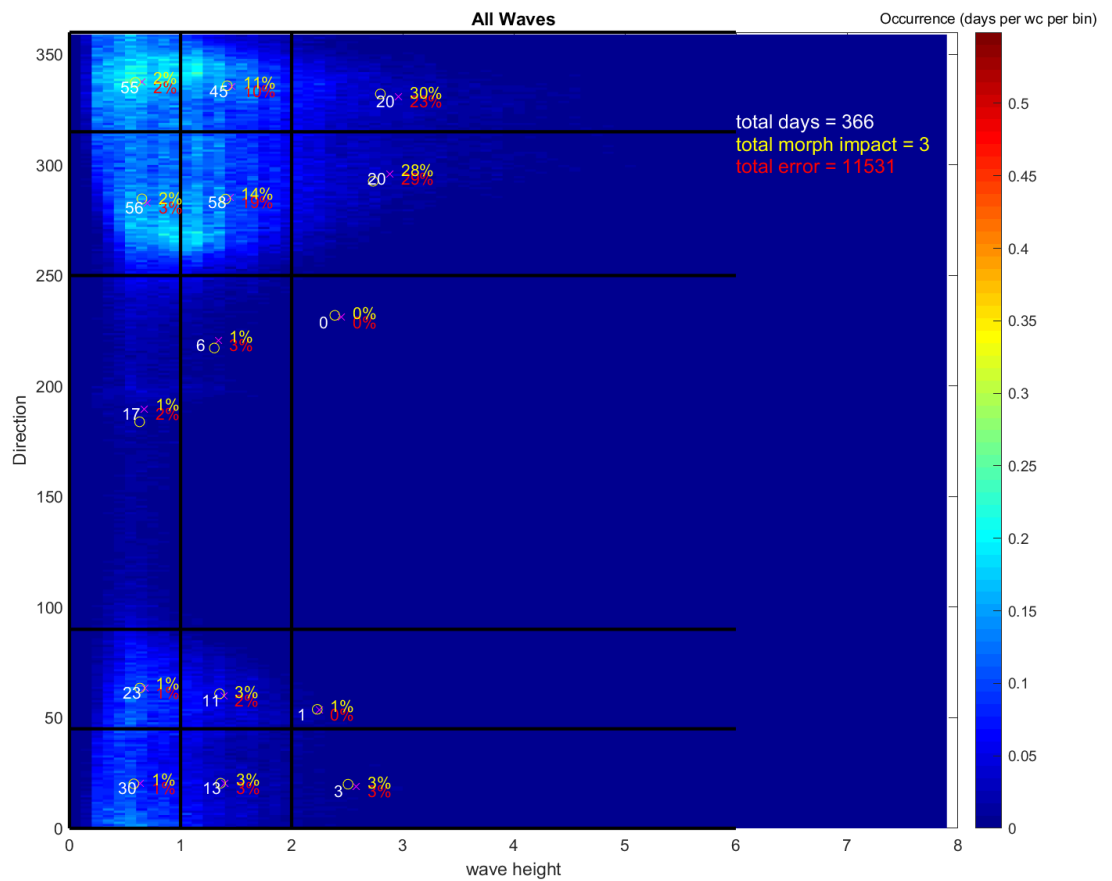
Het volledig berekenen van transportpatronen, representatief voor de lange termijn trends vereist zeer lange modelsimulaties. De modelsimulaties moeten immers een grote en representatieve spreiding van getij, wind en golfcondities doorrekenen. Met proces-gebaseerde modellen zoals Delft3D zijn dergelijke simulaties eigenlijk niet mogelijk gezien de benodigde rekeninspanning. Een benadering van representatieve transportpatronen kan echter wel gemaakt worden door gebruik te maken van geschematiseerde condities. De technieken zoals beschreven in Lesser (2009) zijn in deze studie gebruikt om een morfologisch getij- en golfklimaat af te leiden.

Het getij is geschematiseerd door een volledig, maandelijks, springtij-doodtij cyclus weer te geven door de morfologische equivalent (analoog aan Latteux, 1995). Dit morfologische getij geeft een vrijwel identiek netto transportpatroon als de volledige tijdserie.

Het morfologisch representatieve golfklimaat is gebaseerd op de data van de golfboei SON (Figuur 2.5). Deze boei ligt net ten oosten van Ameland. Voor de bepaling van het morfologisch golfklimaat wordt de ruwe golfdata ingedeeld in golfhoogte en -richtingsklassen (zie Figuur 2.6). Voor ieder klasse wordt de gemiddelde golfhoogte en richting bepaald. Door deze klassen te koppelen aan een benadering van het sedimenttransport kan ook een schatting van de morfologische impact van de golfcondities worden verkregen. Dit resulteert in de set golfcondities weergegeven in Tabel 2.2.



Figuur 2.5 Gemeten golfkarakteristieken van de golfboei Schiermonnikoog Noord (SON)



Figuur 2.6 Frequentie van voorkomen van combinaties van golfhoogte- en richting van de golven gemeten met golfboei Schiermonnikoog Noord (SON) en het daaruit bepaalde morfologische golfklimaat.

Iedere golfconditie wordt hierbij over het representatieve getij gesimuleerd en de sedimenttransporten worden bepaald. Het voordeel van deze methode is dat we alle golfcondities afzonderlijk voor slechts 1 representatief getij door te hoeven rekenen. Omdat we maar beperkt in de tijd moeten doorrekenen, betekent dit dat we rekenroosters met hoge resolutie in de ruimte kunnen inzetten. Dit geeft gedetailleerde berekeningen van de transporten in de brandingszone en over de complexe banken van de buitendelta. Daarnaast kunnen we de berekeningen verder versnellen door met meerdere computers tegelijk te rekenen. Het model geeft dus voor ieder golfconditie een schatting van het sedimenttransport: het sedimenttransportpotentieel. De resultaten worden gewogen (met de kans van voorkomen) bij elkaar opgeteld en dit geeft dan een benadering van het sedimenttransport over langere termijn. Analyse van het sedimenttransportpotentieel is een belangrijke eerste stap in het begrijpen van het morfologische gedrag. Deze stap zou eigenlijk altijd gedaan moet worden voordat volledig morfologische simulaties worden uitgevoerd.

Tabel 2.2 Geschematiseerd golfklimaat.

Golf conditie	Hsig [m]	Tp [s]	Dir [°N]	Vel. wind [m/s]	Dir. wind [°N]	Weight [%]
1	0,64	4,03	20	3,78	20	8,3
2	0,68	3,63	64	4,01	64	6,2
3	0,67	3,44	190	3,95	190	4,6
4	0,7	3,91	283	4,13	283	15,2
5	0,65	4,82	337	3,84	337	15,0
6	1,4	4,71	20	8,26	20	3,5
7	1,39	4,38	60	8,20	60	3,1
8	1,34	4,29	221	7,91	221	1,6
9	1,44	4,69	285	8,50	285	15,9
10	1,46	5,26	335	8,61	335	12,3
11	2,58	5,77	19	14,99	19	0,7
12	2,25	5,16	53	13,28	53	0,2
13	2,45	5,22	231	14,46	231	0,1
14	2,88	6,29	296	15,64	296	5,4
15	2,96	6,66	331	15,87	331	5,4

2.4 Modelvalidatie

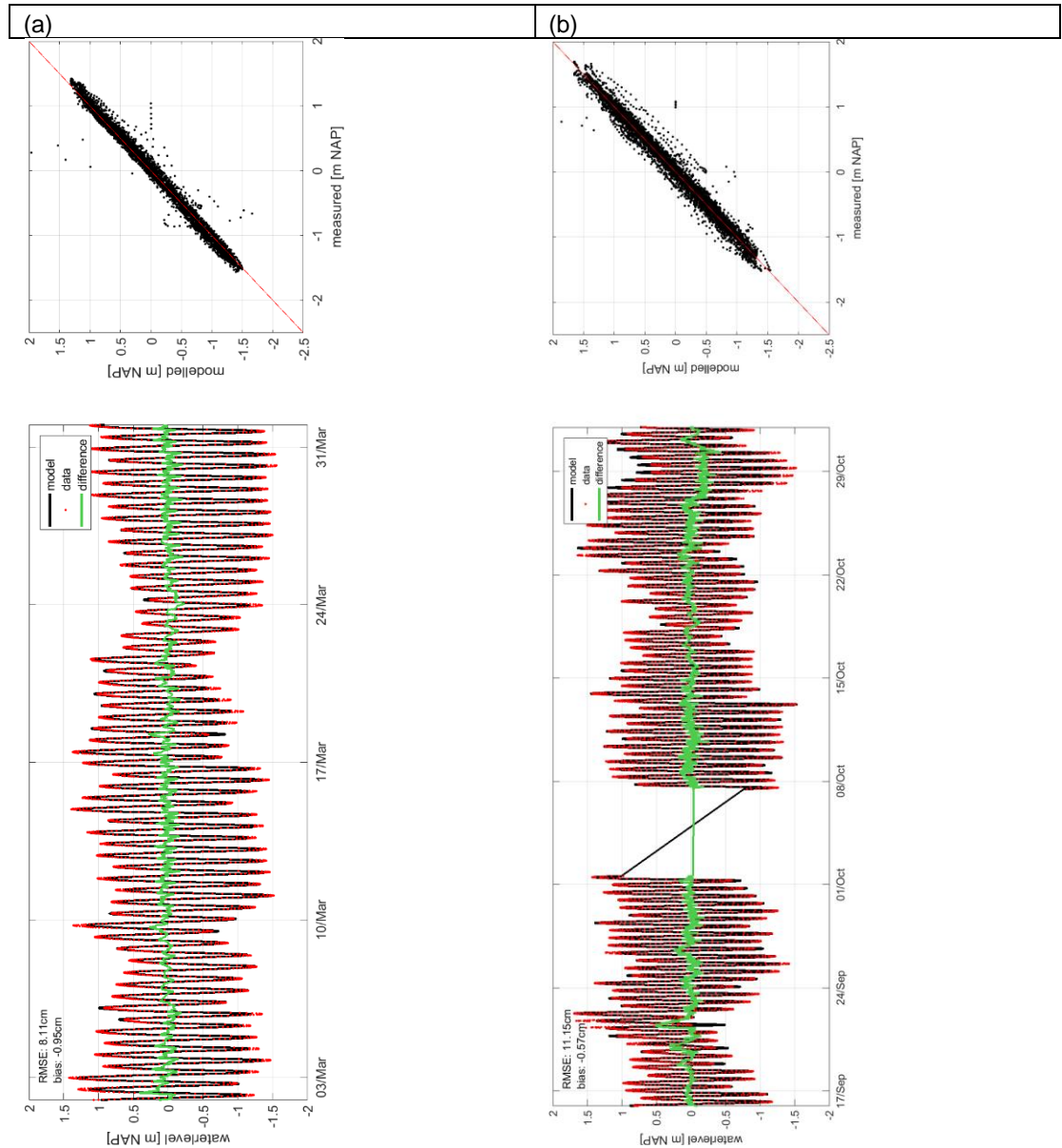
Het hydrodynamische model gebruikt de parameterinstellingen zoals afgeleid in Vermaas en Elias (2019). In deze studie is een extra validatie gedaan voor de periode waarvan we metingen beschikbaar hebben. De volgende metingen zijn vergeleken met het model:

- Waterstanden gemeten door vaste meetboeien;
- Snelheden op de buitenkant van het ebschild met een ADCP snelheidsmeter;
- Debietmetingen d.m.v. een 13-uurs meting door een varende boot in het Westgat.

Waterstanden

Figuur 2.7a toont de berekende en gemeten waterstanden van de meetboei Wierumergronden zoals gerepresenteerd in Vermaas en Elias (2019). Het model kan de geobserveerde getijvariaties en de springtij-doodtij variatie goed representeren. De afwijking tussen meting en berekening is met een RMSE van 8 cm klein. Dit geldt ook voor de andere boeien op de Noordzee (Texel Noordzee en Huibertgat boeien, niet getoond). Er is hier daarom geen verdere kalibratie toegepast.

Een validatie over de periode van de metingen (september-oktober) geeft vergelijkbare uitkomsten. De RMSE is hier met 11 cm iets groter dan in de initiële validatie. Naast de getijmodulatie is ook een grotere niet-getij gedreven component in de metingen aanwezig is. De getijmodulatie wordt nog steeds accuraat gevolgd. De niet getij gedreven effecten (zoals grootschalige setup) veroorzaakt de grotere RMSE fout. Deze grootschalige componenten volgen uit de randvoorwaarden en zijn hier niet makkelijk te verbeteren of op te lossen. Voor de toepassing zoals gebruikt in deze studie is de RMSE fout in de waterstand niet direct van belang. Het getij is veel belangrijker dan de grootschalige setup voor de stromingen en transporten in het zeeget. Een klein verschil in waterstandshoogte zal hier geen significante invloed op hebben.



Figuur 2.7 Vergelijking gemeten waterstanden met gemodelleerde waterstanden voor de meetboei Wierumergronden voor 2 verschillende perioden.

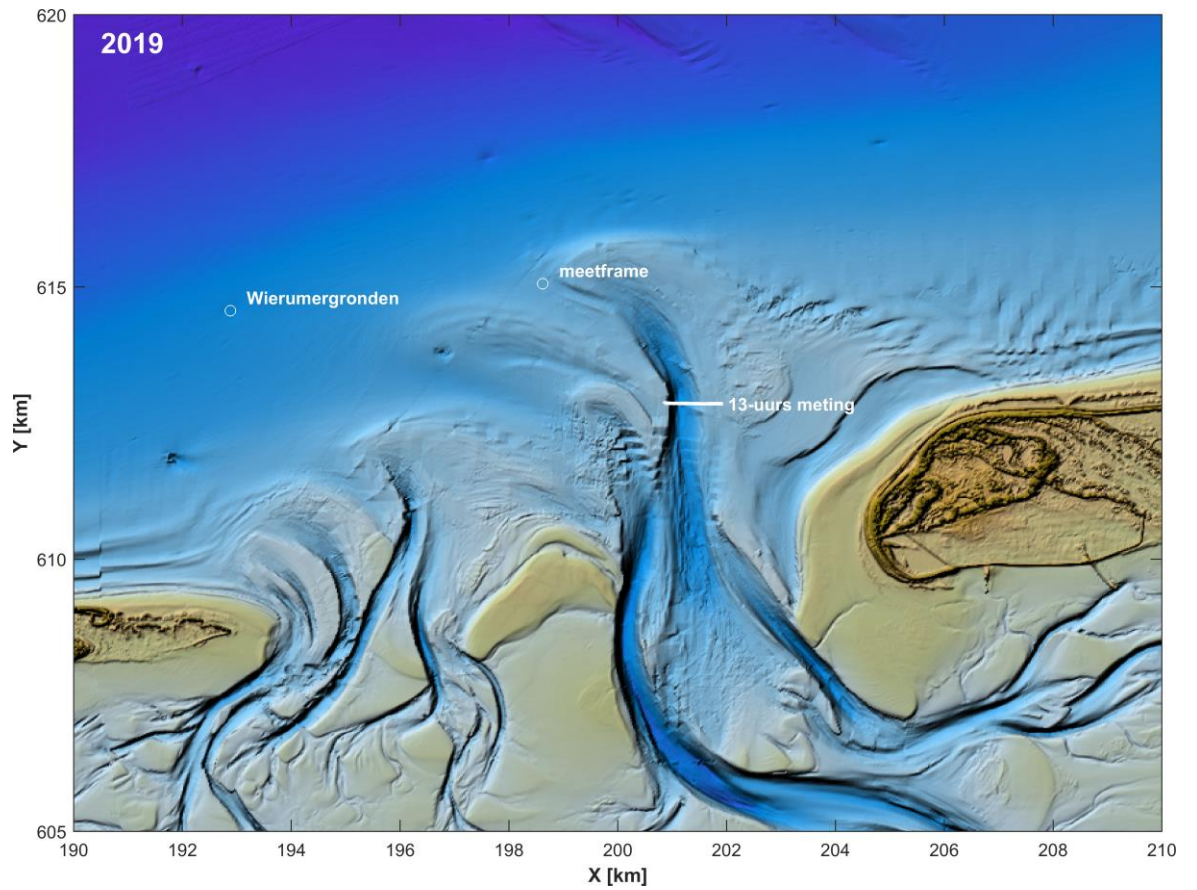
Snelheids- en debietmetingen zijn door Rijkswaterstaat CIV speciaal voor dit project ingewonnen (zie Figuur 2.8 voor de locaties). De metingen zijn uitgevoerd over de periode 20 september 09:00 tot 19 oktober 10:00. Figuur 2.9 en Figuur 2.10 geven een overzicht van de meetdata.

De stroomsnelheden zijn gemeten door een 200kHz ADCP, gemonteerd in een bodemframe en geplaatst in een vaste meetopstelling aan de Noordzeezijde van de verdieping (Figuur 2.8). De stromingen worden gedomineerd door het getij gedreven signaal met snelheden tussen de 0.5 en 0.8 m/s. Gedurende een aantal stormen treden er stromingen op van bijna 1.5 m/s. De modelvalidatie focussend op de getij gedreven component (Figuur 2.9 en 2.10). In onze analyse maken we hiervoor een onderscheid in stroming in de hoofd- (major) en neven-as (minor) van de getijellips. Bij grote fluctuaties in de neven-as spelen naast getij-effecten ook andere effecten een rol (bijv. door wind of golven). Dit is duidelijk te zien in Figuur 2.8c vel minor. Deze laat duidelijk zien dat er in de eerste periode van 20 september tot 4 oktober meer energetische condities optreden dan de periode na 4 oktober. Deze laatste periode geeft een wat meer representatief beeld van de getij-gedreven stromingen.

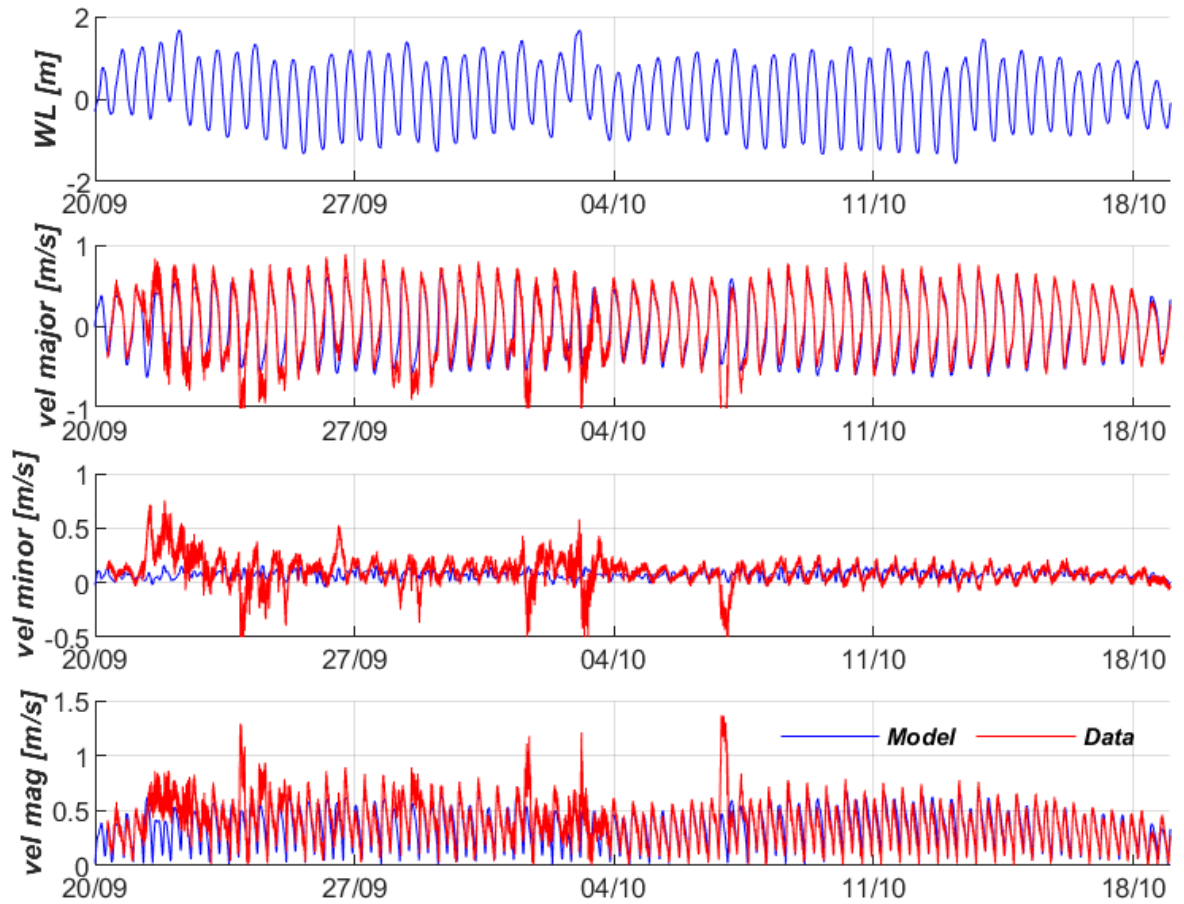
Vergelijken we de modelresultaten van het getij-gedreven model, dan zien we dat de stroming in de hoofdas over het algemeen een goede representatie van het getijsignaal geeft. In Figuur 2.9b zien we dat zowel de hoofd- als neven-as van de stroming nauwkeurig gevolgd wordt in zowel hoogte als fasering. In de eb-stroming zien we in beide snelheidssignalen een kleine maar tegenovergestelde afwijking ontstaan. Dit is waarschijnlijk het gevolg van een klein verschil in richting gedurende deze periode. Zo'n kleine afwijking is wel te verwachten aangezien de richting sterk afhangt van de lokale bodem configuratie. Zelfs met een 50m model resolutie geeft dit toch een kleine afwijking tussen modelbodem en de realiteit.

Naast de snelheidsmetingen zijn er ook 13-uurs debietmetingen uitgevoerd op een raai door het Westgat (Figuur 2.8). De metingen zijn uitgevoerd met het meetschip Siege. Op 10 oktober heeft het meetschip gedurende een gehele getijcyclus op een vaste meetraai dwars op de geul gevaren. De metingen zijn uitgevoerd onder rustige omstandigheden met een matige wind (3-4 Beaufort) uit oostzuidoostelijke richting. De stroming werd daarbij door een ADCP (type Workhorse Monitor 600khz) gemeten. Na bewerking van de data kan hieruit het debiet door het zeegat berekend worden.

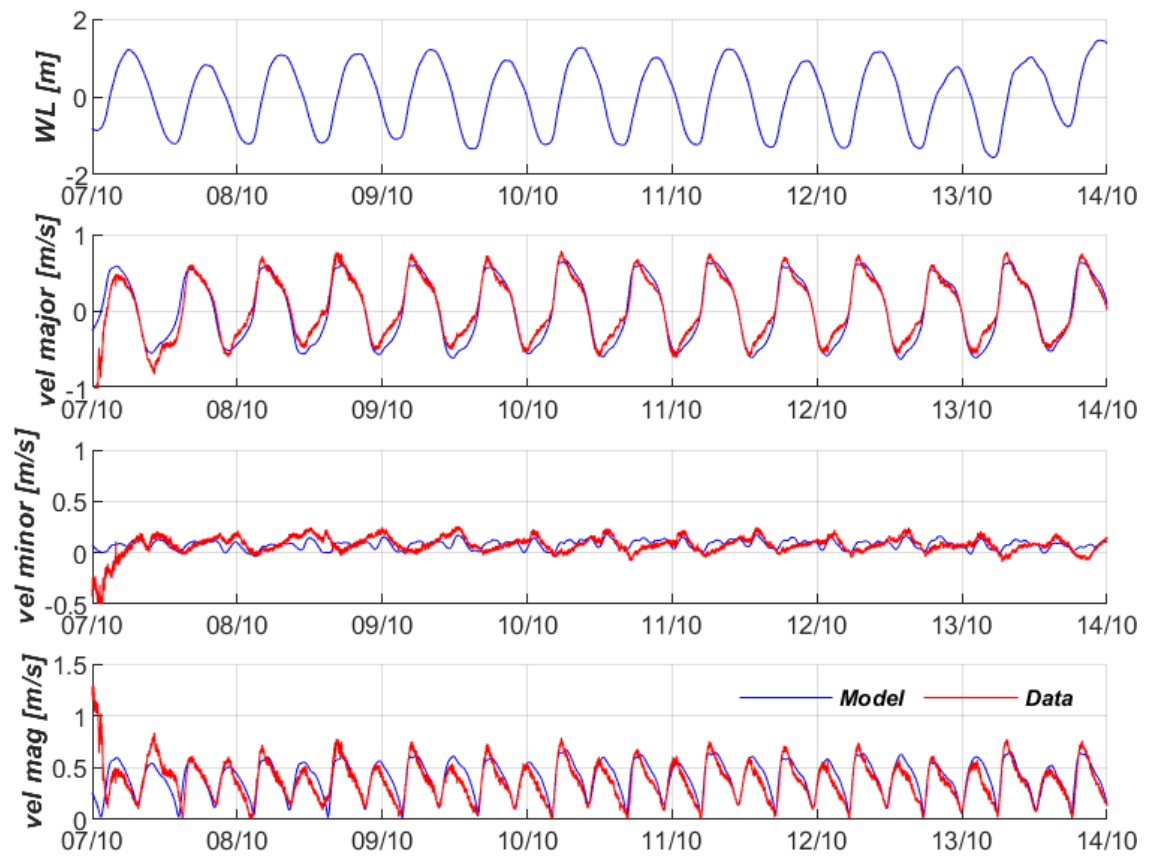
Figuur 2.11 toont het gemeten en berekende debiet. Over het algemeen volgt het model de meting goed. Tijdens maximale eb laat het model een doorzetting van de debietcurve zien tot een maximum van ongeveer 8000 m³/s. In de meting ligt het maximum net boven de 6000 m³/s. Gedurende een periode van ruim 3 uur blijven deze debieten gehandhaafd, waarna ze weer afnemen. Dit verloop van de gemeten debieten is opmerkelijk. In de stromingsmeting door het meetframe is een dergelijke afkapping niet zichtbaar, hoewel de gemeten stroomsnelheid tijdens eb ca. 0,15 m/s lager ligt dan in het model. Ook de gemiddelde stroomsnelheid in het Westgat (in y-richting) laat niet een afkapping zien, maar toont een duidelijke piek. Op dit moment is er geen goede verklaring voor deze verschillen. Over de absolute en netto debieten kunnen hierom geen uitspraken worden gedaan. Voor de vergelijking tussen verschillende modelbodems en het effect van de verdieping is het model wel goed bruikbaar.



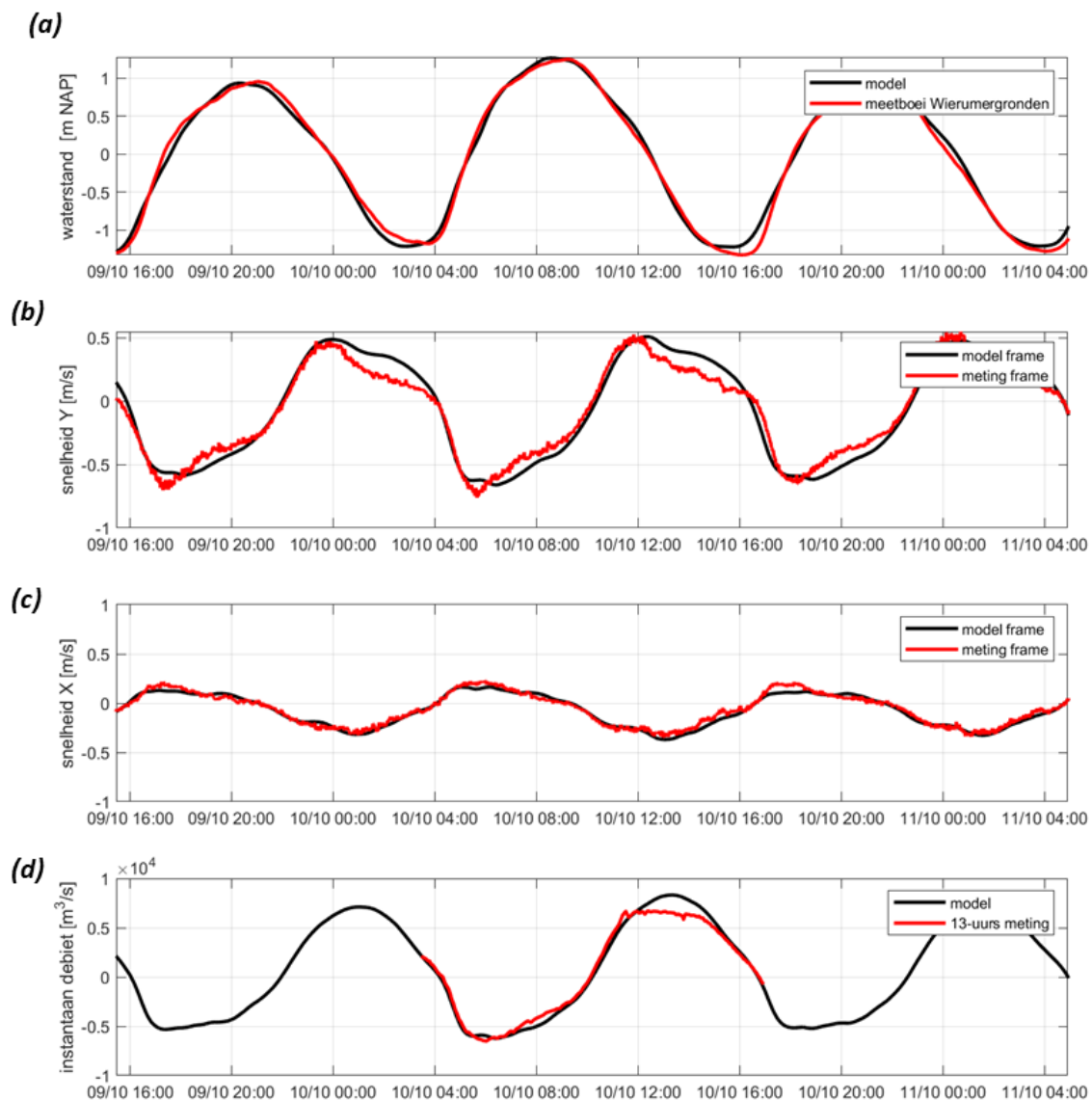
Figuur 2.8 Overzichtskaart met meetlocaties op de 2019 bodem



Figuur 2.9 Vergelijking gemeten stroomsnelheden met gemodelleerde stroomsnelheden voor de gehele meetperiode, bepaald voor de major en minor component van de getijrichting



Figuur 2.10 Vergelijking gemeten stroomsnelheden met gemodelleerde stroomsnelheden voor een deel van de periode, bepaald voor de major en minor component van de getijrichting



Figuur 2.11 Vergelijking gemeten en gemodelleerde waarden tijdens de 13-uurs meting. (a) waterstand op de Noordzee, (b) dieptegemiddelde snelheid in y-richting (positief is noord) bij het meetframe, (c) dieptegemiddelde snelheid in x-richting (positief is oost) bij het meetframe, (d) debiet door het Westgat (negatief is de vloedrichting (richting de Waddenzee), positief eb (richting de Noordzee)).

3 Ontwikkeling verdieping o.b.v. metingen

In deze paragraaf bekijken we de ontwikkeling van de verdieping in meer detail. De bathymetrie vóór de verdieping wordt gekenmerkt door de diepe geul Westgat (diepte tot -8m) en het voorliggende ebschild (een diepte tussen de -4 en -5 m); zie Figuur 3.1. In het Westgat zien we duidelijke bodemvormen. Deze zandgolven hebben maximale hoogtes rond de 1 m en een lengte van 20 tot 30m. De asymmetrie van de bodemvormen duidt op een eb-dominant (zeewaarts) transport. Dit is in overeenstemming met de morfologie. De bank zeewaarts van de geul heeft de typische vorm van een ebschild. Deze banken vormen typisch aan de uitstroomzijde van de geul. De vorm ontstaat als een evenwicht tussen het zeewaartse transport door de geul en de landwaartse, golfgedreven transporten. Het ebschild ligt niet symmetrisch rond de geulmonding maar heeft een duidelijk zwaartepunt aan de noordoostzijde van de geul. Deze asymmetrie is waarschijnlijk gerelateerd aan het overheersende golfklimaat met een dominante oostelijk gerichte component (golven uit het noordwesten). De verdieping ligt in relatie tot het ebschild dan ook gunstig; niet in het centrale gedeelte van het ebschild maar net aan de zuidzijde. Hier is de bank relatief diep, met alleen een kleine ondiepe uitstulping aan de geulzijde.

Na verdieping zien we dat binnen het baggervak de bodem over een breedte van 150 m tot tussen NAP -6,0 m en NAP -6,5 m is verdiept (Figuur 3.2). Aan weerszijden van de geul, maar met name aan de zuidoostzijde, is de hoogte van de naastliggende bank toegenomen. Een gedeelte van het uitgebaggerde zand is hier aangebracht. Een belangrijke observatie is ook dat de verdieping niet in het verlengde van de uitstroom van het Westgat ligt, maar meer een extra uitstroom geeft dan een verlenging van de geul. Afhankelijk van de hydraulische efficiëntie van de vertakking zal het Westgat de nieuwe uitstroom of juist de oude uitstroom volgen. Gezien de grote van het Westgat in verhouding tot de verdieping lijkt het volgen van de oude uitstroom het meest waarschijnlijk. Met behulp van het model kan dit verder inzichtelijk gemaakt worden.

In de eerste maanden na de verdieping, tot de meting van 17 oktober 2018, verandert de geul vooral van vorm, waarbij de zijkanten iets ondieper worden en het midden iets dieper. De 'vierkant' gebaggerde doorgang krijgt zo de vorm van een natuurlijke geul, terwijl er verder geen grote veranderingen zijn opgetreden (zie Figuur 3.3). De kleine veranderingen hangen ook samen met de zomerperiode met over het algemeen laag energetische condities. De morfologische verandering wordt in deze periode bepaald door getij gedreven processen. De verdieping lijkt hier geen significante verstoring van de stroming te geven, hierdoor zijn de veranderingen van de morfologie dan ook beperkt.

Om een grotere verandering van de morfologie te krijgen zijn er hoog-energetische condities nodig (stormen). Gedurende deze condities zijn er hoge golven en de daaraan gerelateerde transporten kunnen de morfologie sterk beïnvloeden. Dit is ook duidelijk te zien in de winterperiode oktober 2018 - april 2019 (Figuur 3.4 tot Figuur 3.8). De gemeten bodem van 1 februari 2019 vertoont een duidelijke verandering in de morfologie (Figuur 3.5 en Figuur 3.7). De grootschalige karakteristieken blijven wel behouden. Het Westgat en het voorliggende ebschild blijven duidelijk zichtbaar. In het Westgat domineren vooral de verplaatsingen van de bodemvormen. Daarnaast is er sedimentatie opgetreden aan de landwaartse zijde van het ebschild terwijl de zeewaartse zijde is geroteerd. Ter plaatse van de verdieping zien we dat er sedimentatie heeft plaatsgevonden. De gehele geul is verder opgevuld met sediment en vooral aan de landwaartse zijde is er een verondieping opgetreden (Figuur 3.7). Een gedeelte van dit sediment komt waarschijnlijk door een herverdeling van het gebaggerde en aan weerszijde van de verdieping gedumpte sediment. Aan de zuidelijke zijde van de verdieping is er een langgerekt erosiegebied te zien. Enerzijds komt dit door het verflauwen van de geulwand, maar ook het opruimen van het aangelegde bankje speelt een rol. Door het aanbrengen van het zand aan

weerszijden van de verdieping was de bodem hier ondieper dan het natuurlijk evenwicht. Aan de zuidzijde is dit snel opgeruimd. Een gedeelte van dit sediment zal bijgedragen hebben aan de geobserveerde sedimentatie in de verdieping.

Een gedeelte van de opvulling is een logische respons op de verdieping. Tijdens stormen kan er veel zandverplaatsing optreden, de verdieping vormt dan eigenlijk een soort bezinkput omdat hier de stroomsnelheden iets af kunnen nemen. Een derde bron van sedimentaanvoer is het Westgat. Dit transport is in evenwicht met de geulwand, maar de verdieping zorgt hier voor een discontinuïteit. Zonder ingrepen zouden abrupte veranderingen in de morfologie alleen plaatsvinden bij een duidelijke verandering in bodemsamenstelling of forcering. In het Westgat is dit niet het geval. De discontinuïteit zal daarom op een natuurlijke manier uitgevlakt worden. Er is voldoende transport door het Westgat om dat uit te voeren. Het opvullen van de binnenzijde van de verdieping richting het Westgat is een proces dat ook in de periode tussen 1 februari en 3 april 2019 doorgaat (Figuur 3.8). In deze periode treedt vrijwel geen sedimentatie in rest van de verdieping. Dit kan komen door (1) een laag-energetische periode (weinig stormen), of (2) door het bereiken van een evenwicht tussen aanvoer en afvoer. De doorgaande erosie van het overige deel van het ebschild geeft een indicatie dat het tweede argument waarschijnlijk is.

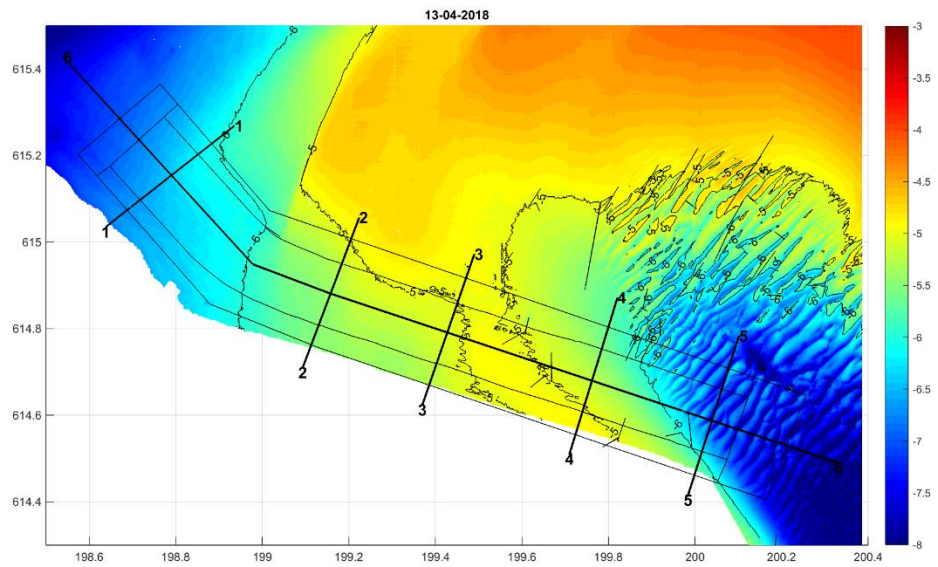
Tussen april 2019 en juli 2019 gaat de sedimentatie aan de geulzijde door, intussen een duidelijke drempel vormend met een diepte van NAP -5,5 m (Figuur 3.9 en Figuur 3.10). Over een afstand van ca. 200 meter ligt de bodem boven de NAP -6,0, de rest van de verdieping ligt daar onder. Aan de Noordzeezijde van de geul is in deze periode juist enige verdieping opgetreden.

De verandering van het sedimentvolume in het baggervak t.o.v. het volume in februari 2018 geeft het proces van opvulling goed weer (Figuur 3.11). Na verdieping is het volume met bijna 200.000 m³ toegenomen. Na een initiële aanzanding blijft het volume vrijwel gelijk tot november 2018. In de periode november 2018 tot februari 2019 neemt het volume met ca. 22.000 m³ toe (330 m³/dag). Tussen februari 2019 en juli 2019 is het totale volume redelijk stabiel gebleven. Dit komt doordat het volume dat er bij de drempel bij is gekomen aan de Noordzeezijde juist is geërodeerd. In één jaar tijd is er netto ca. 60.000 m³ in het gebaggerde vak gesedimenteerd.

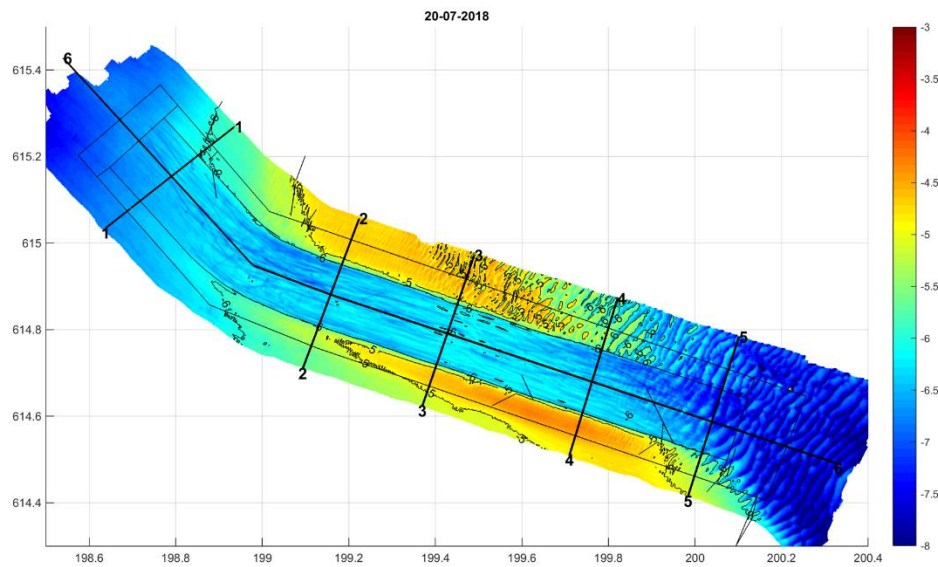
Samenvattend;

De stabiliteit van de geul heeft mede te maken met de gekozen ligging. Het dominante plaatoppervlak bevindt zich ten noordoosten van de verdieping. De verplaatsing van deze bank is voornamelijk in noordoostelijke richting en beïnvloedt de verdieping eigenlijk niet. Aan de zuidzijde van de verdieping bevindt zich geen groot ondiep plaatoppervlak. Hierdoor is een zanddruk beperkt en zijn de veranderingen gedreven door lokale effecten.

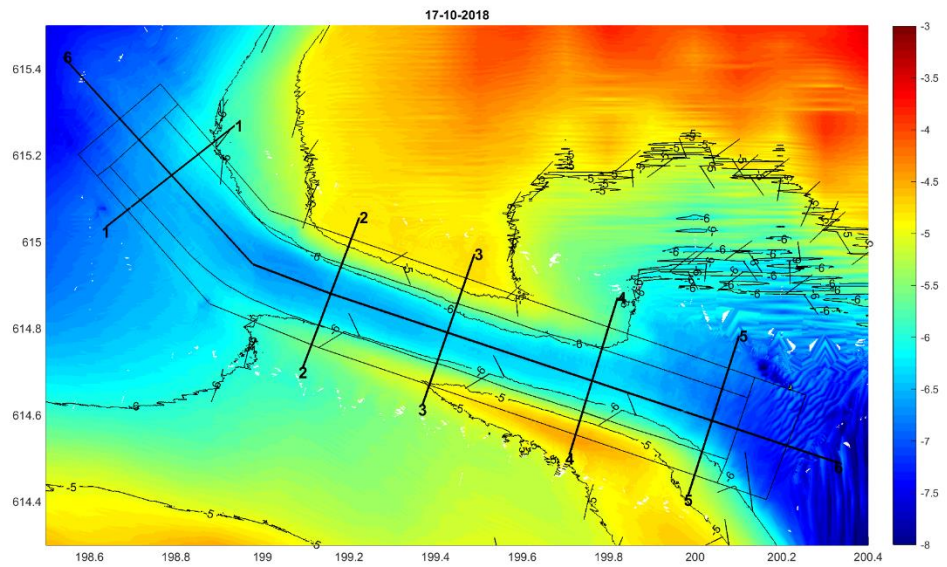
Na een initieel relatief sterke vervorming van de verdieping is deze vrij stabiel gebleven. Tijdens de stormachtige wintermaanden vindt er wel aanzanding plaats. Door golfbreking op de buitendelta treden er dan grote transporten op. Deze worden gedeeltelijk ingevangen door de verdieping (= bezinkput). Tijdens minder energetische condities is de aanzanding beperkt. De grootste veranderingen treden dan op aan de (oostelijke) Westgat-zijde van de verdieping. Hier zorgen met name de getijstromingen voor een wat sterker opvullen van de geul. De geulwand van het Westgat herstelt zich van de verstoring. Dit werpt dan lokaal een drempel op, aan de oostzijde van de verdieping.



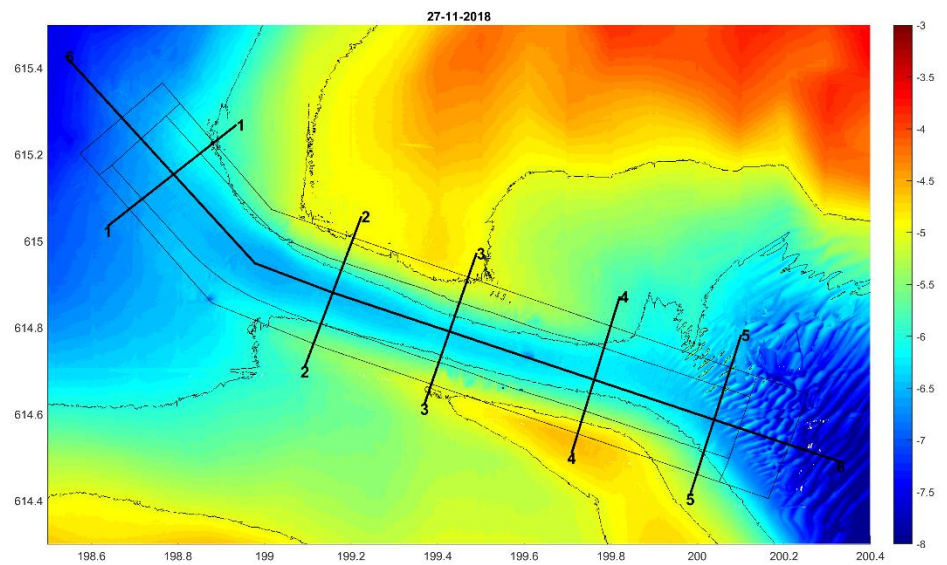
Figuur 3.1 Bathymetrie van het ebschild van het Westgat op 13 april 2018, kort voor het uitvoeren van de verdieping



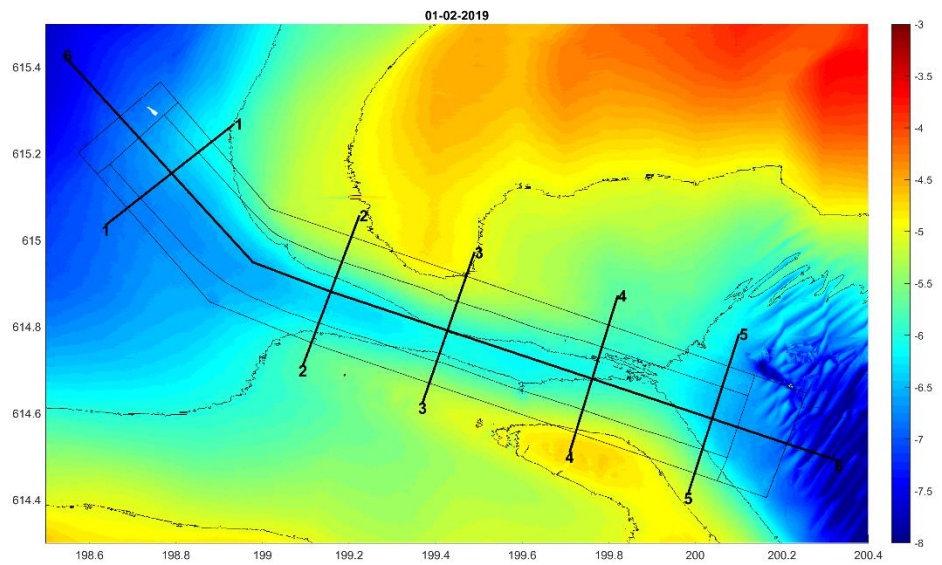
Figuur 3.2 Bathymetrie van het ebschild van het Westgat op 20 juli 2018, de eerste meting na het uitvoeren van de verdieping



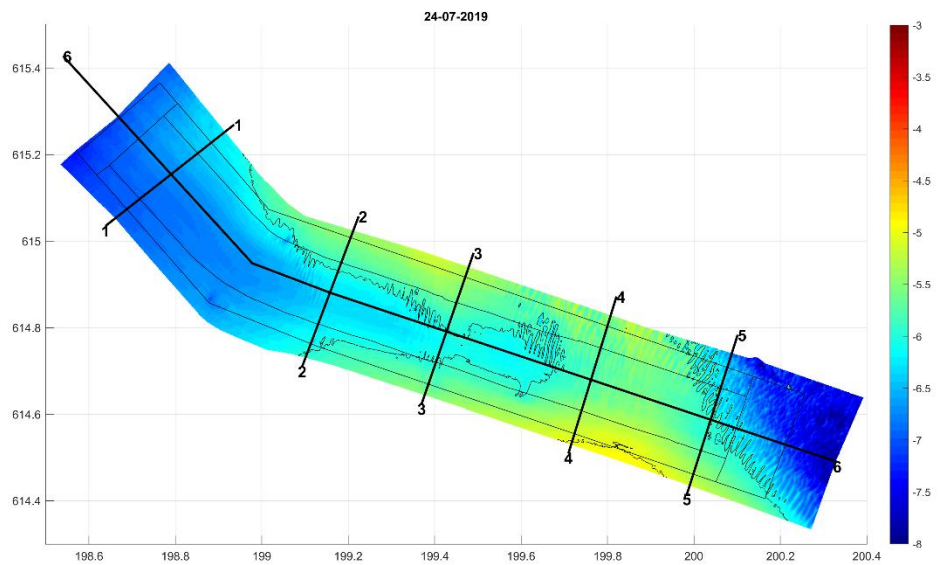
Figuur 3.3 Bathymetrie van het ebschild van het Westgat op 17 oktober 2018



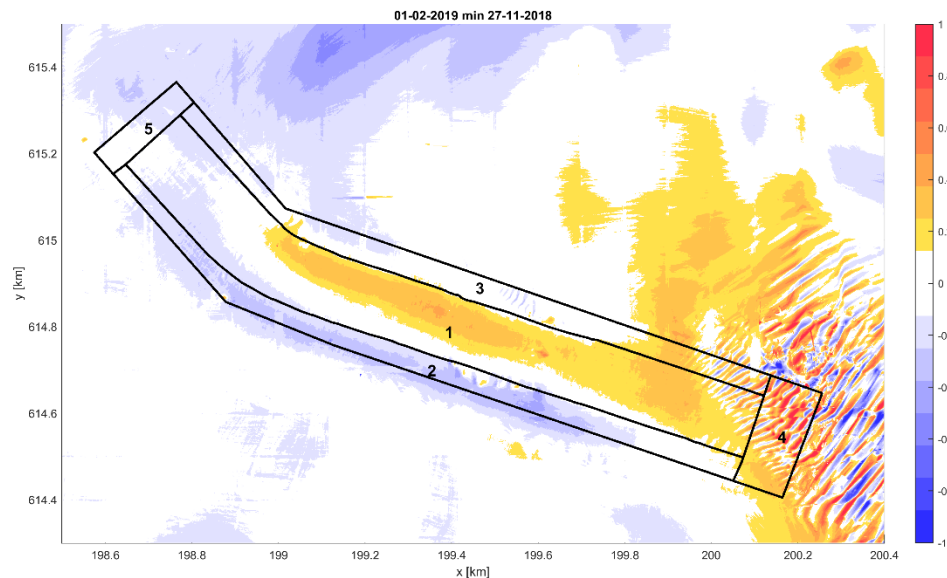
Figuur 3.4 Bathymetrie van het ebschild van het Westgat op 27 november 2018



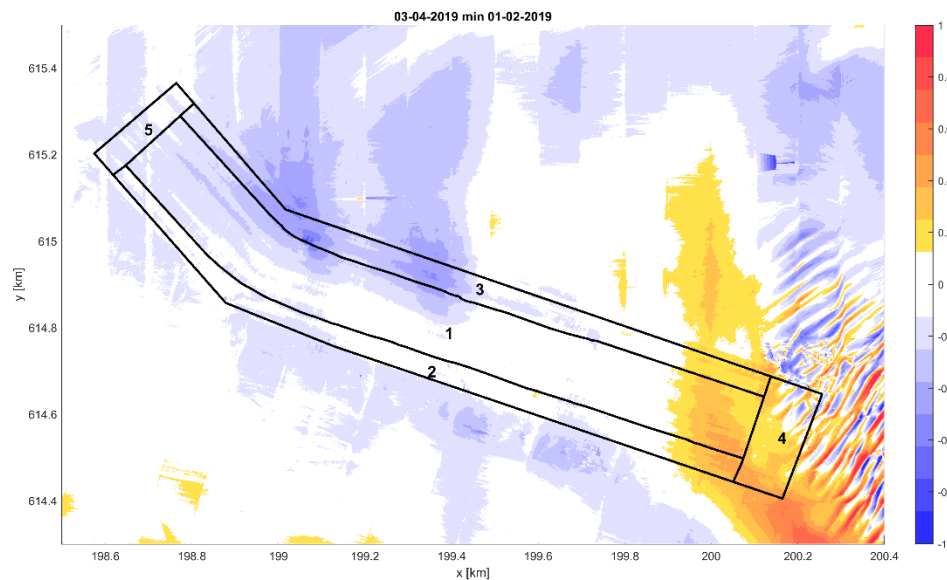
Figuur 3.5 Bathymetrie van het ebschild van het Westgat op 1 februari 2019



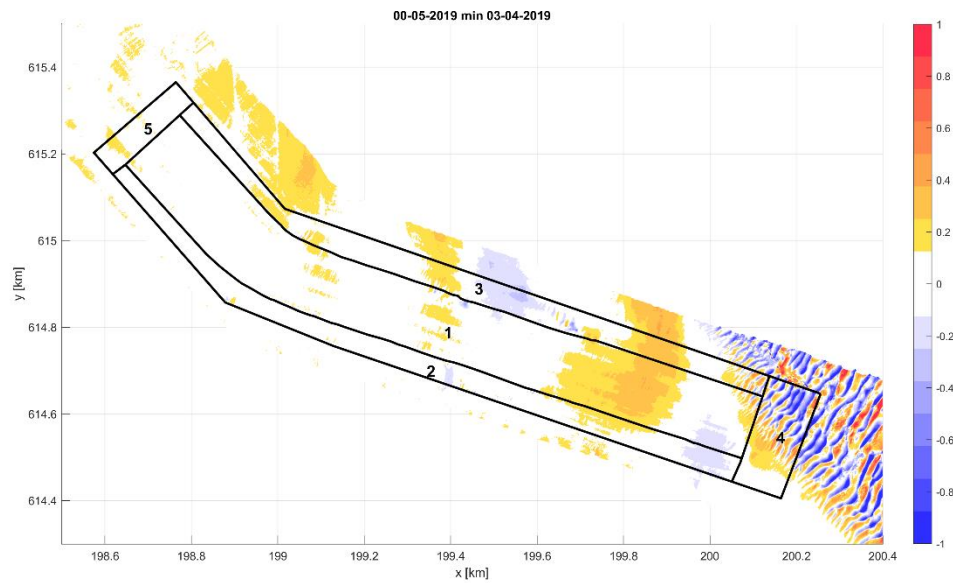
Figuur 3.6 Bathymetrie van het ebschild van het Westgat op 24 juli 2019



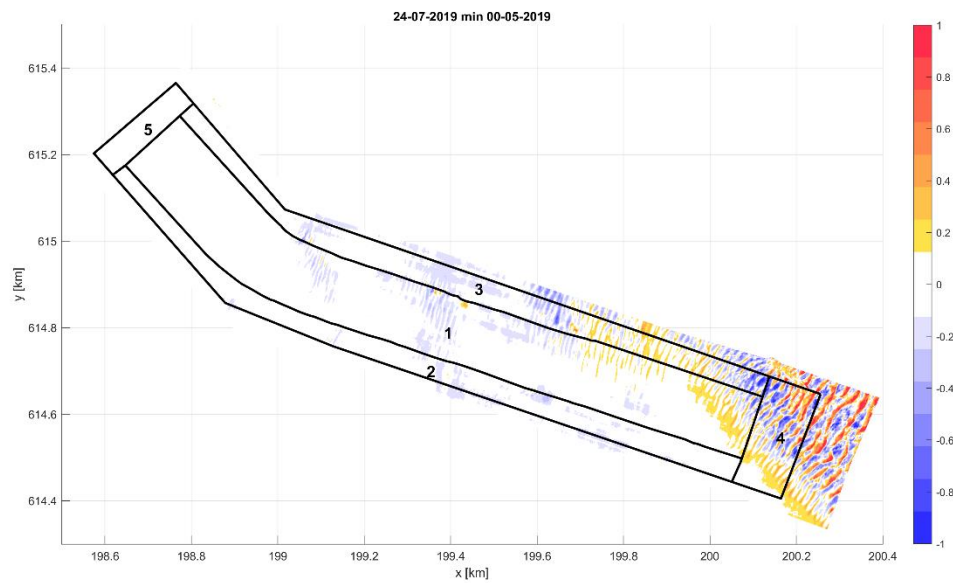
Figuur 3.7 Verandering in bathymetrie van het ebschild van het Westgat tussen 27 november 2018 en 1 februari 2019



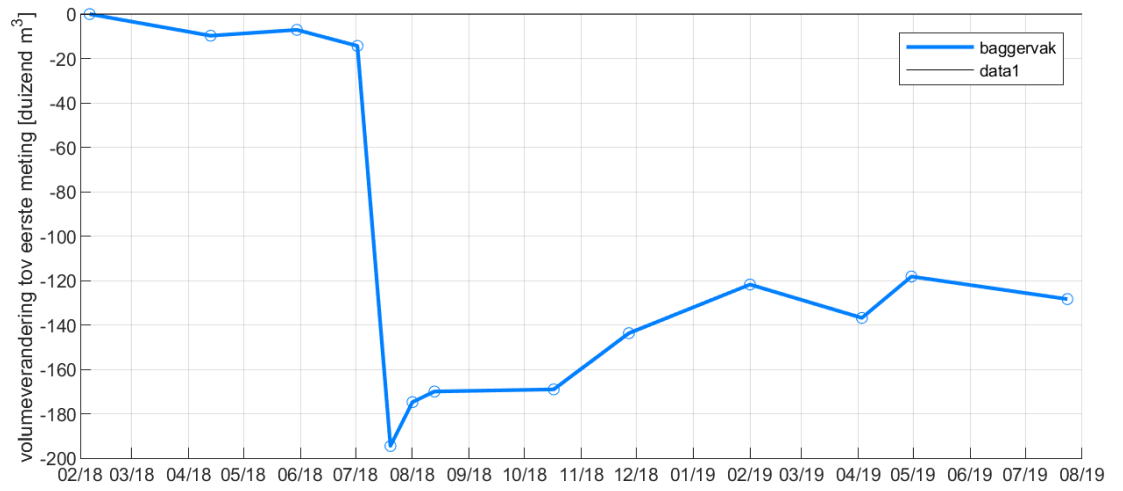
Figuur 3.8 Verandering in bathymetrie van het ebschild van het Westgat tussen 1 februari 2019 en 3 april 2019



Figuur 3.9 Verandering in bathymetrie van het ebschild van het Westgat tussen 3 april 2019 en mei 2019



Figuur 3.10 Verandering in bathymetrie van het ebschild van het Westgat tussen mei 2019 en 24 juli 2019



Figur 3.11 Verandering van het sedimentvolume in het baggervak t.o.v. het volume in februari 2018

4 Model resultaten

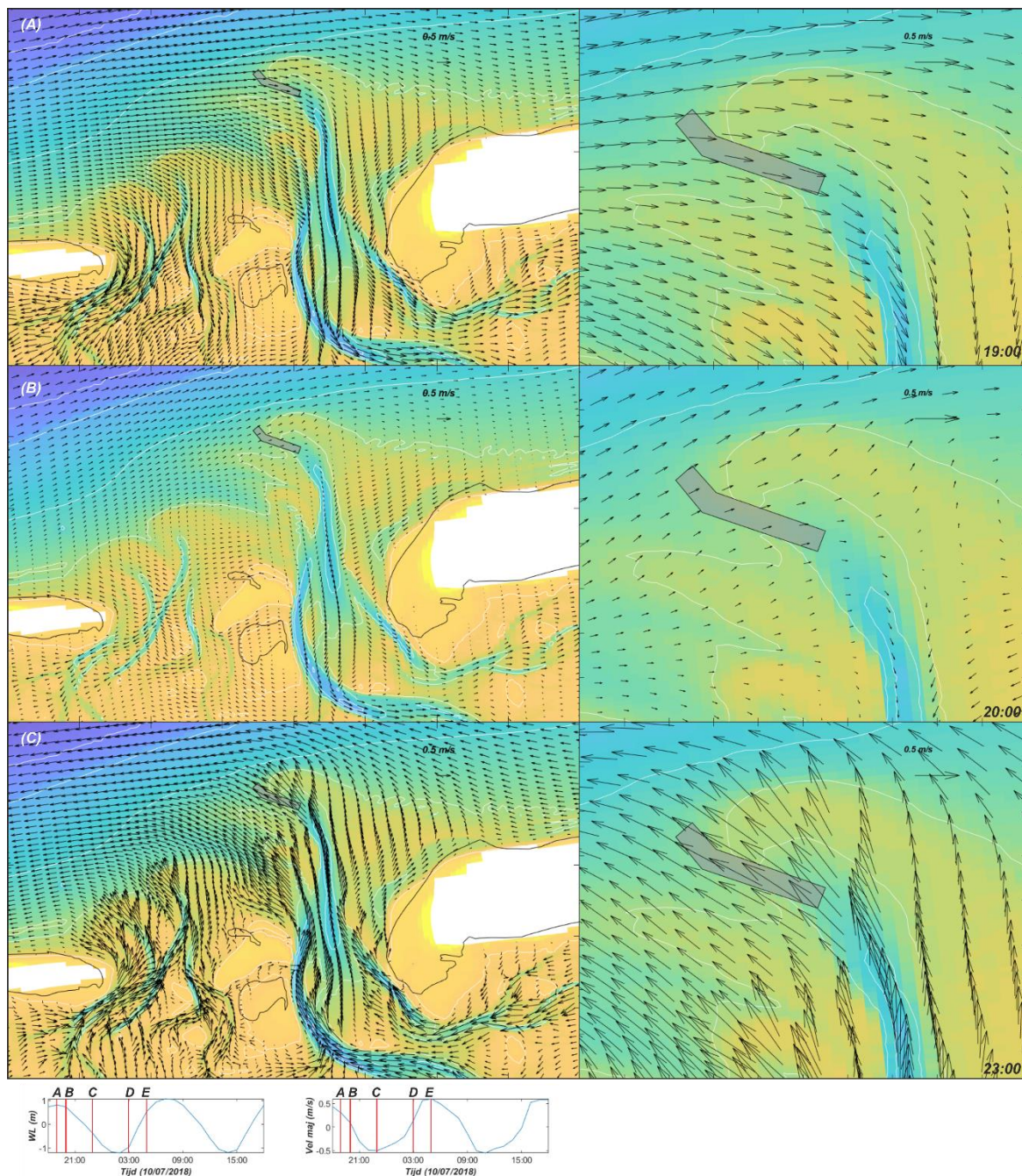
4.1 Stromingen

De getijstrooming in en direct rond het zeegat is complex door de interactie van het kustlangs getij op zee, het kustdwars getij door het zeegat en de complexe onderliggende bodem met zijn geulen en platen. Figuur 4.1 en Figuur 4.2 geven een representatief beeld van de getijbeweging op basis van het morfologische getij en de morf2 modelbodem (bodem inclusief verdieping).

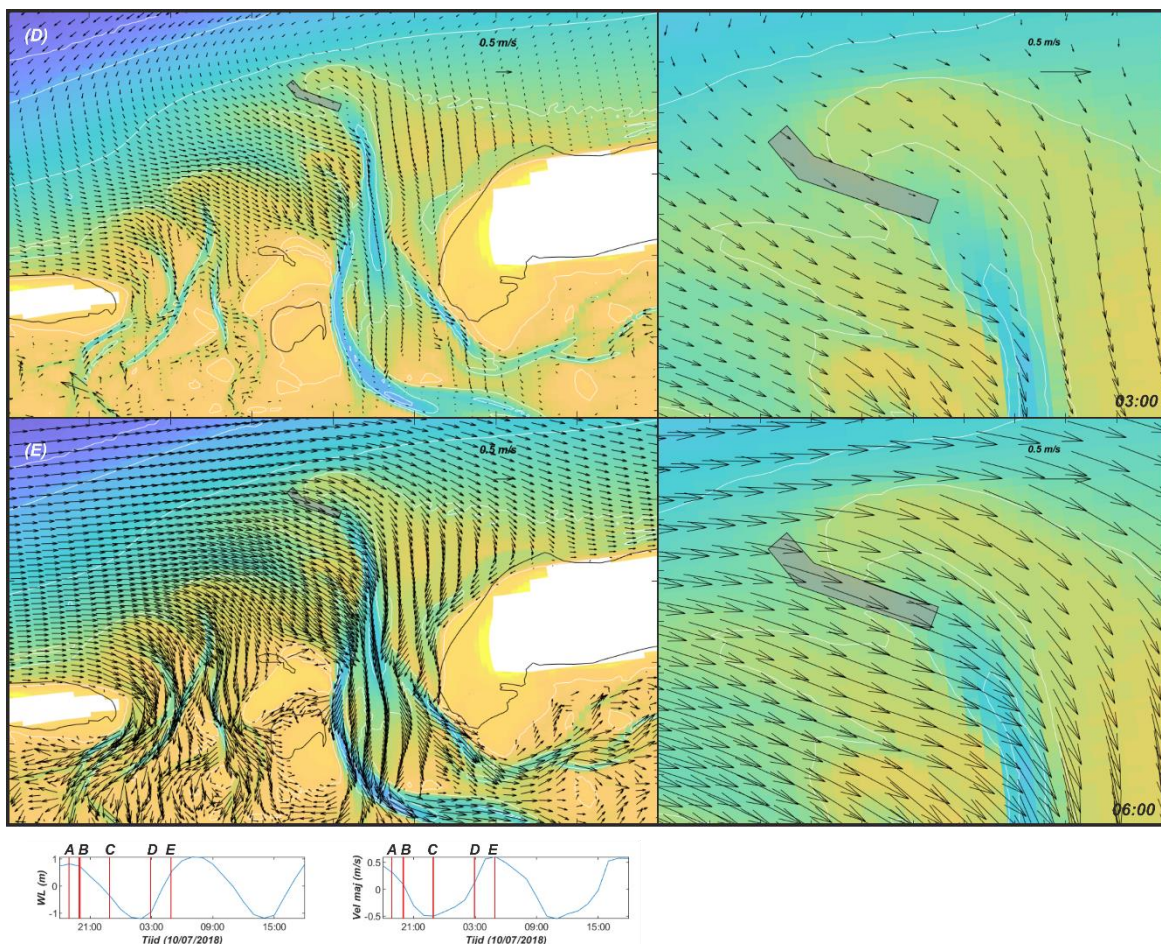
Tijdens hoogwater (20:00) is de getijstrooming op zee nog hoog (Figuur 4.1a). In het zeegat (Zoutkamerlaag) en ter plaatse van de verdieping (meetframe) zijn de ebstromingen dan nog ongeveer gelijk, in de orde 0,30 m/s). Over de gehele buitendelta van zijn de stromingen eigenlijk vrijwel gelijk. Alleen in de geulen van het Pinkegat vindt er nabij het zeegat en dan landwaarts een versnelling van de stroming plaats. De stromingen op de Gronden van het Plaatgat zijn lager en de vectoren zijn hier duidelijk geroteerd. De stroming op het Bornrif en langs de kust van Schiermonnikoog is zuidwestelijk, tegenovergesteld aan de stroming op zee. Een rotatie van de stroming vindt ook plaats in de hoofgeulen, zoals het Westgat. In de geulen volgt de stroming de richting van de geul. Deze stromingen zijn wel allemaal richting het bekken gericht. Kentering van de stroming vindt ongeveer 1 uur na hoog water plaats (Figuur 4.1b). De stroomsnelheden over de gehele buitendelta zijn dan relatief laag. De grootste stromingen vinden nog plaats op zee en in de geulen in het bekken. Ook hier is geen effect van de verdieping te observeren. Tussen 22:00 en 23:00 vind er een maximale stroming door het zeegat plaats. Stroomsnelheden ter plaatse van het meetframe lopen dan op tot 0,50 m/s (zeewaarts gericht). In het zeegat zijn de stroomsnelheden met 0,80 m/s nog iets hoger. Ook tijdens deze hoge stroomsnelheden is er eigenlijk geen effect van de verdieping te zien (Figuur 4.1c).

Tijdens laagwater (03:00) zijn de stroomsnelheden in het zeegat over het algemeen laag (Figuur 4.2d). Wel zien we dat er al een kentering van de stroming heeft plaatsgevonden richting Ameland. Over het Pinkegat nadert deze stroming Zoutkamperlaag, maar heeft de geul dan nog niet bereikt. Dit stroombeeld wordt dan steeds sterker tot een maximale vloedstroming optreedt rond 06:00 (Figuur 4.2e). Snelheden bij het meetframe en ter plaatse van de Zoutkamerlaag zijn dan 0,60 m/s.

In geen van de stroombeelden is er, op het eerste gezicht, een duidelijke invloed van de verdieping op de stroming te onderscheiden. Vergelijken we het grootschalige stroombeeld met de stromingsvectoren ter plaatse van de verdieping, dan veranderen deze vectoren hier niet zichtbaar van richting en grootte. De stroombeelden geven wel de indruk dat de verdieping meer vloedgeoriënteerd is aangebracht. De ebstroom trekt er daardoor minder goed doorheen.

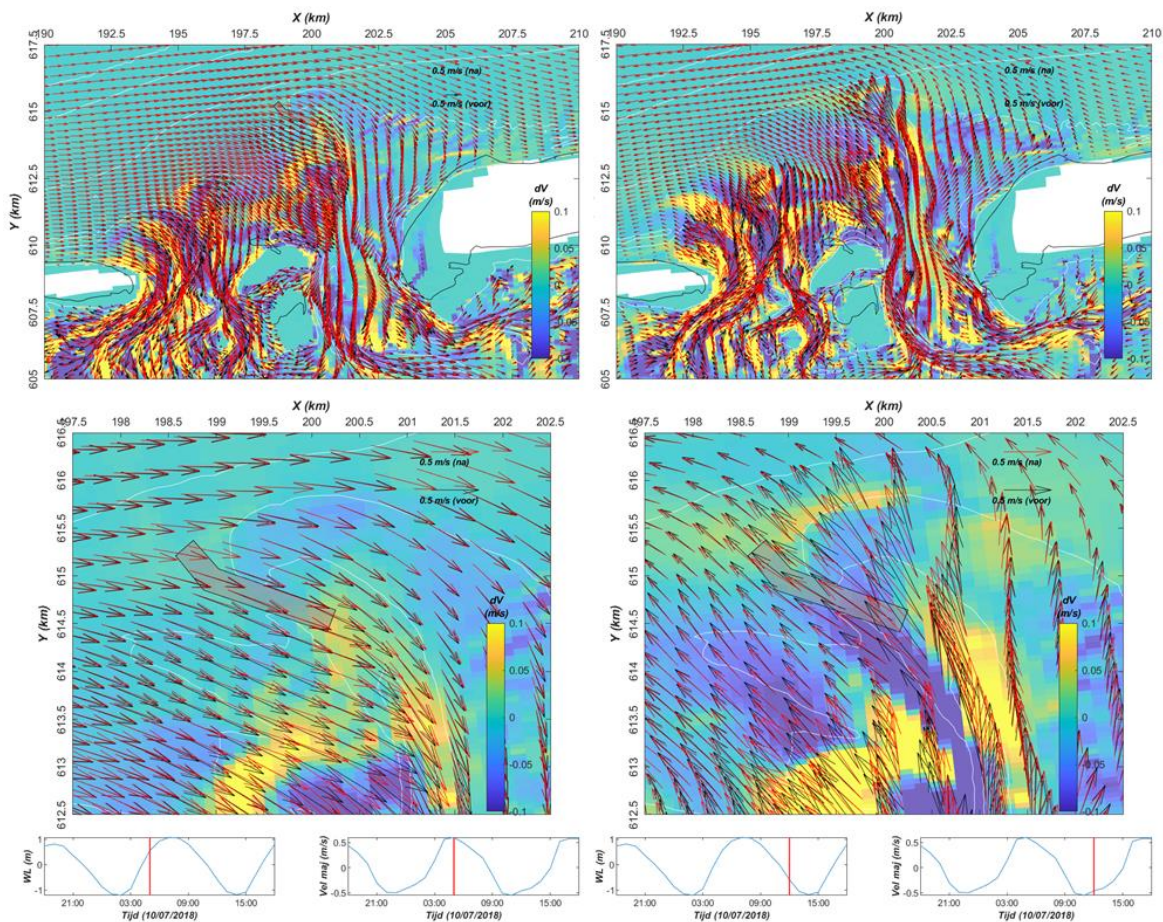


Figuur 4.1 Berekende getijstromingen voor de simulatie met gemeten bodem inclusief de verdieping (morph2) voor $t = 19:00$ (A), $20:00$ (B) en $23:00$. (C). Zie Appendix C voor losse deelfiguren.



Figuur 4.2 : Berekende getijstromingen voor de simulatie met gemeten bodem inclusief de verdieping (morf2) voor $t = 03:00$ en $06:00$. Zie Appendix C voor losse deelfiguren.

In Figuren 4.3 en Figuur 4.4 wordt de beïnvloeding van de stroming door de verdieping in detail weergegeven voor maximale eb- en vloedstroming. Kijken we naar de verschillen tussen de 2 gemeten bodems (run morf1 versus morf2), dan zien we dat de stromingsvelden op hoofdlijnen wel gelijk zijn. Toch zijn er wel verschillen te onderscheiden. Langs de kustzone en op zee zijn deze verschillen beperkt. Hier heeft de bodem weinig effect op de stroming. Aangezien de forcering van het model voor beide simulaties identiek is, verwachten we hier ook geen grote verschillen. In het gehele zeegat zien we echter wel beïnvloeding. Doordat de bodems hier iets afwijken, zijn ook de stromingen anders. Deze verschillen zijn lokaal zeer groot. Dit komt dan vooral doordat de geuligging lokaal iets is veranderd. De orde grootte van de verschillen ter plaatse van de verdieping van het Westgat zijn gelijk aan de overige verschillen buiten de verdieping. De verdieping is hierbij niet te onderscheiden van de grotere stroombeelden. Uit de detailweergave (onderste figuren) blijkt dat met name de oostwaartse verplaatsing van het Westgat en de verplaatsing van de banken ten westen van het Westgat de stroming iets in oostelijke richting duwt. Hierdoor verandert ook de uitstroming van het Westgat richting de verdieping. Dit effect is veel groter dan de beïnvloeding door de verdieping zelf. Vanuit de simulaties met gemeten bodems kunnen we geen goede uitspraak doen over de effecten van de verdieping.

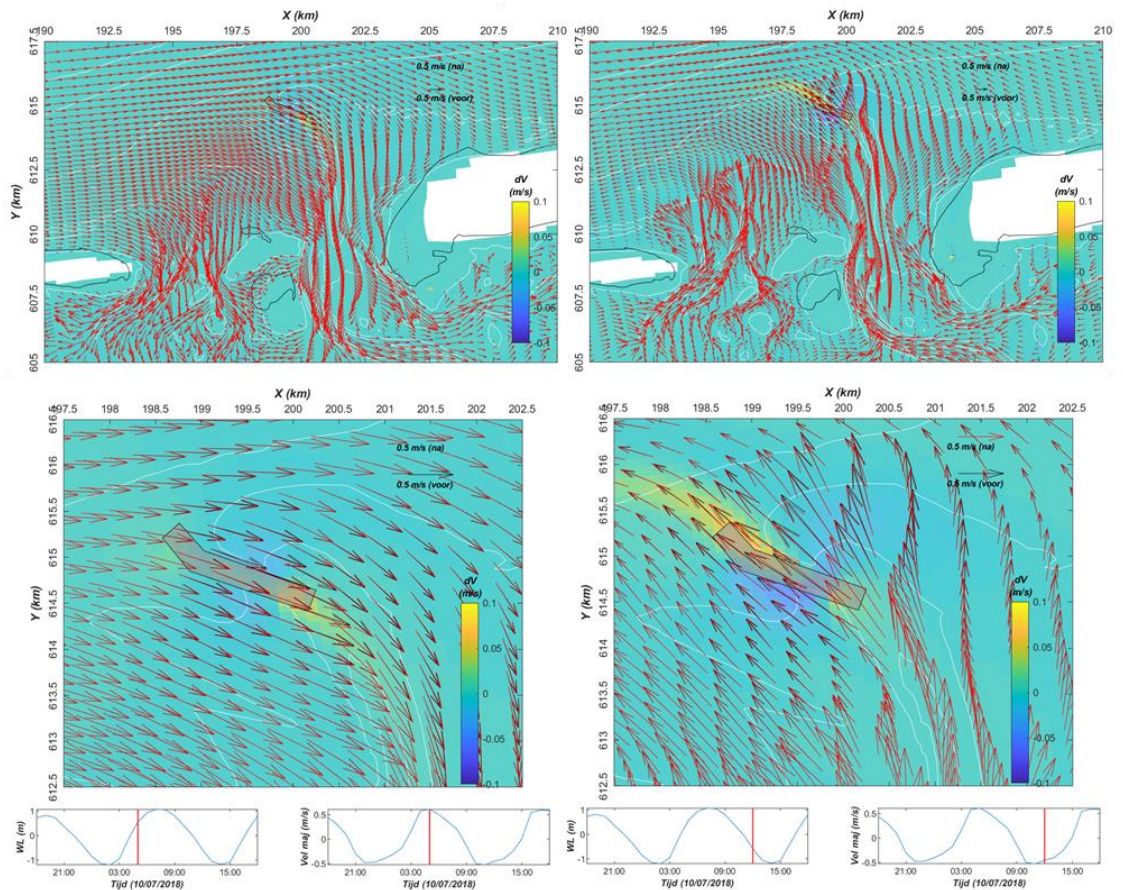


Figuur 4.3 : Vergelijking van de stroomvelden van de gemeten bodem vóór (morf1, zwarte vectoren) en na verdieping (morf2, rode vectoren) voor 2 representatieve perioden in het getij; (links) maximale vloedstroming in het Westgat en (rechts) maximale ebstroming in het Westgat. Achtergrond kleur geeft het verschil in stromingsmagnitude aan. Zie Appendix C voor losse deelfiguren.

In Figuur 4.4 geven we daarom de resultaten weer van de simulaties met bodem voor verdieping (morf1) en de simulatie met een kunstmatige verdieping (morf3). De resultaten van deze simulaties laten zien dat er grootschalig geen beïnvloeding van de stroming optreedt. Zowel langs de kust, op zee en in het bekken zijn de stromingen van beide simulaties vrijwel identiek. Ter plaatse van de verdieping zien we wel dat de stroming iets verandert. Deze veranderingen liggen in de orde van 0,05 m/s. Tijdens vloed nemen de stromingen in de verdieping iets af. In de verdieping zelf komt dit waarschijnlijk door de grotere diepte. Als een min of meer gelijke hoeveelheid water door een diepere geul gaat, nemen de diepte-gemiddelde stroomsnelheden af.

Tijdens eb zien we juist dat de stromingen in het centrale deel van de verdieping en op het aangrenzende deel van de buitendelta afnemen (orde grootte ongeveer -0,05 m/s). Wellicht veroorzaakt doordat de verdieping meer vloedgeriënteerd is aangebracht. De uitstroming van de verdieping genereert lokaal een iets hogere snelheid deze zet zich dan zeewaarts door. De bijbehorende verandering in stroomsnelheden zijn over het algemeen beperkt (0,05 – 0,10 m/s).

Als belangrijkste conclusie van deze simulaties geldt dat de verdieping een relatief klein effect op de stroming veroorzaakt. Dit effect is eigenlijk alleen te onderscheiden als we een kunstmatige verdieping aanbrengen. De verschillen in stromingen ten gevolge van natuurlijke ontwikkeling zijn groter dan de verschillen door de verdieping alleen.



Figuur 4.4 Vergelijking van de stroomvelden van de gemeten bodem vóór (morf1, zwarte vectoren) en bodem inclusief de kunstmatige verdieping (morf3, rode vectoren) voor 2 representatieve perioden in het getij; (links) maximale vloedstroming in het Westgat en (rechts) maximale ebstroming in het Westgat. Achtergrond kleur geeft het verschil in stromingsmagnitude aan. Zie Appendix C voor losse deelfiguren.

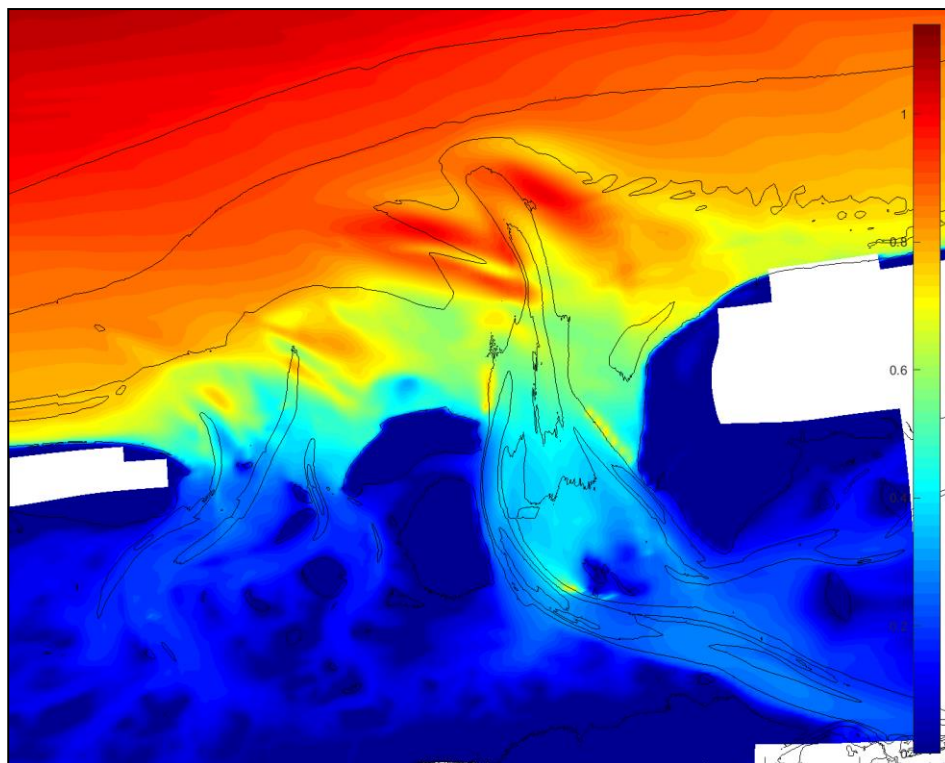
4.2 Golven

Figuur 4.5 en Figuur 4.6 geven een overzicht van de gemiddelde golfcondities vóór verdieping (morf1) en met de kunstmatige verdieping (morf3). Deze figuren geven de gemiddelde golfhoogte geschaald met de kans van voorkomen op basis van de 15 condities. In beide varianten zien we een vergelijkbaar beeld. De golfhoogte is het grootst in de Noordzee en neemt richting de kust sterk af. Op de vooroever van de kust en buitendelta is deze afname nog klein en vooral gerelateerd aan bodemwrijving. Naarmate het ondieper wordt gaat ook golfbreking een rol spelen. Golfbreking zorgt voor een sterke afname van de golfhoogte. Variaties in bodemdiepte resulteren dan ook in variaties van de golfhoogte. Dit beeld is ook duidelijk te zien bij het Friesche zeeget. Op locaties waar de banken voorkomen is de golfhoogte sterk afgenomen, bijvoorbeeld op de Plaatgronden, terwijl op de diepere delen de golfhoogte wat hoger blijft.

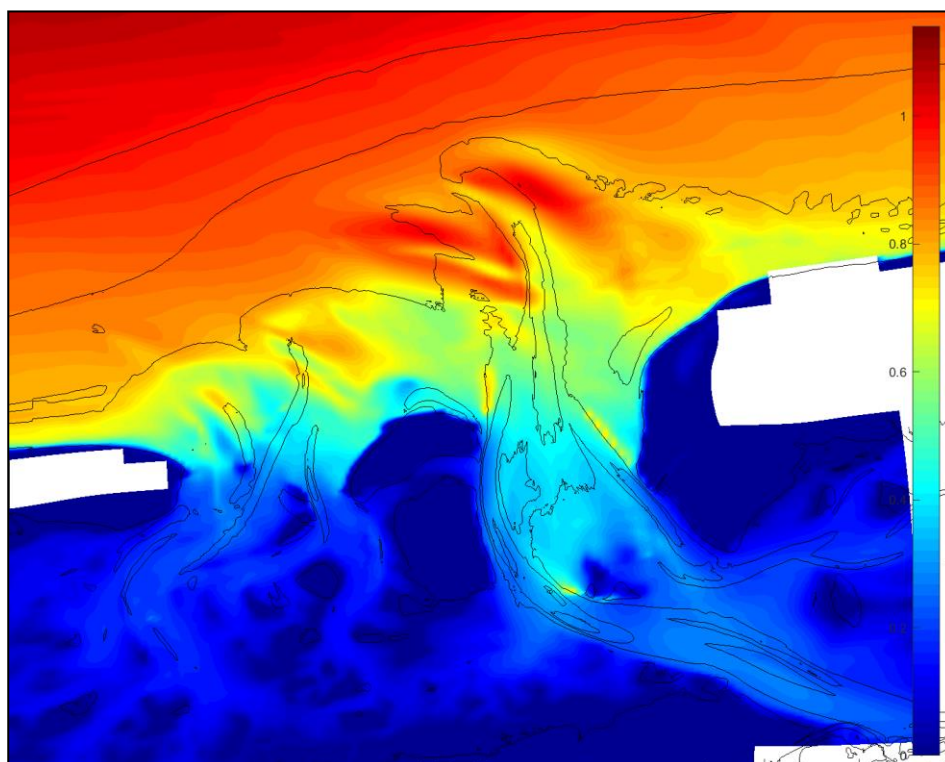
De uitstroom van het Westgat en de verdieping zijn nog duidelijk gelegen op een diepere locatie. Hier blijft de golfhoogte nog betrekkelijk hoog, vergelijkbaar met het diepwater golfklimaat. Pas landwaarts van de verdieping of oostelijk van het Westgat vindt de meeste golfbreking plaats. In Appendix B worden de golfhoogten voor de individuele condities weergegeven. Deze figuren vertonen twee belangrijke kenmerken. Ten eerste, voor lage golfcondities (wavecon 1-5, 7,8,9,13) vindt er geen golfbreking, maar juist een verhoging van de gemiddelde golfhoogte plaats in het zeewaartse deel van de buitendelta. Deze verhoging komt waarschijnlijk door shoaling en refractie. Soortgelijke patronen worden ook op andere buitendelta's waargenomen (Elias en Hansen, 2012). Golfbreking op het front van de buitendelta vindt vrijwel alleen plaats tijdens een beperkt aantal hoge golfcondities (wavecon 14 en 15). Figuur B.3 toont het effect van de

verdieping op de golfhoogten. In alle simulaties is een overeenkomstig beeld te zien van een kleinere golfhoogte ter plaatse van de verdieping en een iets hogere golf langs de zijkanten. De beïnvloeding geeft alleen een lokaal effect en zet zich verder niet door over de buitendelta.

Deze analyse van de golfcondities geeft een tweetal belangrijke inzichten in de processen op het buitendeltafront. Ten eerste, de effecten van de verdieping zijn lokaal zonder grootschalige beïnvloeding van de golven op de achterliggende buitendelta. Ten tweede, hoewel golfbreking en de daaraan gerelateerde golf gedreven transporten grote morfologische veranderingen kunnen veroorzaken, suggereren de golfberekeningen dat dit rond de verdiepte geul geen belangrijke rol speelt. Golfbreking treedt vooral op ten oosten van het Westgat op de Plaatgronden. Het zandtransport zal zich, met een dominant oostwaarts en landwaarts gericht golfklimaat, juist van de verdieping af bewegen. Ten zuiden van de verdieping is de buitendelta nog relatief diep. De meeste golfbreking vindt plaats op de ondieptes die zich dicht bij de kust bevinden. De afstand tot de verdieping is relatief groot waardoor de gerelateerde sedimenttransporten de verdieping niet direct beïnvloeden.



Figuur 4.5 Gemiddelde golfhoogte (geschaald naar kans van voorkomen) voor de bodem vóór de verdieping



Figuur 4.6 Gemiddelde golfhoogte (geschaald naar kans van voorkomen) voor de bodem met kunstmatige verdieping

4.3 Sediment transport

4.3.1 Sediment transportpatronen

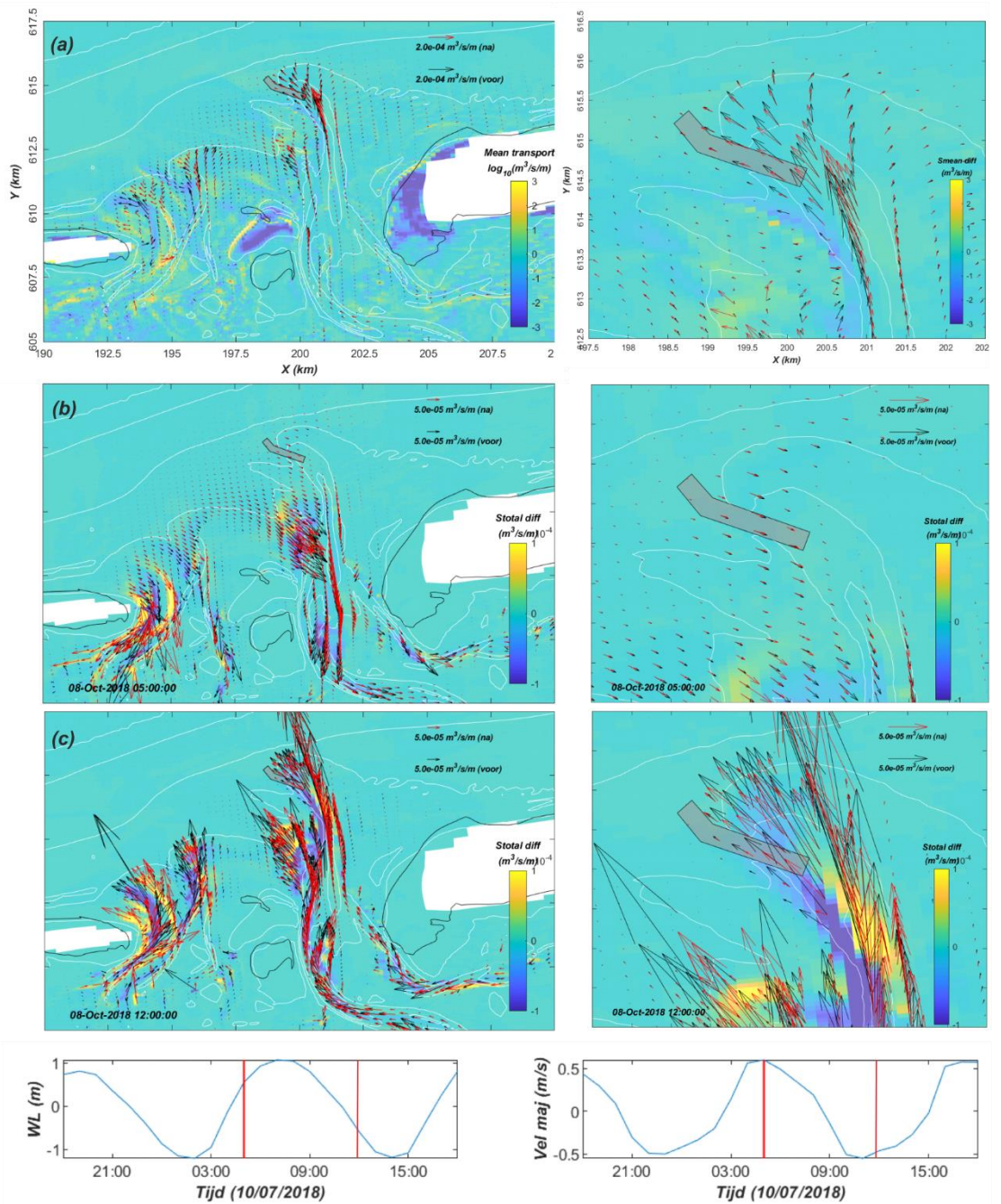
Residuele sedimenttransporten representatief voor de jaarlijks-gemiddelde transporten worden weergegeven in Figuur 4.7 en Figuur 4.8. Deze transporten zijn berekend door voor iedere golfconditie het getijgemiddelde transport te bepalen. Deze transporten zijn dan geschaald met de kans van voorkomen en daarna bij elkaar opgeteld. Dit totale transportveld geeft dan een representatief beeld van het potentiële sedimenttransport in het zeegat over lange termijn.

Het getijgemiddelde transport vertoont een opvallend verloop (Figuur 4.7a). Eigenlijk worden deze netto (ofwel rest)transporten vooral gedomineerd door de transporten op de buitendelta, waar de geulen uitmonden in de voorliggende eb-schilden. Hier domineren de ebdominante (zeewaarts gerichte transporten). Dit is het geval bij het Westgat, maar ook alle andere ebgeulen zoals die van het Pinkegat vertonen dit beeld. Dit wil niet zeggen dat op deze locatie ook de grootste bruto transporten optreden. In de Zoutkamperlaag zijn de bruto transporten veel groter, maar blijktbaar is de asymmetrie tussen de eb- en vloedgerichte transporten hier juist klein. Er gaat een groot transport zeewaarts en een bijna even groot transport landwaarts waardoor het netto verschil klein is.

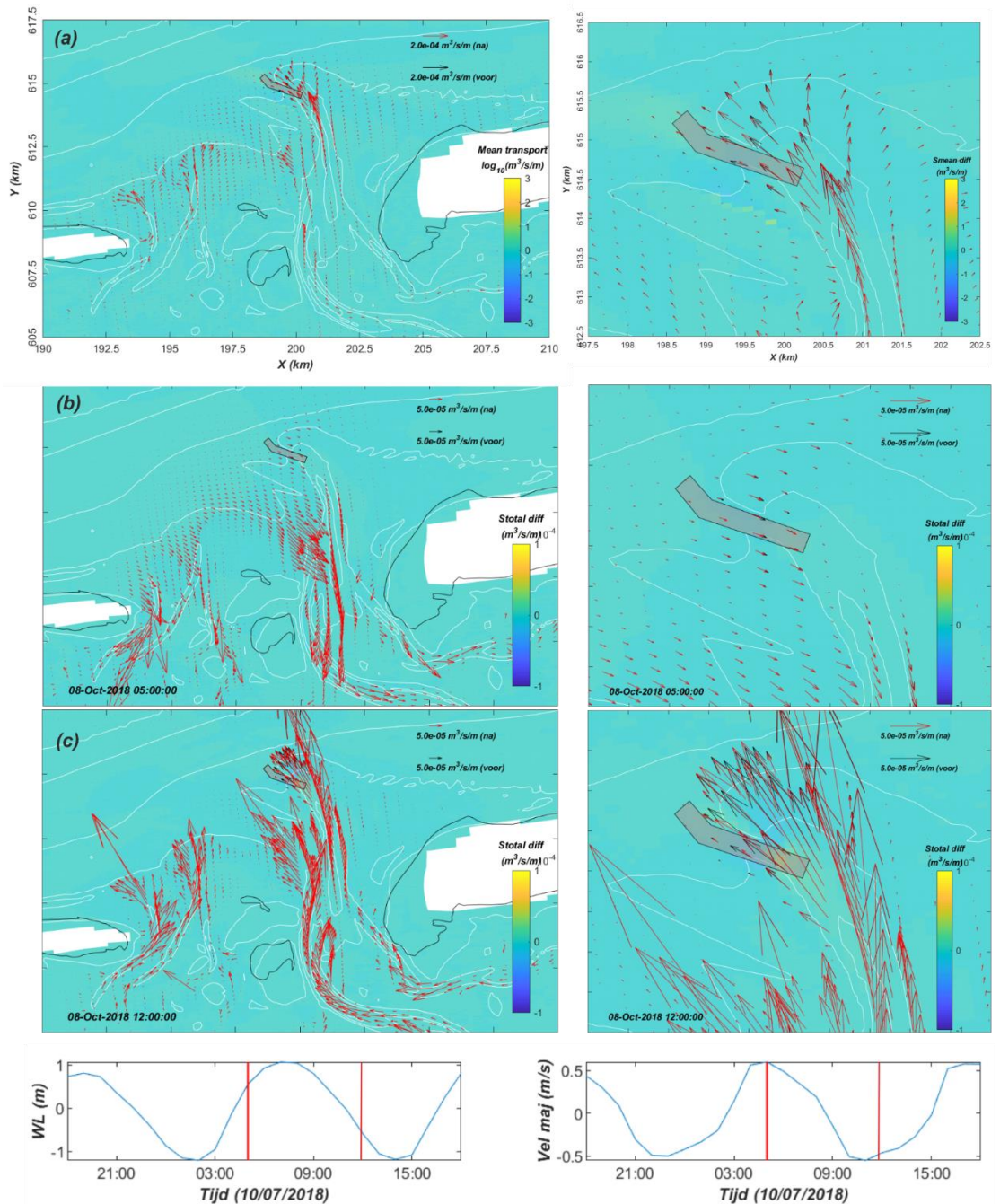
De grote netto transporten ter plaatse van de uitstroom van de geulen is goed te verklaren. Tijdens eb wordt de stroming door het zeegat geperst en nemen de snelheden sterk toe. De grootste snelheden concentreren zich in de geulen en die strekken zich ver zeewaarts uit. Hier treden dan ook over vrijwel de gehele lengte van de geul grote snelheden en transporten op. Tijdens vloed stroomt het water juist meer verspreid over de gehele ebdelta naar binnen. In de buurt van de keel van het zeegat wordt het debiet tussen de eilanden geperst en nemen de snelheden sterk toe, maar ver zeewaarts op de buitendelta treedt deze versnelling niet op. Hierdoor blijven de snelheden en de transporten betrekkelijk laag. Het gevolg is dat het zeewaartse deel van de hoofdgeulen vaak eb gedomineerd is en een betrekkelijk sterke residuele stroming ondervindt.

Een vergelijking van de modelresultaten met de gemeten bodems van vóór en na verdieping (morf1 en morf2) laat relatief grote verschillen zien. Deze treden op door het gehele zeegatsysteem maar zijn het grootst in het Pinkegat deelsysteem en bij het de uitstroom van het Westgat. In het Pinkegat is er een grote verandering in de ligging van de geulen en banken opgetreden. Ook bij de uitstroom van het Westgat zien we een groot verschil. Deze uitstroom is iets geroteerd (rechtsom), waardoor zowel de netto als bruto transporten zijn veranderd. De verandering in ligging van het Westgat domineert over het effect van de verdieping. Ter plaatse van de verdieping vertonen de vectoren wel een verschil (zie Figuur 4.7a, rechts), maar dit verschil is consistent met de grootschalige veranderingen in de uitstroom van Westgat en heeft niet direct te maken met de verdieping. De effecten van de verdieping zijn klein zijn t.o.v. de natuurlijke ontwikkeling.

De geringe invloed van de verdieping op de transporten wordt verder geïllustreerd door middel van de simulaties met kunstmatige verdieping (Figuur 4.8). Alleen ter plaatse van de verdieping zien we nu een klein verschil in de transportvectoren. De transporten in de verdieping nemen over het algemeen iets af. Dit is consistent met het effect op de stromingen. Door de grotere diepte nemen de stromingen af en daardoor ook de transporten. De effecten zijn echter klein en lokaal.



Figuur 4.7 Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en gemeten bodem na verdieping (rode vectoren, morf2). (a) Jaarlijks gemiddelde transport, (b) transporten tijdens maximale vloed en (c) transporten tijdens maximale eb. De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties. Zie Appendix D voor losse deelfiguren.



Figuur 4.8 Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en bodem met kunstmatige verdieping (rode vectoren, morf3). (a) Jaarlijks gemiddelde transport, (b) transporten tijdens maximale vloed en (c) transporten tijdens maximale eb. De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties. Zie Appendix D voor losse deelfiguren.

4.3.2 Sediment budget

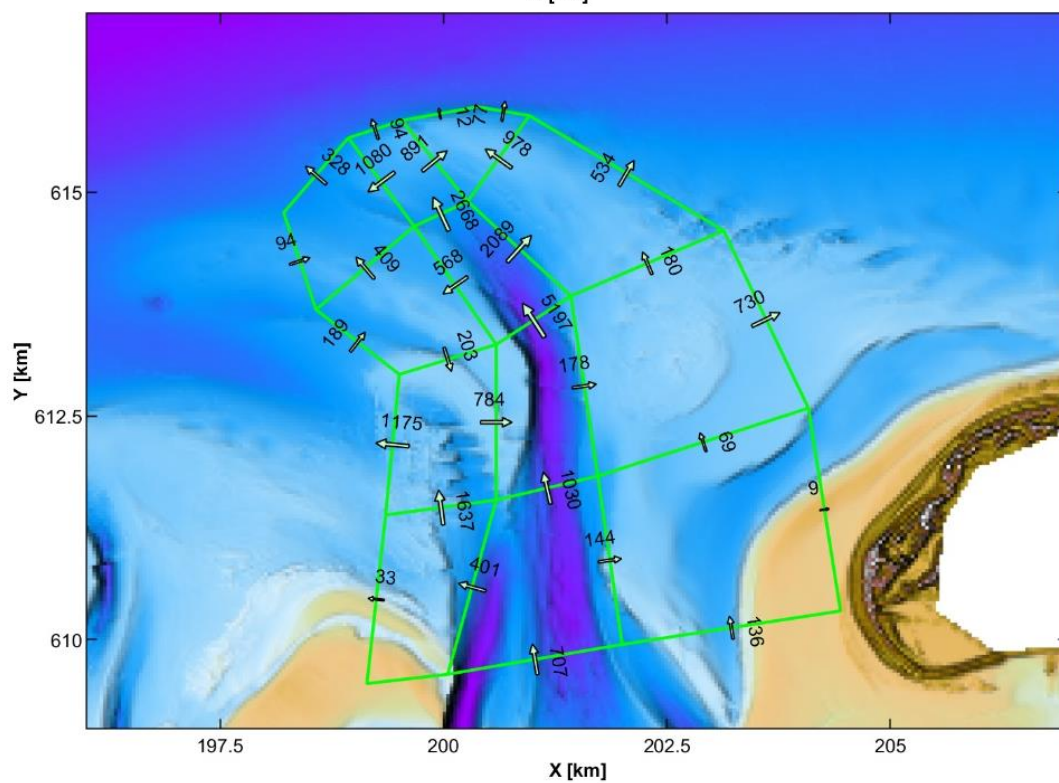
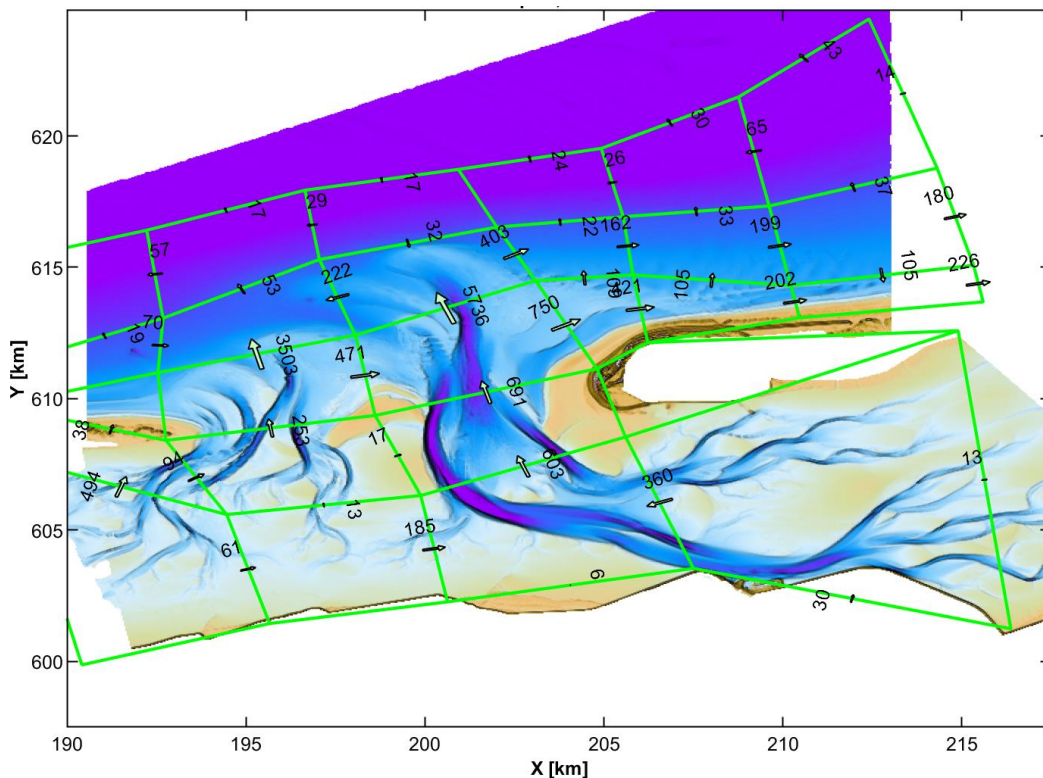
Voor morfologische verandering, sedimentatie of erosie, zijn het niet direct de sedimenttransporten, maar de gradiënten in het sedimenttransport die van belang zijn. De vectorfiguren in de vorige paragraaf (Figuur 4.7 en Figuur 4.8) geven een goed beeld van de transportpatronen, maar de transportgradiënten zijn hierin moeilijk terug te zien. Inzicht hierin kan worden verkregen door de transporten te berekenen over geselecteerde dwarsdoorsneden. Deze berekening is uitgevoerd voor zowel de gehele buitendelta als het Westgat in detail (zie Figuren 4.9 tot 4.11). We moeten hierbij opmerken dat in deze analyse morfostatische simulaties zijn gebruikt die niet zijn gekalibreerd op veldmetingen. We kijken daarom niet naar de absolute grootte van de transporten maar naar de verschillen tussen de simulaties met verschillende bodems.

De drie simulaties tonen een vergelijkbaar grootschalige sediment budget. Er vindt een netto export van sediment plaats. Deze is iets groter in de Zoutkamerlaag t.o.v. het Pinkegat. Dit beeld klopt niet geheel met de berekende volumeveranderingen in het bekken (Elias, 2019). Op basis van deze volumeveranderingen zou er juist een kleine import door het zeegat moeten plaatsvinden. Op zich is dit verschil wel verklaarbaar. De berekende netto export wordt met name veroorzaakt door de transporten door de Zoutkamperlaag (Figuur 4.7a). In onze berekening gebruiken we een uniforme sedimentsamenstelling terwijl in werkelijkheid door *bed armouring* de korrelgrootte in de diepe geulen wat groter is. In ons model worden de transporten daardoor iets overschat. Op de platen, of laag energetische gebieden, krijgen we juist het tegenovergestelde. Het gevolg is dat in de morfostatische simulaties de transporten netto zeewaarts zijn gericht. Voor morfologische berekeningen lijkt het gebruik van meerdere sedimentklassen essentieel om deze discrepantie op te lossen. Voor bepaling van de effecten van de verdieping is dit op dit moment niet noodzakelijk.

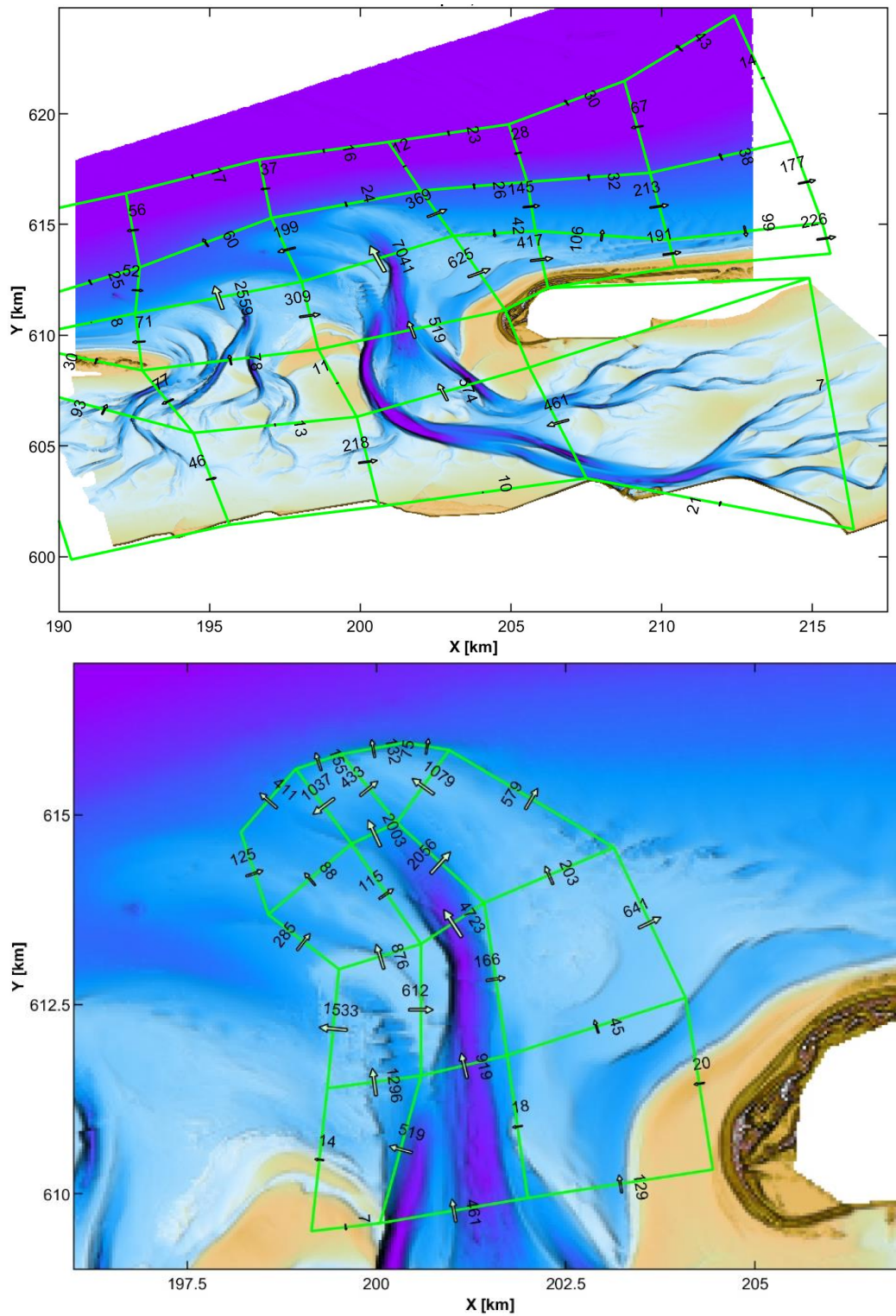
In alle simulaties zien we dat de transporten sterk toenemen op de buitendelta. Zo nemen de transporten in het Westgat een orde grootte toe in zeewaartse richting. Deze toename is veel groter dan de transporten door het zeegat. Dit geeft aan dat er in het zeewaartse deel van de buitendelta een veel grote dynamiek optreedt.

De sedimentbudgetten bevestigen het beeld dat verkregen is uit de analyse van de transporten en stromingen. Ook hieruit volgt dat de natuurlijke dynamiek een veel groter effect heeft dan de verdieping. Er is een relatief groot verschil in de simulaties die de gemeten bodem voor en na de verdieping opleggen (morf1 en morf2). Het verschil ter plaatse van de verdieping is echter relatief klein t.o.v. deze andere verschillen.

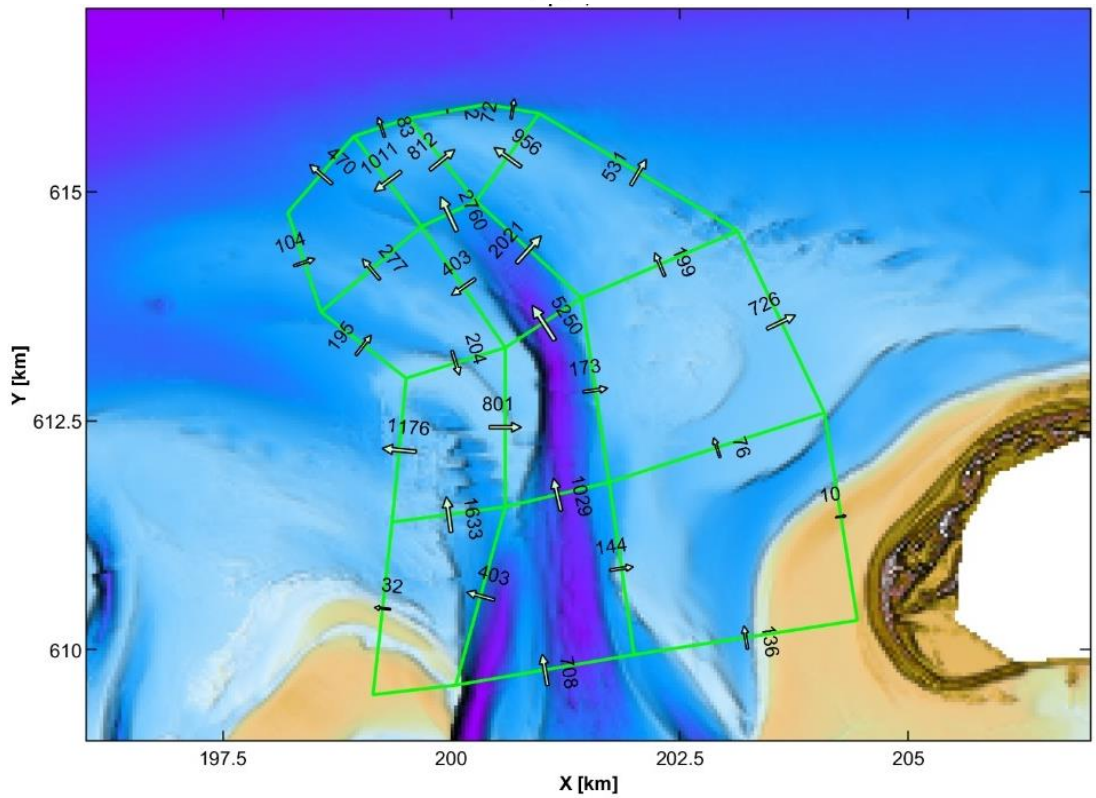
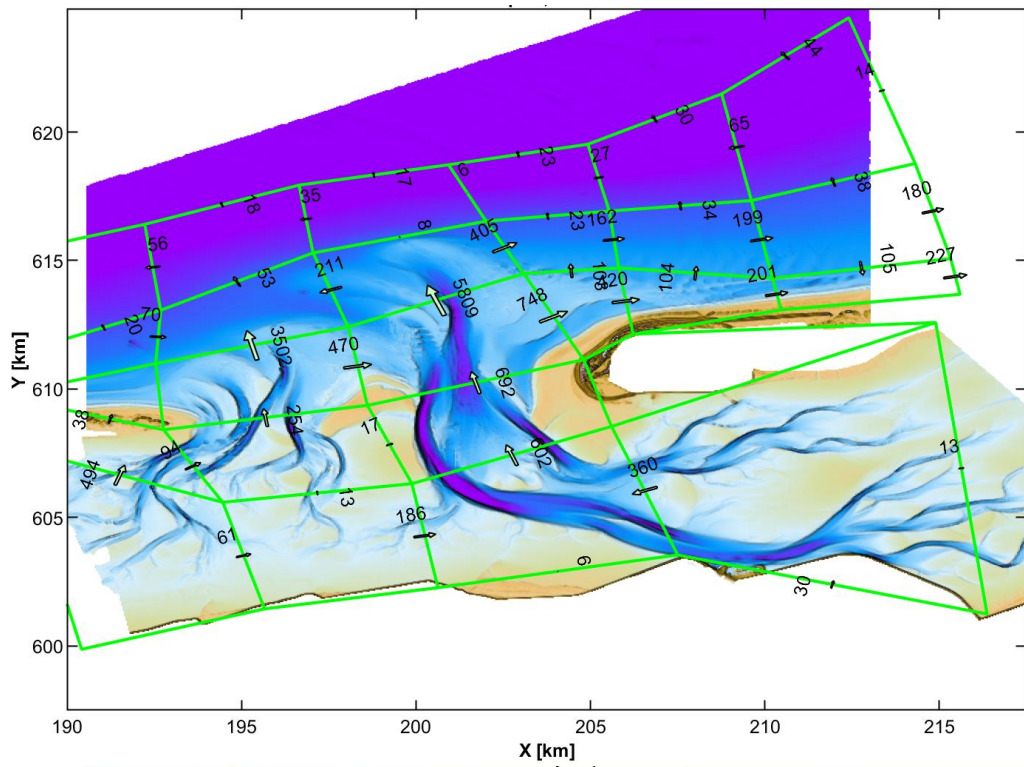
De effecten van de verdieping kunnen in meer detail worden beschouwd door de simulatie met kunstmatige verdieping (morf3) te vergelijken met die zonder verdieping (morf1). De ingezoomde sedimentbudgetten laten zien dat de verschillen langs de buitenrand in de orde van 5% van de transporten zijn (vergelijk Figuur 4.11 met Figuur 4.9). Deze verschillen treden zowel dichtbij de verdieping op, maar ook verder weg. De verschillen zijn klein en vallen binnen de onzekerheidsmarge van de gebruikte methode tijdens de nabewerkingen op de modelresultaten.



Figuur 4.9 : Een overzicht van de totale transporten berekend op de bodem voor verdiepingen (morf1) gemiddeld over de geselecteerde doorsneden voor het gehele zeegat (boven) en in detail voor het Westgat (onder).



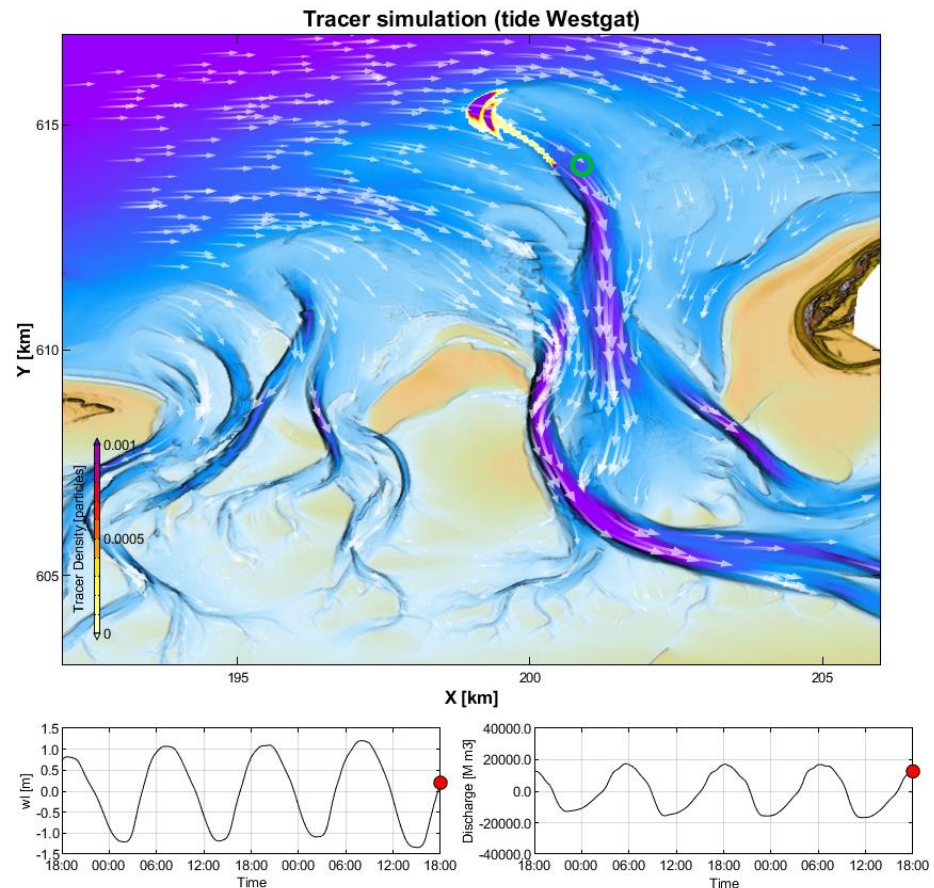
Figuur 4.10 : Een overzicht van de totale transporten berekend op de bodem na verdieping (morf2) en gemiddeld over de geselecteerde doorsneden voor het gehele zeegat (boven) en in detail voor het Westgat (onder).



Figuur 4.11 : Een overzicht van de totale transporten berekend op de bodem inclusief kunstmatige verdieping (morf3) en gemiddeld over geselecteerde doorsneden voor het gehele zeegat (boven) en voor het Westgat (onder).

4.3.3 Sediment tracer simulaties

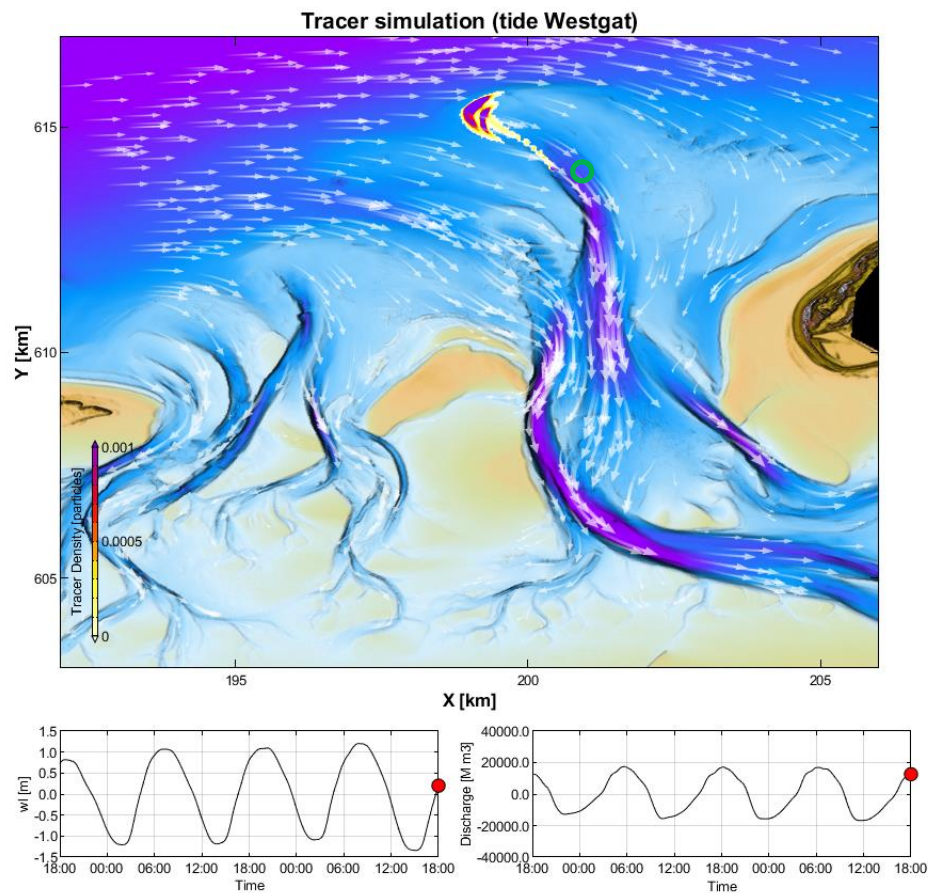
Uit de vorige paragrafen volgt al duidelijk het beeld dat de verdieping kleine effecten heeft op de sedimenttransporten. Deze effecten lijken een verwaarloosbare invloed te hebben op het morfologische systeem. Met behulp van “sediment tracer simulaties” kunnen we dit nog verder toetsen. De sediment tracers gebruiken de berekende transportvectoren om de verplaatsing van sedimentdeeltjes weer te geven. Als test plaatsen we 1000 deeltjes in het Westgat net landwaarts van de verdieping (Figuur 4.12). Deze deeltjes laten we dan over een lange tijd door het systeem verplaatsen. Als de effecten van de verdieping inderdaad verwaarloosbaar klein zijn dan zouden gelijke patronen moeten ontstaan op de verschillende bodems. In deze simulaties is alleen gerekend met de getijstromingen en is de invloed van golven niet meegenomen.



Figuur 4.12 : Eindpositie van een sediment tracer op basis van de sediment transporten berekend over de bodem voor verdieping (morf1). Groene cirkel geeft het lozingspunt van de tracer weer. Witte vectoren geven een beeld van de diepte-gemiddelde stroming.

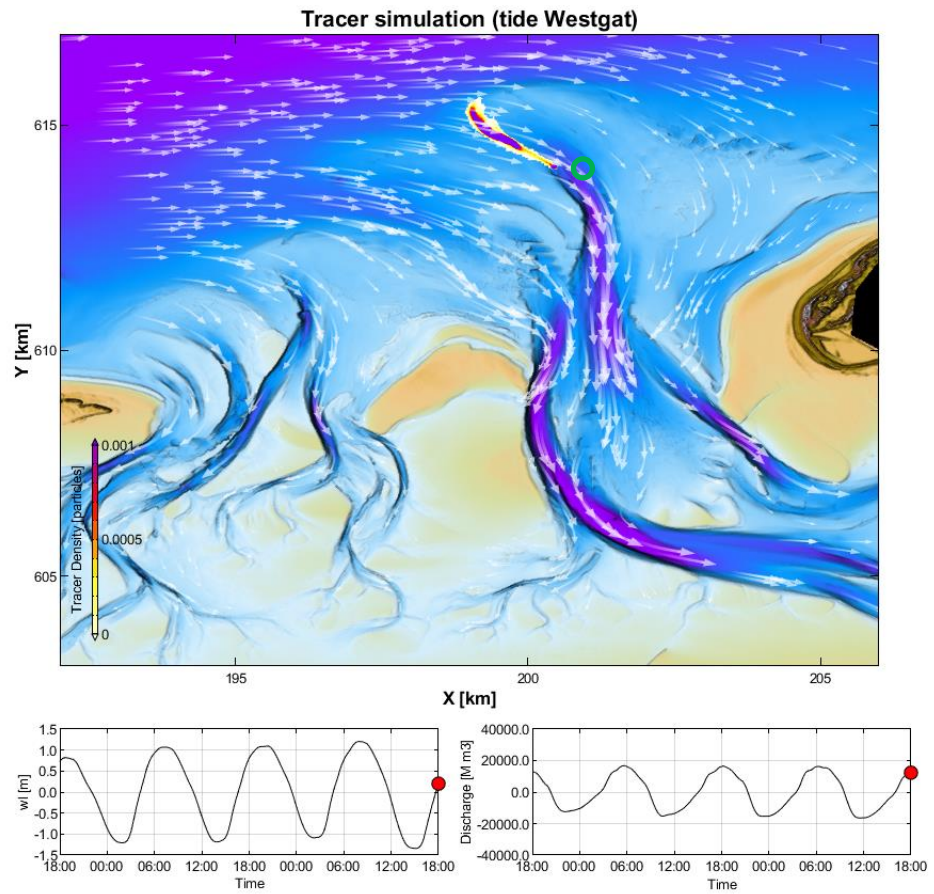
In Figuur 4.12 illustreren we de sedimentverplaatsing zoals die optreedt op basis van de bodem vóór het aanbrengen van de verdieping. De tracerdichtheid is weergegeven met kleuren variërend van geel naar paars. De figuur laat zien dat de tracer (het sediment) netto zeewaarts verplaatst, de landwaartse verplaatsing is nihil. Dit komt overeen met de grote residuele transporten die hier plaatsvinden. Het sediment verplaatst zich langs de geulwand zeewaarts en wordt neergelegd langs de rand van de buitendelta. Uiteindelijk vormen zich dan 2 waaiers van tracer depositie.

Deze twee randen corresponderen met de onderliggende getijbeweging, waarbij de opeenvolgende getijden een klein verschil in grootte hebben. Een vrijwel identiek patroon wordt verkregen als we deze simulatie uitvoeren met de kunstmatige verdieping (Figuur 4.12). De verdieping zelf geeft geen afwijking van het sediment pad en sediment gaat ook de verdieping niet volgen. Deze constatering is een aanvullend bewijs dat de verdieping de transporten in de geul niet significant beïnvloedt.



Figuur 4.13 : Eindpositie van een sediment tracer op basis van de sediment transporten berekend over de bodem met kunstmatige verdieping (morf3). Groene cirkel geeft het lozingspunt van de tracer weer.

De modelresultaten gebaseerd op de gemeten bodem na verdieping (morf3) laten wel duidelijke verschillen zien met de vorige simulaties (Figure 4.14). Ook hier wordt de geplaatste tracer (het sediment) zeewaarts verspreid. Het sediment blijft echter wel meer aan de zuidelijke zijde van het Westgat en langs de rand van de buitendelta hangen. Er vormt slechts 1 "waaier" van sediment. Deze simulatie geeft ons echter wel belangrijke inzichten: (1) de transportpatronen worden vooral bepaald door de grootschalige dynamiek, en (2) de vrijwel identieke patronen die gevonden worden als we deze dynamiek niet meenemen bewijst dat de verdieping geen significant morfologisch effect veroorzaakt.



Figuur 4.14 : Eindpositie van een sediment tracer op basis van de sediment transporten berekend over de bodem na verdieping (morf2). Groene cirkel geeft het lozingspunt van de tracer weer.

5 Synthese en conclusies

5.1 Synthese

De combinatie van uitvoerige metingen en de toepassing van een proces-gebaseerd model stelt ons in staat het gedrag van de verdieping te begrijpen en daardoor een voorspelling naar de toekomst te maken. Zowel het model als de bodemmetingen geven ons een duidelijk beeld achter de redenen van de waargenomen geobserveerde stabiliteit van de geul en de opgetreden sedimentatie.

De stabiliteit van de verdieping is niet vanzelfsprekend. Over het algemeen zijn buitendelta's hoogdynamische gebieden waarin grote transporten en bodemveranderingen kunnen optreden. Ook de uitstroom van het Westgat en het voorliggende ebschild zijn in principe morfologische elementen met een natuurlijke dynamiek. Op een tijdschaal van een jaar is een duidelijke verplaatsing/rotatie te onderscheiden. Het aanbrengen van een kunstmatige verdieping in een dynamisch systeem kan in principe een grote respons veroorzaken. Als deze verdieping zich als stroomvoerende geul gaat gedragen kan het de stroming van de natuurlijke geul overnemen en zo grootschalig het systeem gaan beïnvloeden. Van zo'n beïnvloeding is hier geen sprake. De verdieping ligt niet direct in het verlengde van de uitstroom en de gemeten bodems laten zien dat er geen directe aantakking van de verdieping richting het Westgat optreedt. Ter plaatse van de aantakking treedt zelfs verzanding op. Ook de modelresultaten laten zien dat de verdieping het grootschalige stromingspatroon vrijwel niet beïnvloed. De uitstroom van het Westgat blijft de natuurlijke richting, het ebschild op, volgen. De geringe verschillen die optreden ter plaatse van de verdieping zijn met name gerelateerd aan de grotere diepte, waardoor de dieptegemiddelde stroming iets afneemt.

De waargenomen aanzanding in de verdieping richting het Westgat is uit deze analyse ook goed te verklaren. In het Westgat overheerst een relatief groot ebdominant transport. Het ebschild, maar ook de grote, asymmetrische, bodemvormen in het Westgat laten dit duidelijk zien. De verdieping vormt vooral een discontinuïteit op de geulwand van het Westgat. Deze discontinuïteit wordt door de grote transporten in het Westgat uitgevlakt. De natuurlijke ligging was de bodem vóór verdieping en aangezien het stroombeeld niet wezenlijk verandert na de verdieping, zal de bodem terug naar dit natuurlijke evenwicht ontwikkelen. In de verdieping is dit terug te zien in een drempelvorming bij de overgang van verdieping naar Westgat.

Gezien de geringe stroming in de verdieping is de stabiliteit ervan opmerkelijk. De verdieping zou ook als een grote bezinkput kunnen werken die al het zand invangt. Toch lijkt het invangen van zand beperkt. Naast het invullen van de verdieping ter plaatse van de geulwand van het Westgat vindt er in het zeevaartse deel slechts een beperkte aanzanding plaats. Deze aanzanding is relatief klein en vindt voornamelijk direct na aanleg en in de winterperiode plaats. De initiële aanzanding direct na aanleg is logisch. Het geulprofiel is steil aangelegd en deze vervormt naar een meer natuurlijk evenwicht. Het uitgebaggerde zand was aan weerszijden van de geul neergelegd en dit zand wordt gedeeltelijk terug de verdieping in getransporteerd. Na deze initiële aanpassing is de overige aanzanding eigenlijk beperkt. Dit kan worden verklaard door de gunstige ligging van de verdieping in relatie tot het ebschild. De noordzijde van de verdieping wordt begrenst door het ebschild van het Westgat, maar aan de zuidzijde vinden we geen direct aangrenzende bank die als zandbron kan dienen.

Het ebschild van het Westgat ligt vooral voor de geul en aan de noordzijde. De vorm ontstaat als een evenwicht tussen het zeewaartse transport door de geul en de landwaartse, golfgedreven, transporten. Het ebschild ligt niet symmetrisch rond de geulmonding, maar heeft een duidelijk zwaartepunt aan de noordoostzijde van de geul. Deze asymmetrie is waarschijnlijk gerelateerd aan het overheersende golfklimaat met een dominante oostelijk gerichte component. De verdieping ligt in relatie tot het ebschild dan ook heel gunstig; niet in het centrale gedeelte van het ebschild maar eigenlijk net aan de zuidzijde. Hier is de bank relatief diep, met alleen een kleine ondiepe uitstulping aan de geulzijde. De modelresultaten laten zien dat golfbreking op deze locatie beperkt is. Alleen tijdens grote stormen breken de golven hier op het ebschild. De transporten zijn in die condities over het algemeen oostwaarts en landwaarts gericht, maar slechts in beperkte mate richting de verdieping. Tijdens stormen vindt er wel de meeste aanzanding in de verdieping plaats, maar dit is nog steeds beperkt. Aan de zuidzijde van de verdieping bevindt zich niet direct een plaatoppervlak waardoor aanvoer vanaf deze kant ook gering is. De gunstige ligging van de verdieping in relatie tot de dynamische delen van de buitendelta is de belangrijkste reden voor de geobserveerde stabiliteit.

De toekomstige ontwikkeling van de verdiepte vaargeul zal met name bepaald worden door de drempelvorming aan de oostzijde van de verdieping. Hier is de sedimentatie het grootst en de processen onderliggend aan deze aanzanding blijven aanwezig. Een extrapolatie van de geobserveerde verandering geeft hierin een goede schatting van de toekomstige ontwikkelingen. De sedimentatie in het meer zeewaartse deel van de verdieping blijft waarschijnlijk beperkt. De drempelvorming zal de belangrijkste factor vormen.

5.2 Conclusies

Een belangrijke les die uit de aanleg van de verdieping getrokken kan worden is dat dit soort ingrepen goed uitgevoerd kunnen worden, zonder dat grootschalige effecten optreden. De natuurlijke dynamiek gaf veel grotere veranderingen dan de verdieping zelf.

Met een goed gekozen locatie, in een relatief laagdynamisch deel van de buitendelta, kan een verdieping ook voor langere tijd, natuurlijk gehandhaafd worden. Voor scheepvaart is een vaste, geografische ligging wenselijk, maar de ligging van de verdieping in relatie tot de omliggende morfologische eenheden is hierbij van cruciaal belang. Door morfologische veranderingen van de buitendelta kan de geografische ligging ongunstig worden, waardoor er veel meer aanzanding kan optreden en zo'n geul dan significante onderhoudsinspanningen vereist. Het kiezen van een relatief laagdynamisch gebied is geen voor de hand liggende taak. Dit vraagt een zorgvuldige afweging op basis van een grondige analyse van het morfologische systeem.

Op dit moment zijn er geen indicaties dat er ter plaatse van de verdieping grootschalige veranderingen optreden. Drempelvorming tussen de verdieping en het Westgat lijken het belangrijkste knelpunt te zijn. Deze drempelvorming is voorspelbaar aan de hand van de gemeten aanzanding.

Beantwoording van de onderzoeksvragen:

(1) Wat is de stromingskarakteristiek van de verdieping. Is dit een stroomvoerende geul – zorgt de verdieping voor een grotere stroomsnelheid?

De verdieping vertoont geen duidelijke kenmerken van een stroomvoerende geul. De uitstroom vanuit het Westgat vertoont geen beïnvloeding door het aanbrengen van de geul. Deze uitstroom blijft gericht richting het buitendelta front en vertoont nauwelijks beïnvloeding door de verdieping. Het grootste effect van de verdieping op de stromingskarakteristiek is te verwachten rondom laagwater. Het debiet tijdens laagwater dat door het Westgat stroomt is tot kort voor de verdieping geconcentreerd in de geul, met de daarbij horende grote stroomsnelheden in noordelijke richting. Bij het ebschild waaiert deze stroming uit in verschillende richtingen over het ebschild. Hierbij is geen concentratie van de stroming door de verdieping te zien. Ook tijdens hoogwater is geen effect van de verdieping op de stromingspatronen te zien. De verdieping is dus geen stroomvoerende geul, waarin grotere stroomsnelheden dan in het omliggende gebied optreden. Ter plaatse van de verdieping is een geringe afname van de stroomsnelheid te zien, als gevolg van de grotere waterdiepte.

(2) Wat is het transportpotentieel van de verdieping. Is er een aanwijsbare verandering in de sedimenttransporten in de buitendelta ten gevolge van de verdieping?

De verdieping vertoont geen duidelijke beïnvloeding van de sedimenttransporten. De transporten in het Westgat vertonen met en zonder verdieping een gelijkwaardig patroon. Wel zijn er lokaal hele kleine verschillen te onderscheiden. Dit is ook logisch. Ter plaatse van de verdieping is de lokale stroomsnelheid iets lager. Hierdoor nemen ook de transporten iets af. De verdieping werkt zo eigenlijk als een bezinkput voor het sediment. Deze effecten zijn echter klein en alleen lokaal aanwezig in de verdieping.

(3) Kunnen de geobserveerde veranderingen verklaard worden met de modelberekeningen?

De resultaten van de modelstudie zijn consistent met de gemeten veranderingen. De modelresultaten kunnen daarom goed gebruikt worden om de processen in detail te onderzoeken. Een belangrijke conclusie vanuit de modelresultaten is dat de natuurlijke ontwikkelingen veel grotere veranderingen veroorzaken dan de verdieping zelf. Als we puur de gemeten bodems (vóór en na) verdieping gebruiken dan kunnen we de effecten van de verdieping niet onderscheiden. Alleen door het aanbrengen van een kunstmatige verdieping in de bodem vóór verdieping kunnen we de effecten van de verdieping onderscheiden.

(4) Wat is het effect van de verschillende processen (golven, getij, morfologie) op de ontwikkelingen?

Door de verdieping zijn de golfhoogtes en (getij)stromingssnelheden alleen lokaal veranderd. Deze veranderingen zijn in geringe mate terug te zien in het effect van de verschillende processen.

De golven laten vooral aan de geulzijde van de verdieping een verandering zien, doordat de shoaling (de toename van de golfhoogte door de afname in waterdiepte) in de verdieping minder groot is. De golfhoogte is daardoor lager, wat vermoedelijk zorgt voor minder opwoeling van sediment en daardoor bijdraagt aan de sedimentatie. Dit effect is bij bijna alle golfcondities te zien, met uitzondering van hoge golven uit het noorden en noord-noordwesten.

Zoals al hierboven beschreven heeft de verandering van de morfologie een groter effect dan de verdieping zelf. Daarnaast heeft de stabiele positie van de geulen en de lage ligging van het ebschild van het Westgat grote invloed op het effect van golven en getij. Anders gezegd: bij een ondieper ebschild of een geul die roteert zou het effect van golven en getij anders zijn geweest en vermoedelijk hebben geleid tot een groter effect op de verdieping.

(5) Hoe zal de verdieping zich in de toekomst gaan ontwikkelen?

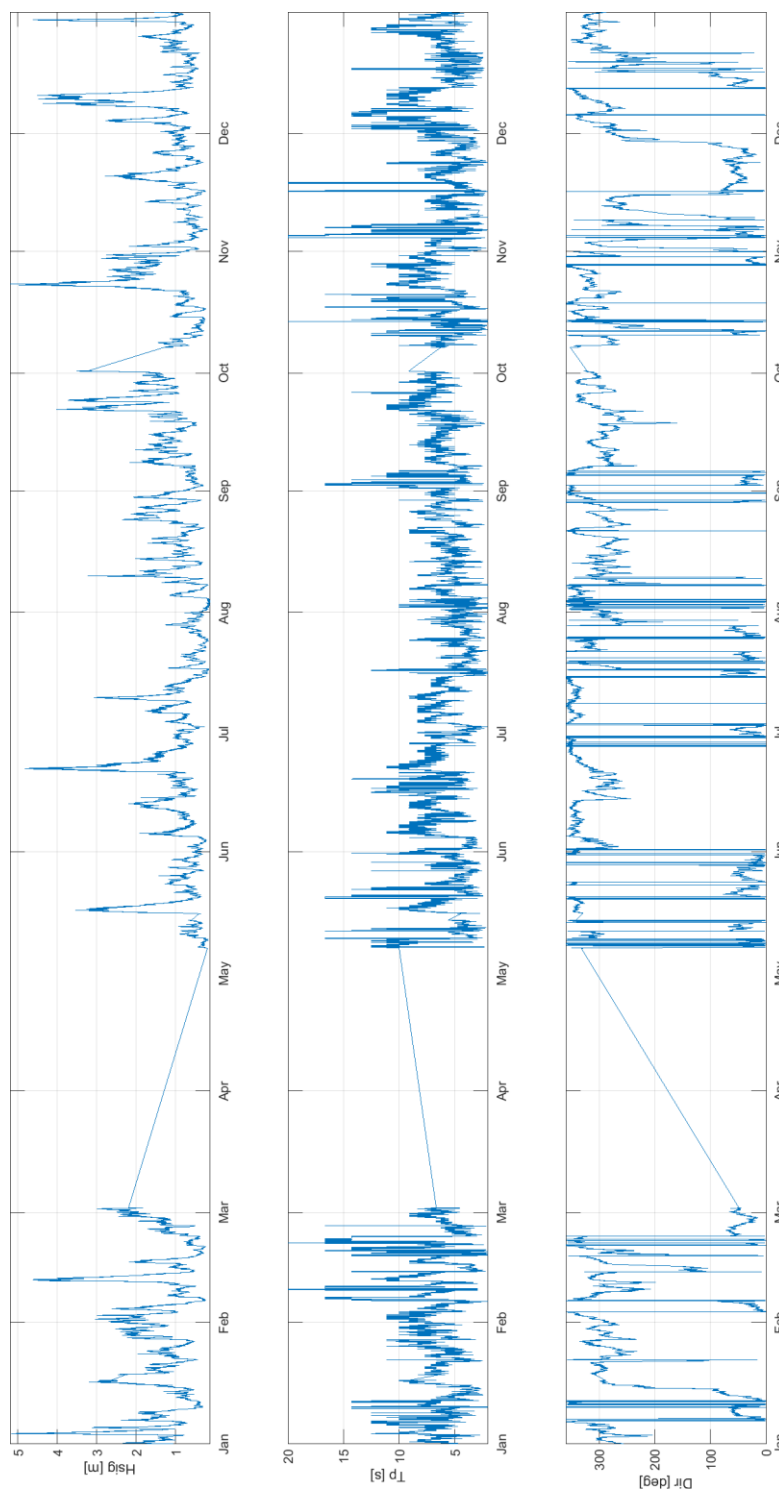
De geobserveerde trend van aanzanding aan geulzijde en erosie aan zeezijde van de verdieping zal naar verwachting op een vergelijkbare manier doorzetten als afgelopen jaar. Als de geul niet wordt onderhouden (op diepte wordt gehouden) neemt mogelijk de mate van verandering iets af, als de verdieping in de tijd 'uitvlakt'. De aanzanding in het eerste jaar bedroeg 60.000 m³, gemiddeld 5.000 m³/maand. Wanneer de vaargeul zou worden onderhouden kan een iets groter volume worden verwacht, omdat de initiële aanzanding groter is en door het op diepte houden de verdieping verder uit evenwicht blijft.

De ontwikkeling van de verdieping, en daarmee de inspanning voor onderhoud, zal veranderen als de grootschalige omringende morfologie verandert. Als de beginnende ebgeul net ten noorden van het Rif groter wordt en verbinding maakt met de vloedgeul uit westelijke richting, zal dat een nieuw Westgat vormen. Het huidige Westgat, en de verdieping van de drempel daarvan, zal dan naar verwachting in korte tijd dicht worden gedrukt en aanzanden doordat er een kleiner debiet doorheen zal stromen.

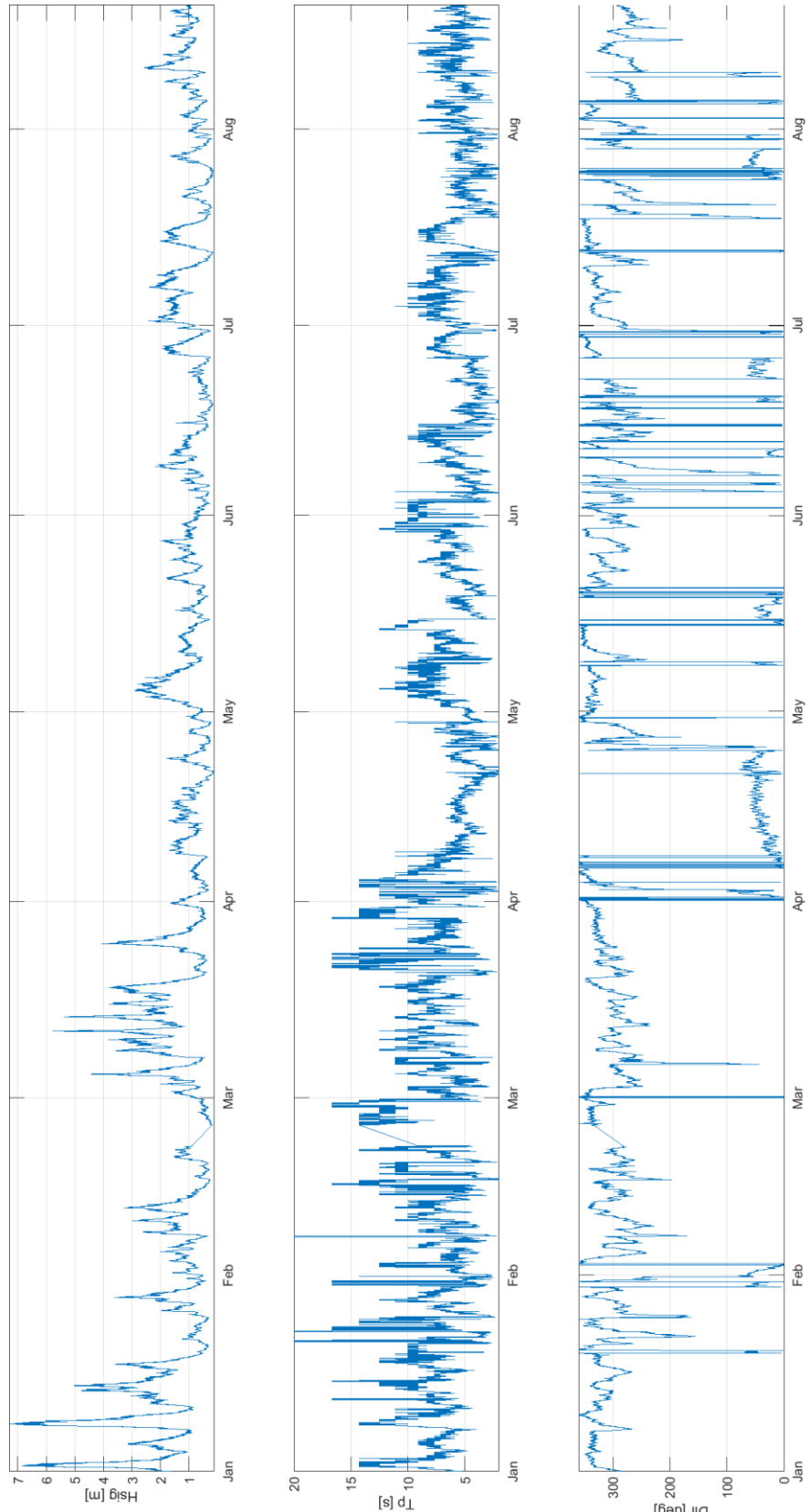
6 Referenties

- Elias, E.P.L. (2019). Een actuele zandbalans van de Waddenzee. Rapport 11203683-001-ZKS-0002, Deltars, Delft, 117 p.
- Elias, E.P.L. and Hansen, J. (2012). "Understanding processes controlling sediment transports at the mouth of a highly energetic inlet system (San Francisco Bay, CA)," *Marine Geology*, 345, 207-220.
- De Graaf, R.F. (2009) SBW Wadden Sea, water level modelling. Deltares, rapport 1200114-005
- Latteux, B., (1995). "Techniques for long-term morphological simulation under tidal action." *Marine Geology*, 126, pp 129-141.).
- Lesser, G.R. (2009). "An approach to medium-term coastal morphological modelling," *Ph.D. Thesis*, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.
- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., Van Kester, J.A.T.M. and Stelling, G.S. (2004). "Development and validation of a three-dimensional model," *Coastal Engineering*, 51, 883-915.
- Mulder, H. & Lofvers, E., (2015). Morfologische beschouwing t.b.v. vaargeul Westgat. Notitie Rijkswaterstaat Noord & WV
- Oost, A.P., T. Vermaas en L.M. Vonhogen-Peeters (2015), Morfologische beschouwing ontwikkeling vaarweg buitendelta Zoutkamperlaag. Deltares, rapport 1220040-001-ZKS-
- 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* 133, 19.
- Van Rijn, L.C., (2007b). "Unified view of sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport." *Journal of Hydraulic Engineering* 133, 22.
- Van Rijn, L.C., (2007c). "Unified view of sediment transport by currents and waves. III: Graded beds." *Journal of Hydraulic Engineering* 133, 15.
- Vermaas, T. en E.P.L. Elias (2019). Werking van het Friesche Zeegat - Morfologie en hydrodynamica. Deltares, rapport 11203669-000-ZKS-0005, Delft, p.
- Vermaas, T. en A.P. Oost (2016), Prognose baggerinspanning op korte en lange termijn in het Westgat. Deltares, rapport 1230043-001-ZKS-0005

A Son golfdata

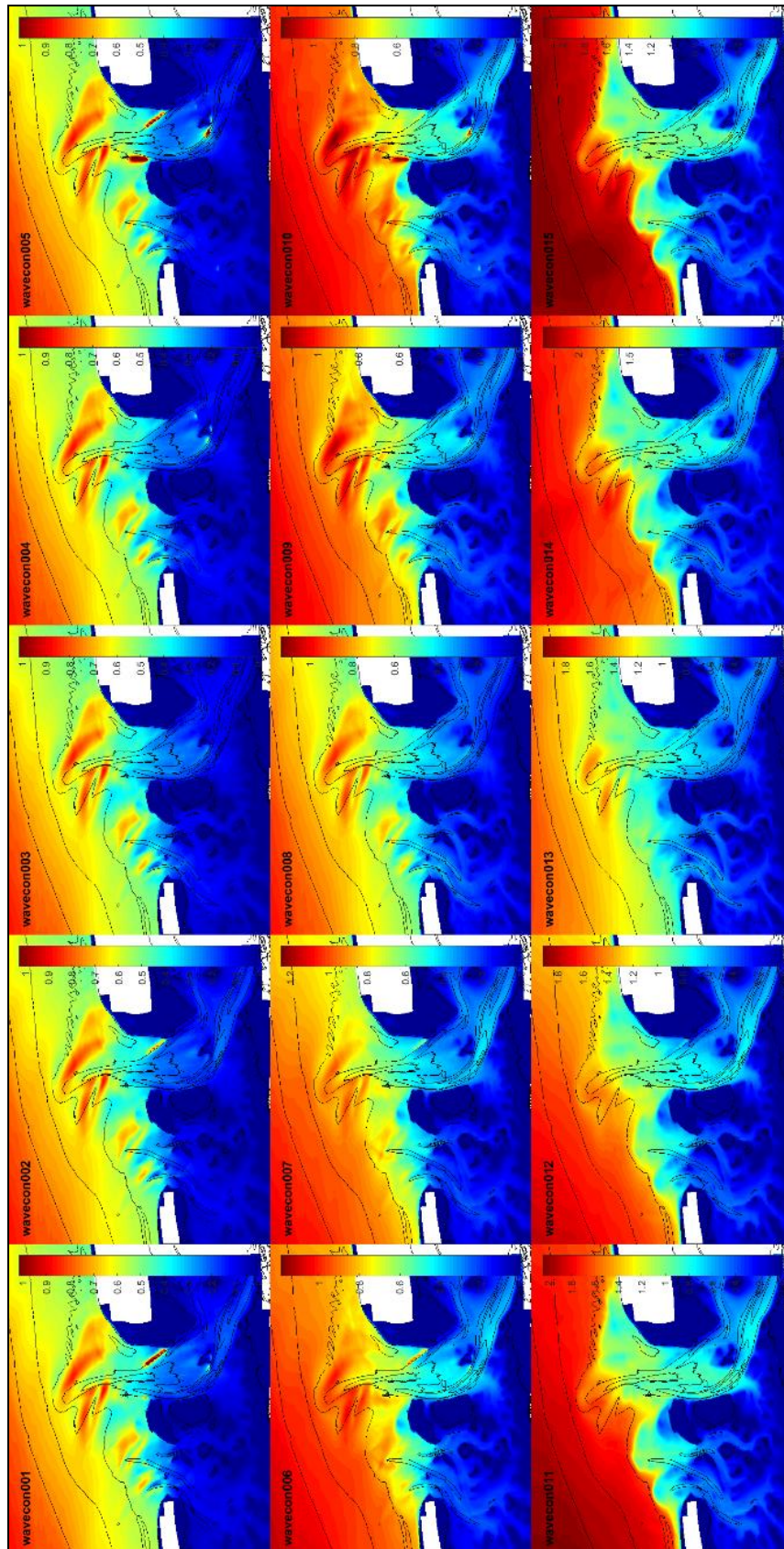


Figuur A.1 : Golfkarakteristieken gemeten door de Schiermonnikoog Noord boei in 2018

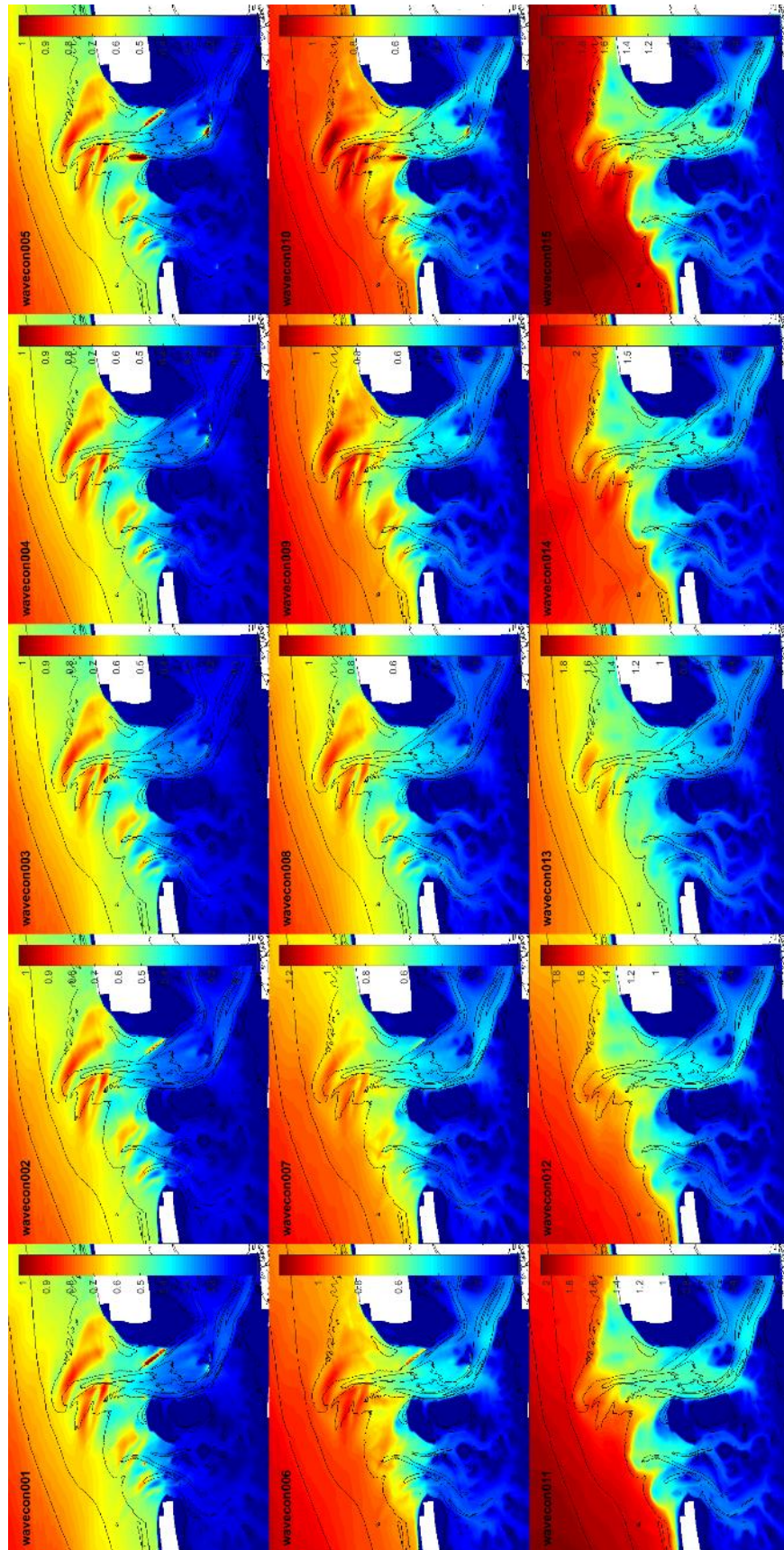


Figuur A.2 : Golfkarakteristieken gemeten door de Schiermonnikoog Noord boei in 2019

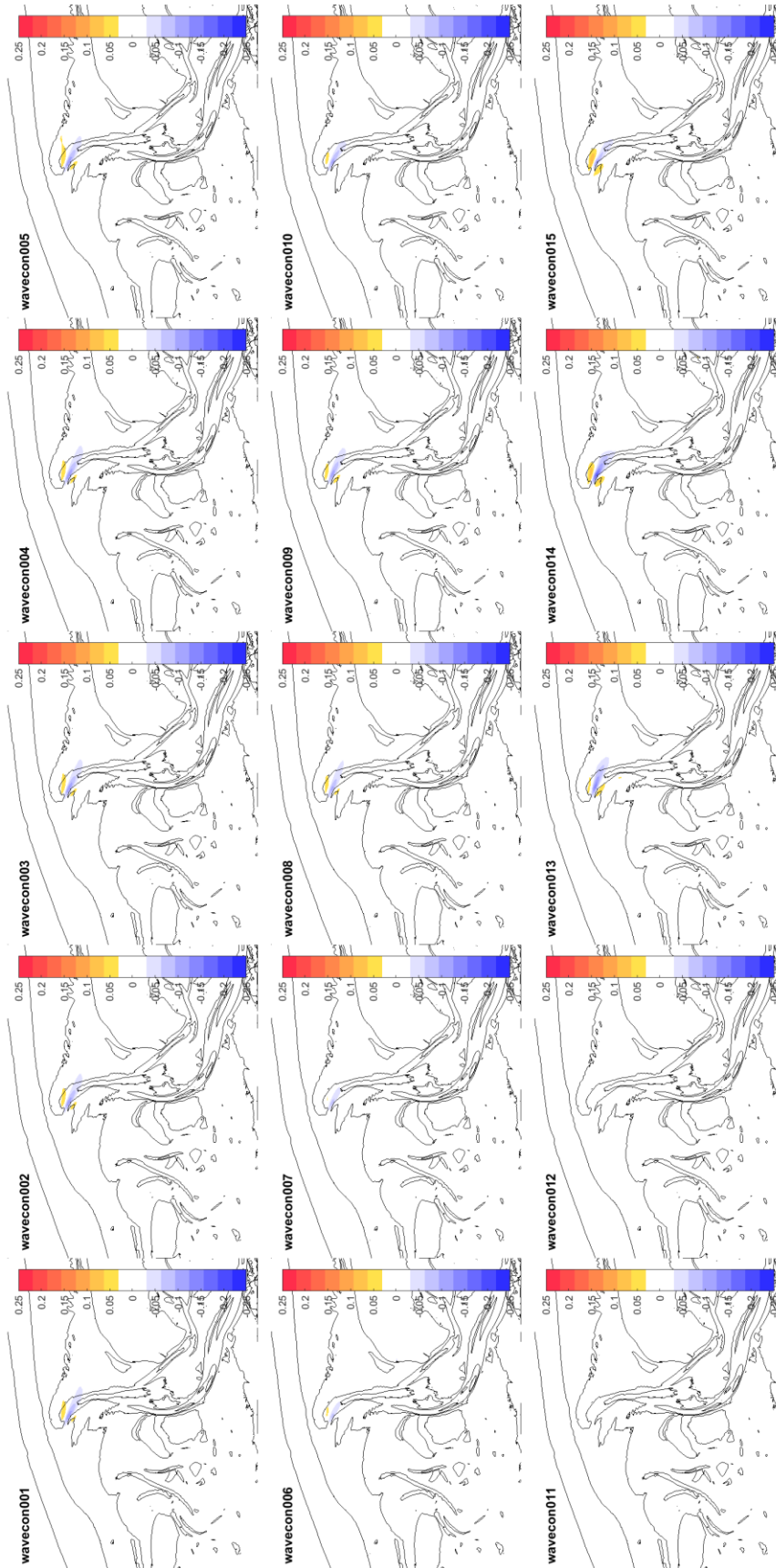
B SWAN modelresultaten



Figuur B.1 : Golfhoogtes voor de 15 gesimuleerde golfcondities voor de bodem vóór de verdieping; zie tabel 2.2 voor een overzicht.

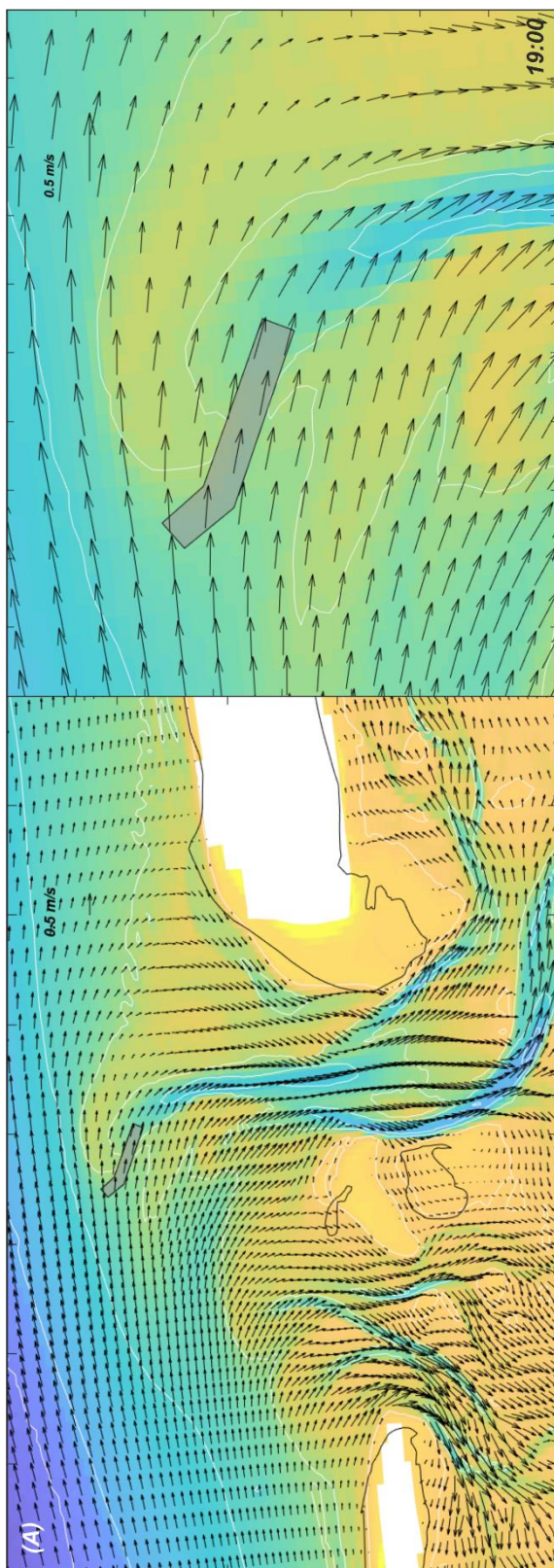


Figur B.2 : Golfhoogtes voor de 15 gesimuleerde golfcondities voor de bodem met kunstmatige verdieping

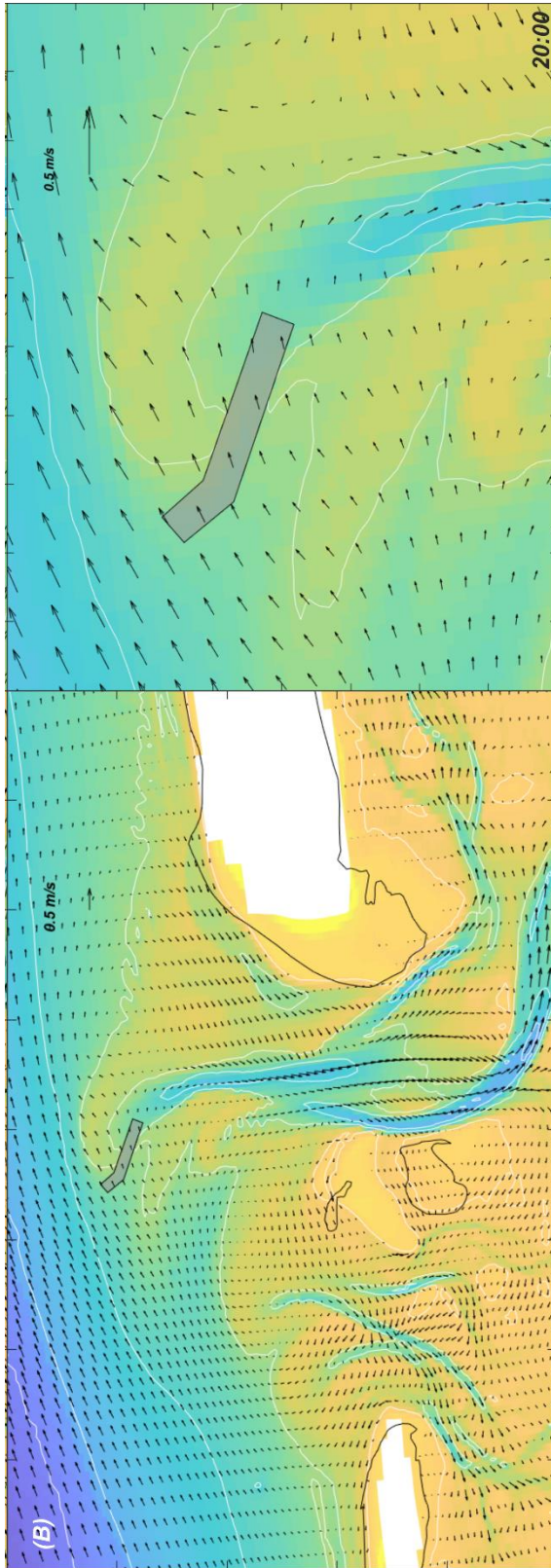


Figuur B.3 : Verschil in golfhoogte tussen de situatie zonder verdieping en met kunstmatige verdieping

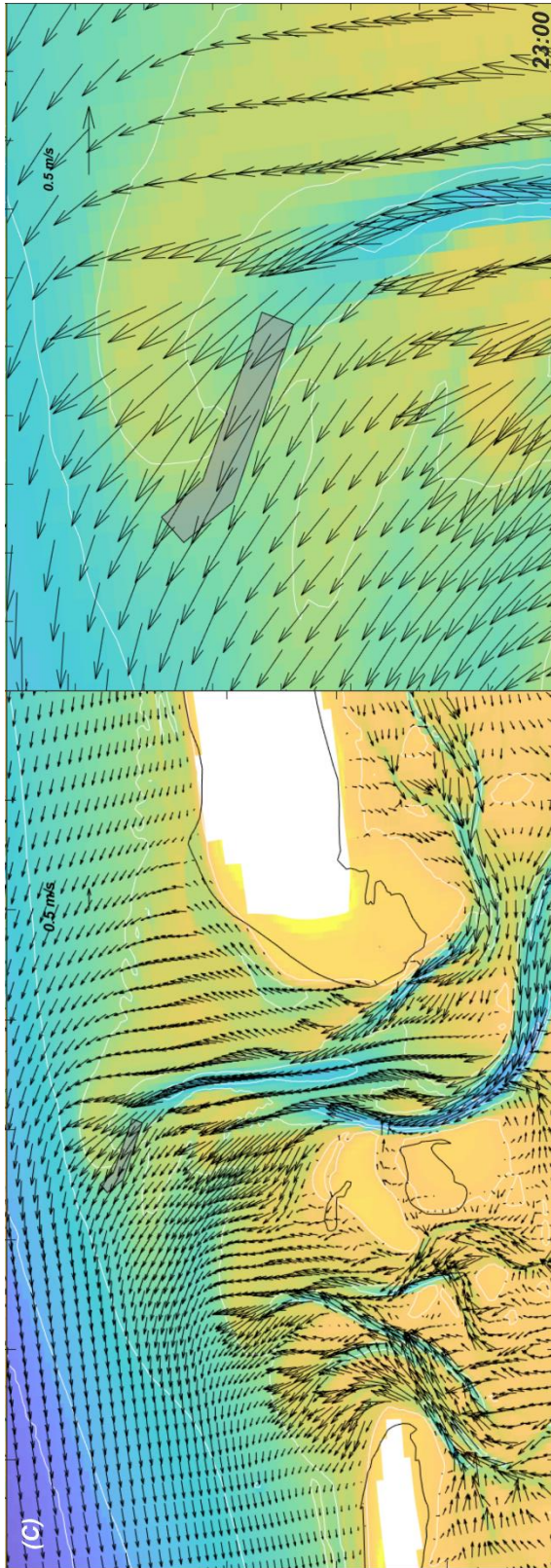
C Kaarten stromingen



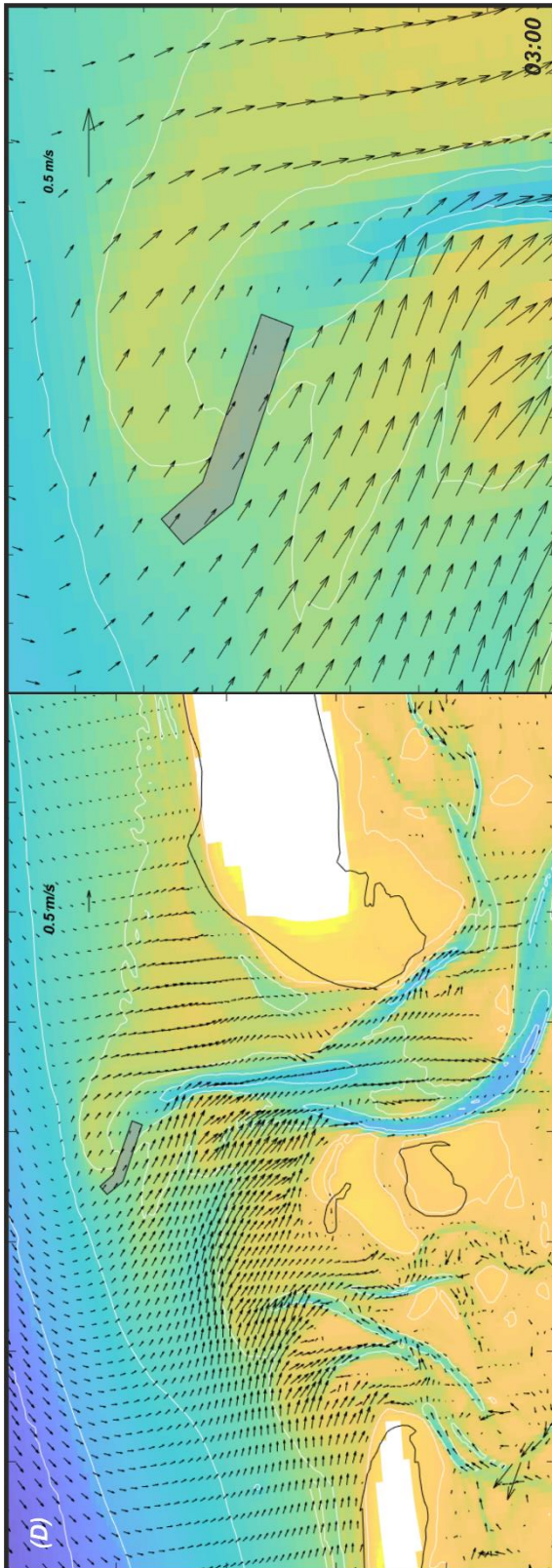
Figuur C.1 : Berekende getijstromingen voor de simulatie met gemeten bodem inclusief de verdieping (morf2) voor $t = 19:00$



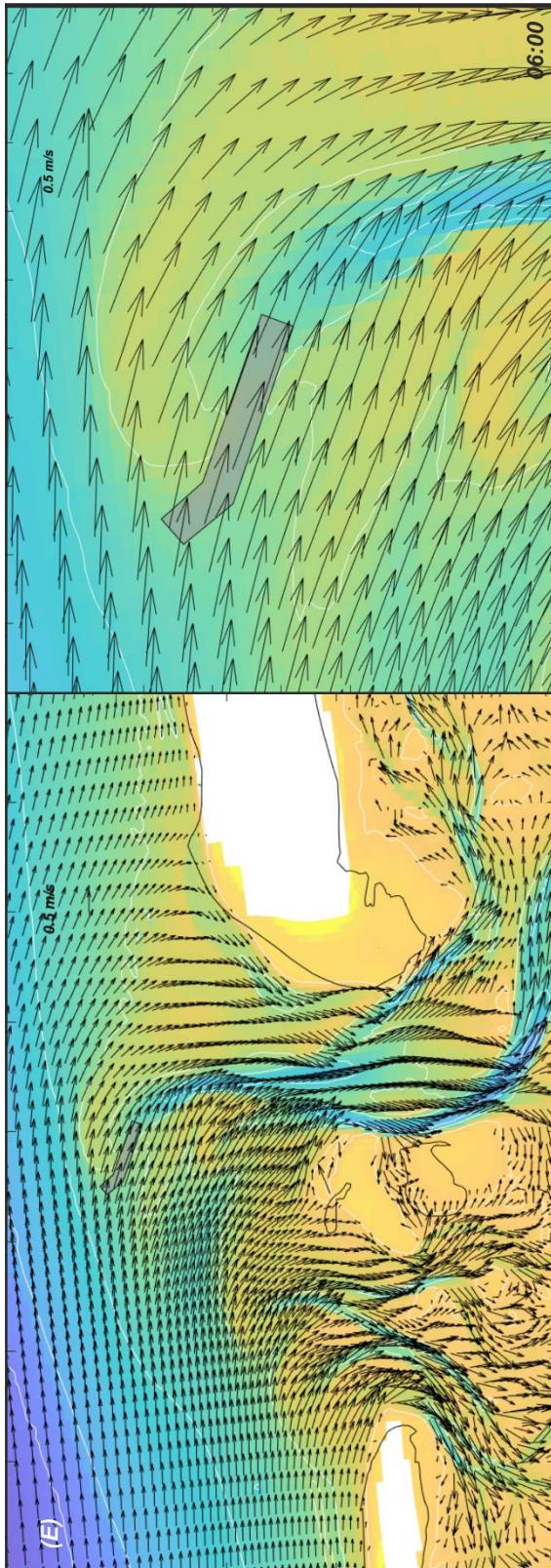
Figuur C 2 : Berekende getijstromingen voor de simulatie met gemeten bodem inclusief de verdieping (morf2) voor $t = 20:00$



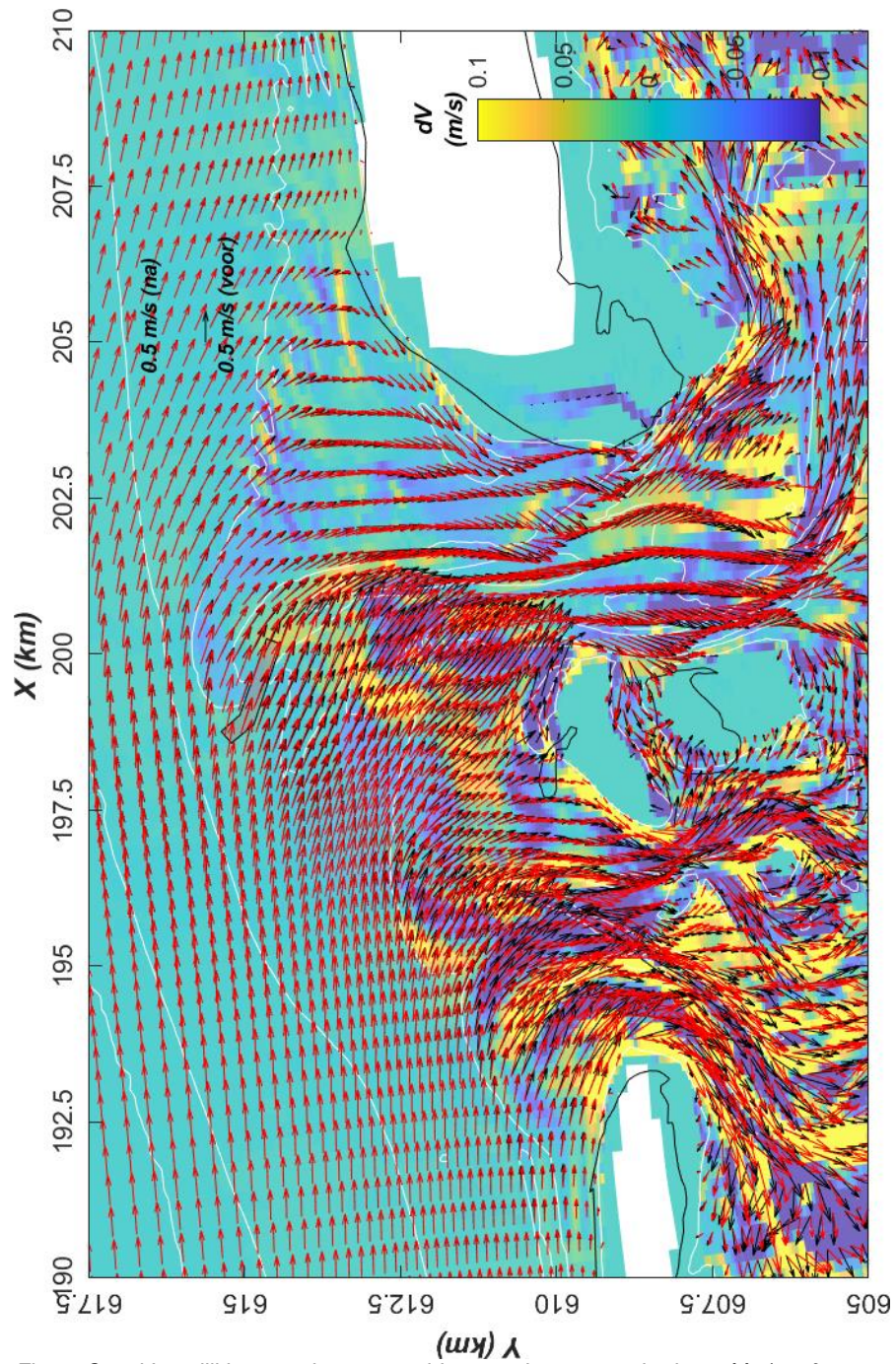
Figuur C.3 : Berekende getijstromingen voor de simulatie met gemeten bodem inclusief de verdieping (morf2) voor $t = 23:00$



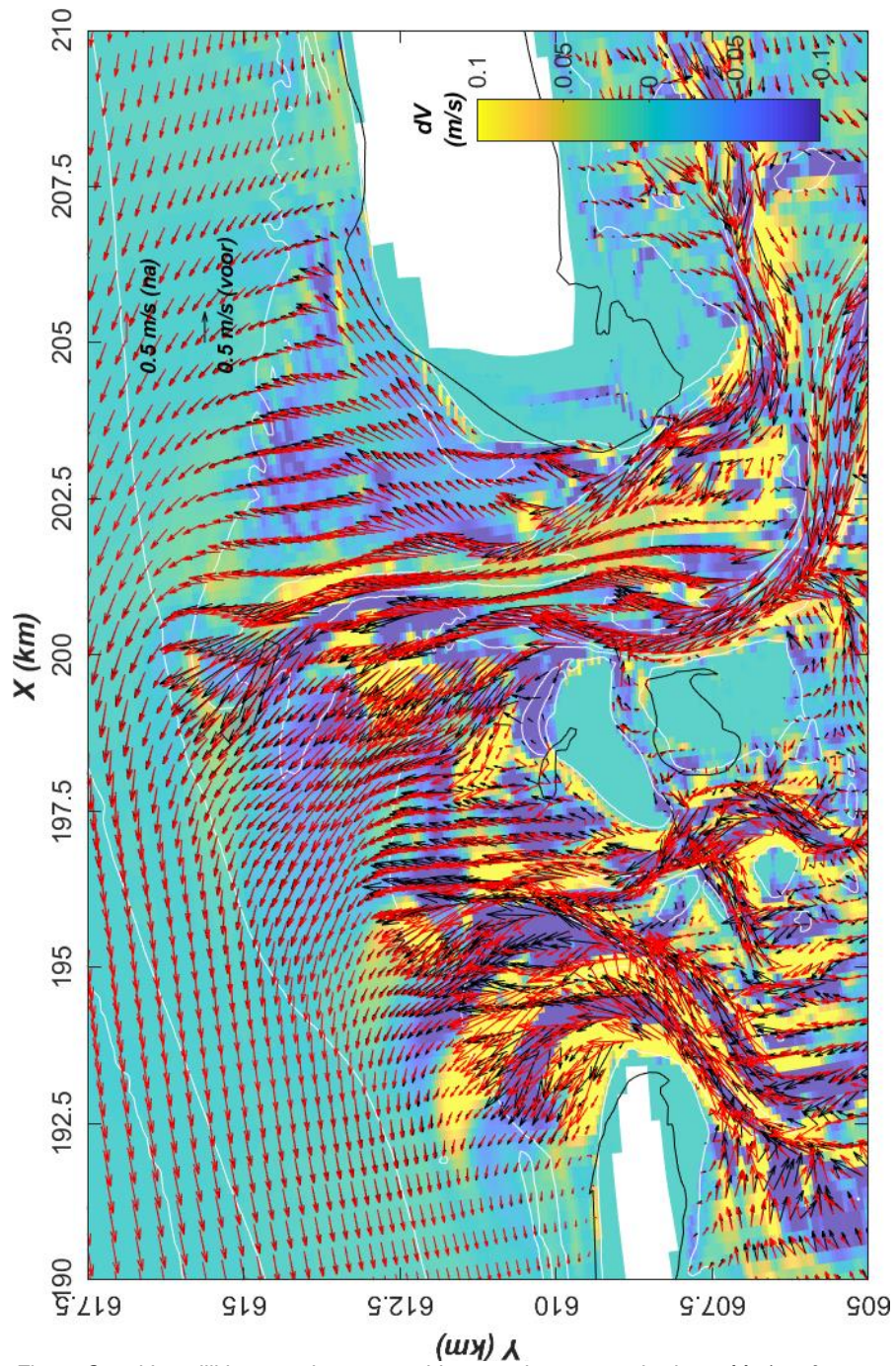
Figuur C.4 : Berekende getijstromingen voor de simulatie met gemeten bodem inclusief de verdieping (morf2) voor $t = 03:00$



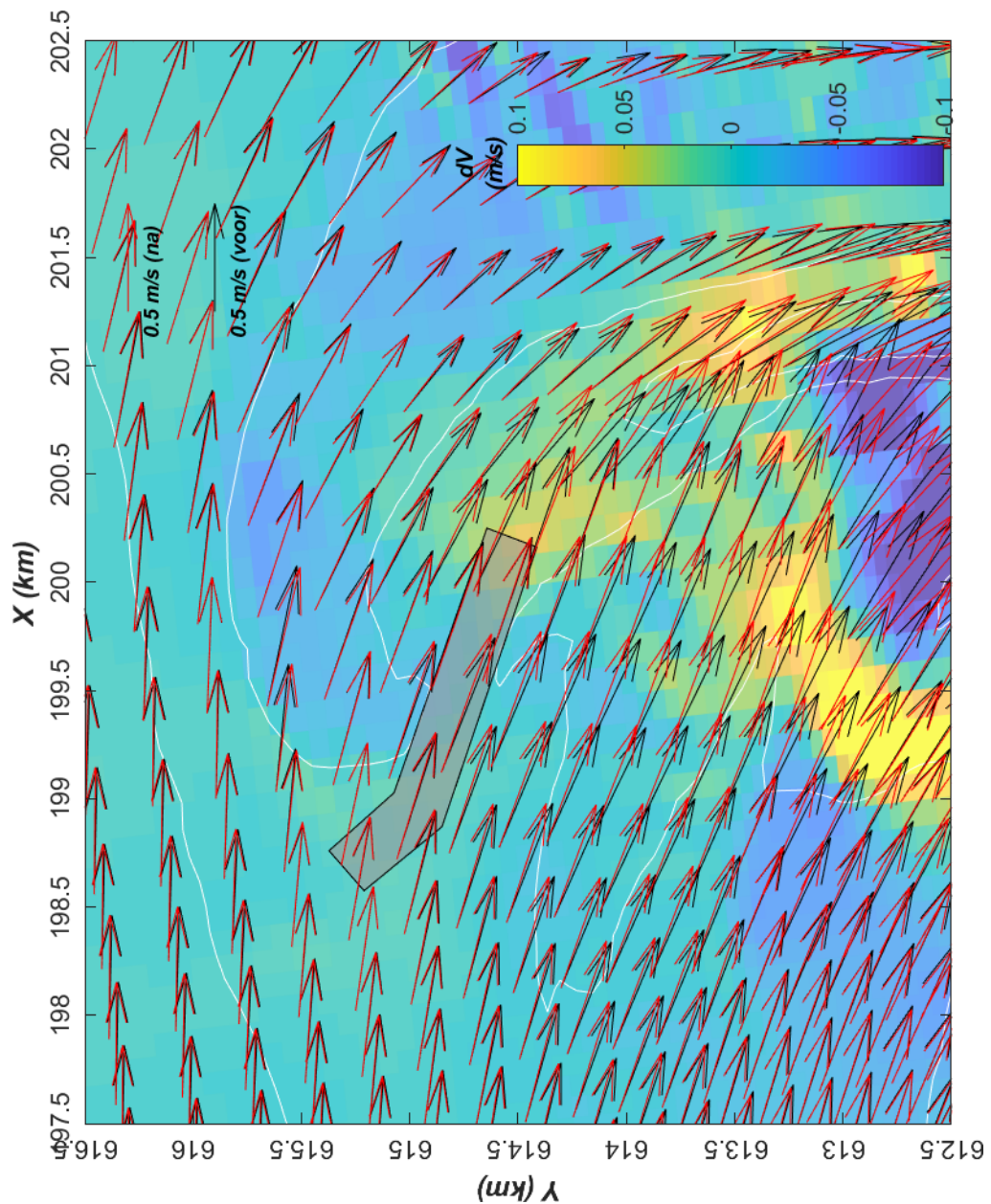
Figuur C.5 : Berekende getijstromingen voor de simulatie met gemeten bodem inclusief de verdieping (morf2) voor $t = 06:00$



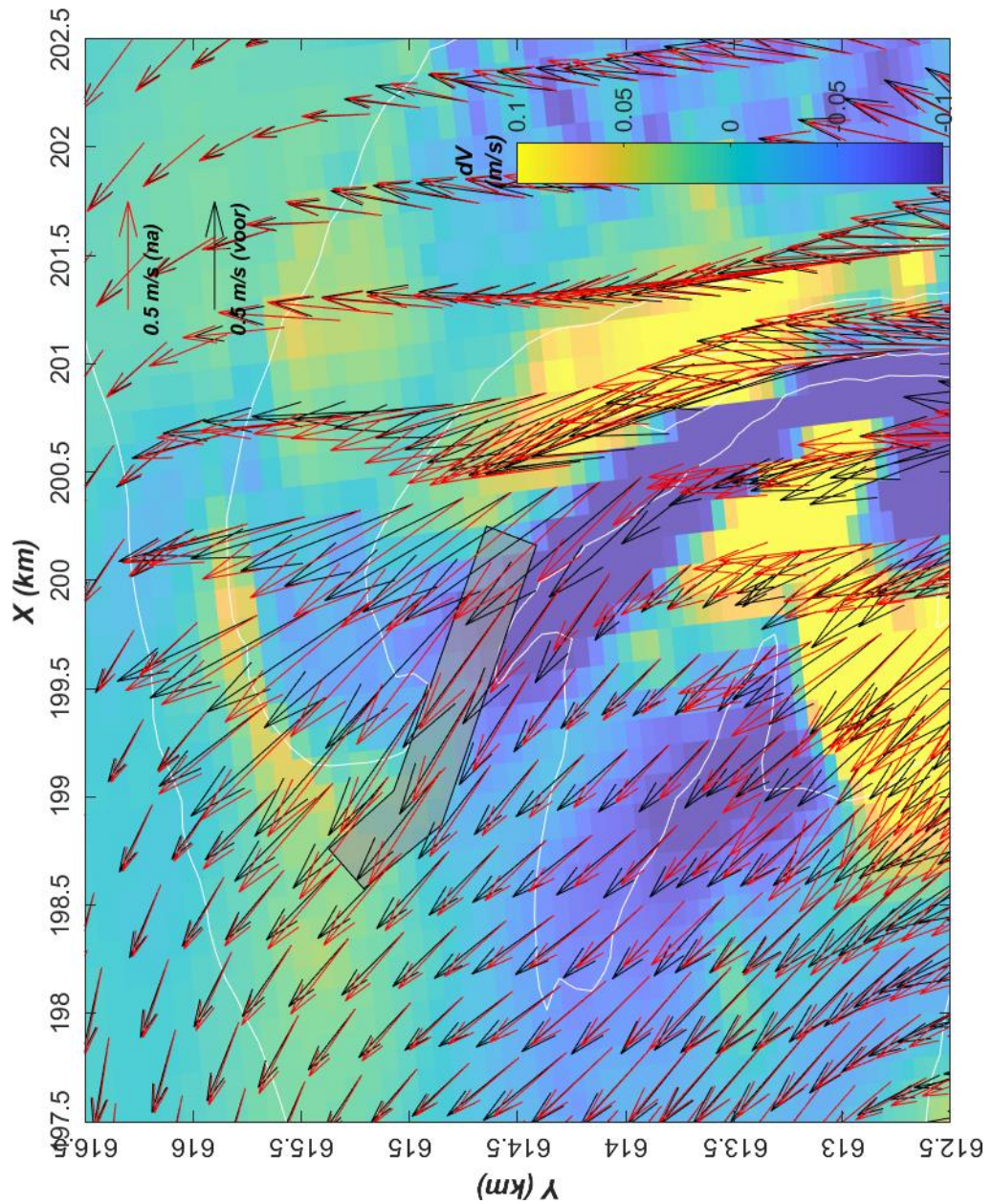
Figuur C.6 : Vergelijking van de stroomvelden van de gemeten bodem vóór (morf1, zwarte vectoren) en na verdieping (morf2, rode vectoren) voor maximale vloedstroming in het Westgat. Achtergrond kleur geeft het verschil in stromingsmagnitude aan.



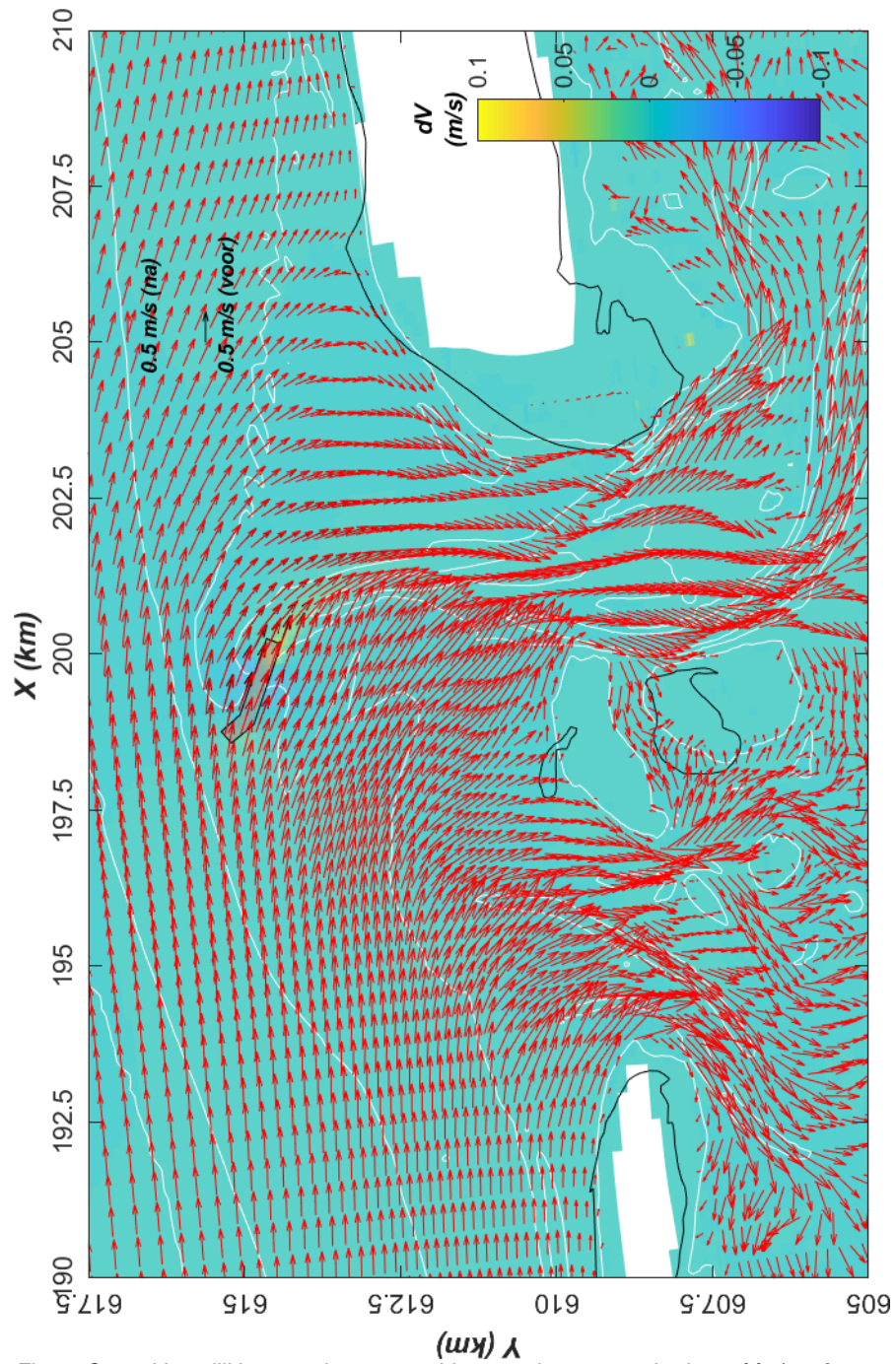
Figuur C.7 : Vergelijking van de stroomvelden van de gemeten bodem vóór (morf1, zwarte vectoren) en na verdieping (morf2, rode vectoren) voor maximale ebstroming in het Westgat. Achtergrond kleur geeft het verschil in stromingsmagnitude aan.



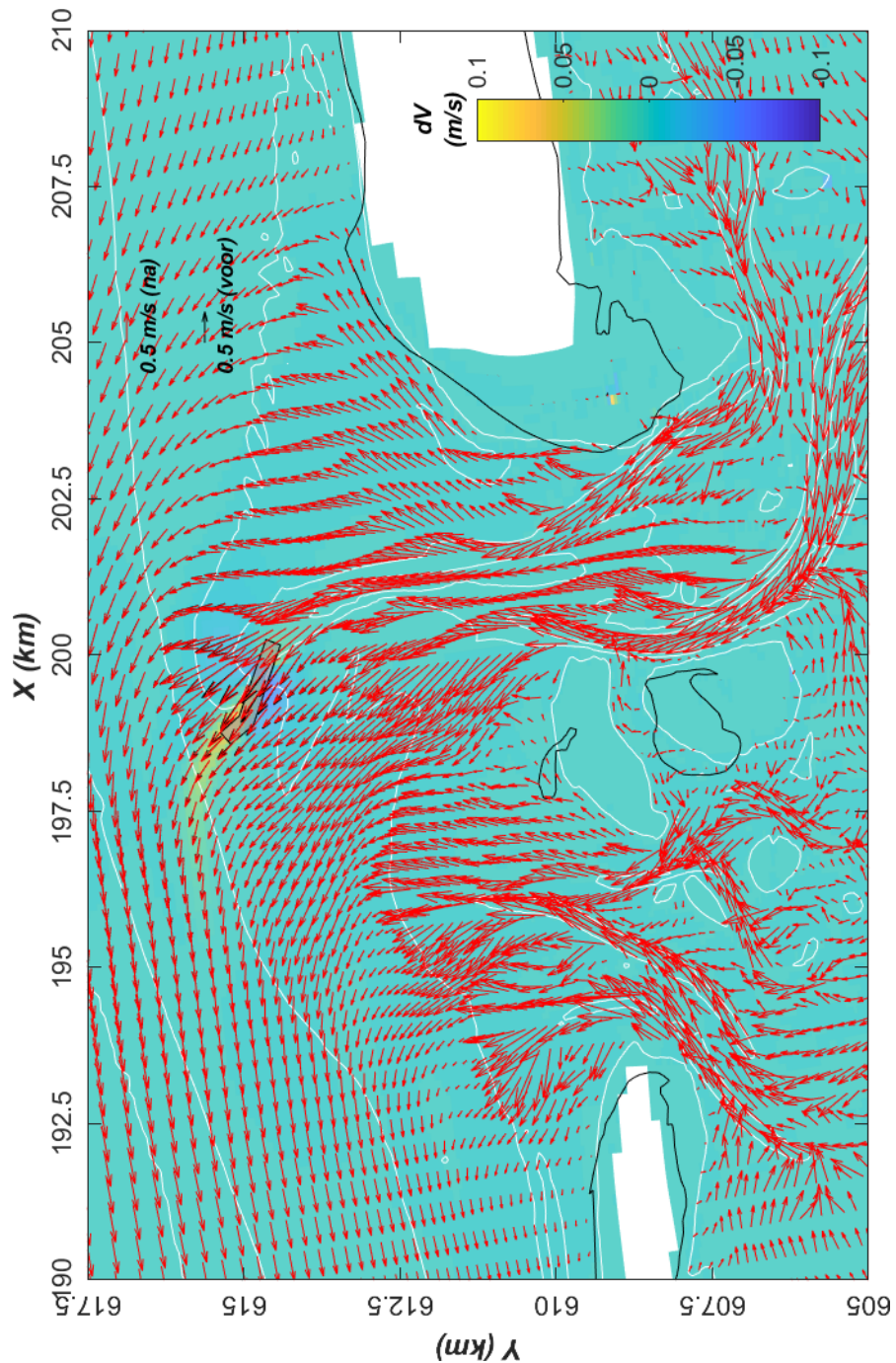
Figuur C.8 : Vergelijking van de stroomvelden van de gemeten bodem vóór (morf1, zwarte vectoren) en na verdieping (morf2, rode vectoren) voor maximale vloedstroming in het Westgat (detailkaart). Achtergrond kleur geeft het verschil in stromingsmagnitude aan.



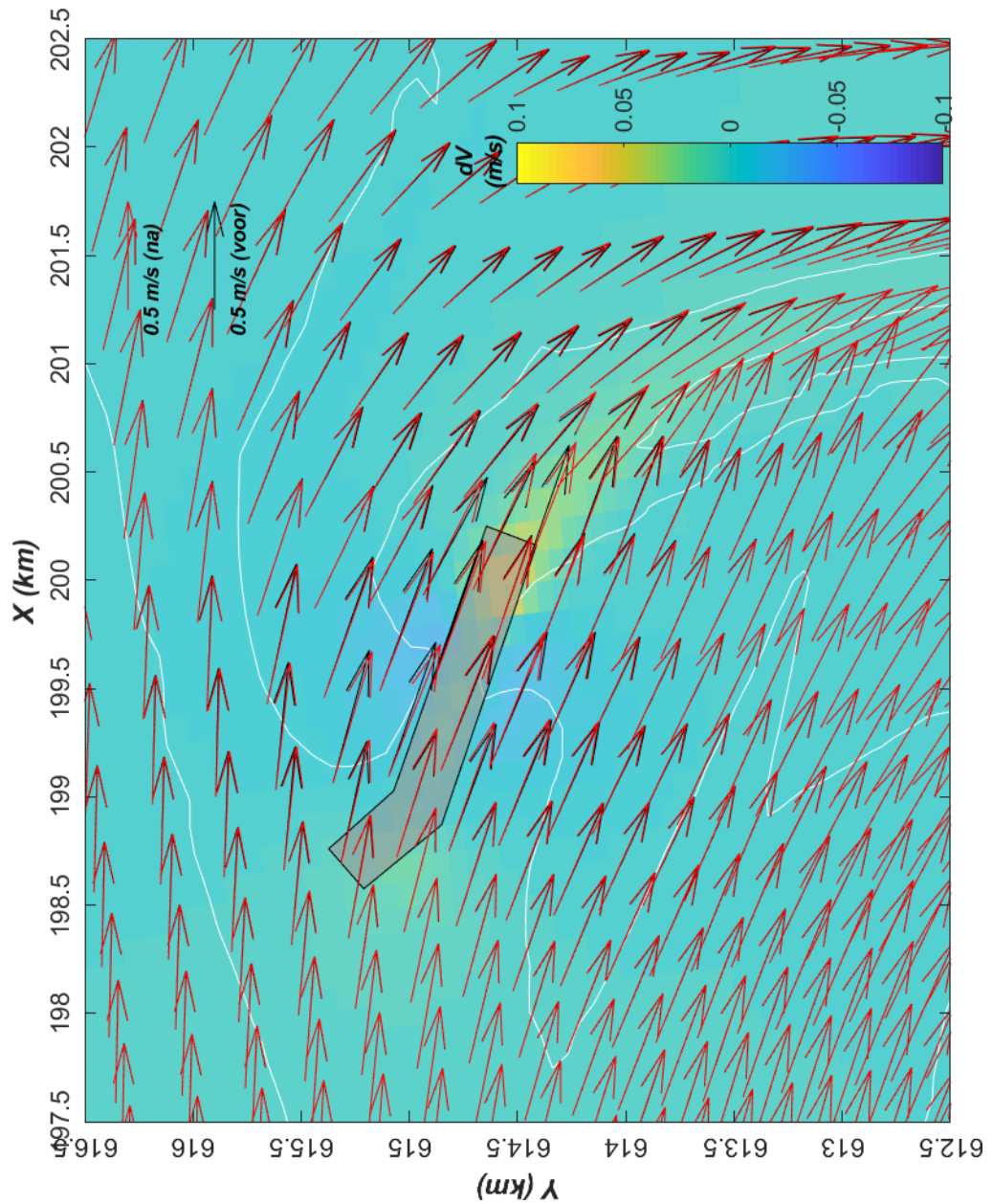
Figuur C.9 : Vergelijking van de stroomvelden van de gemeten bodem vóór (morf1, zwarte vectoren) en na verdieping (morf2, rode vectoren) voor maximale ebstroming in het Westgat (detailkaart). Achtergrond kleur geeft het verschil in stromingsmagnitudo aan.



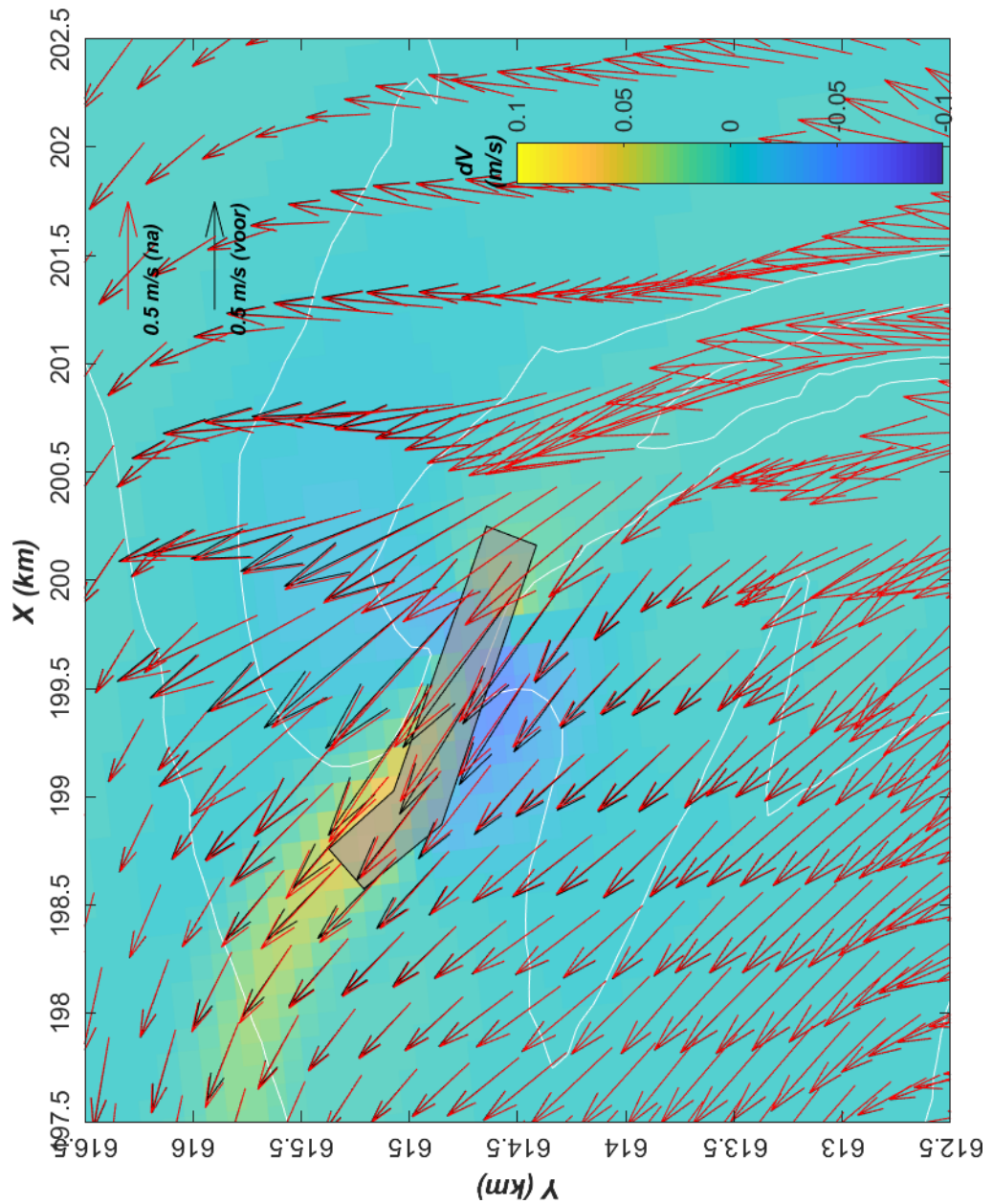
Figuur C.10 : Vergelijking van de stroomvelden van de gemeten bodem vóór (morf1, zwarte vectoren) en bodem inclusief de kunstmatige verdieping (morf3, rode vectoren) voor maximale vloedstroming in het Westgat. Achtergrond kleur geeft het verschil in stromingsmagnitude aan.



Figuur C.11 : Vergelijking van de stroomvelden van de gemeten bodem vóór (morf1, zwarte vectoren) en bodem inclusief de kunstmatige verdieping (morf3, rode vectoren) voor maximale ebstroming in het Westgat. Achtergrond kleur geeft het verschil in stromingsmagnitude aan.

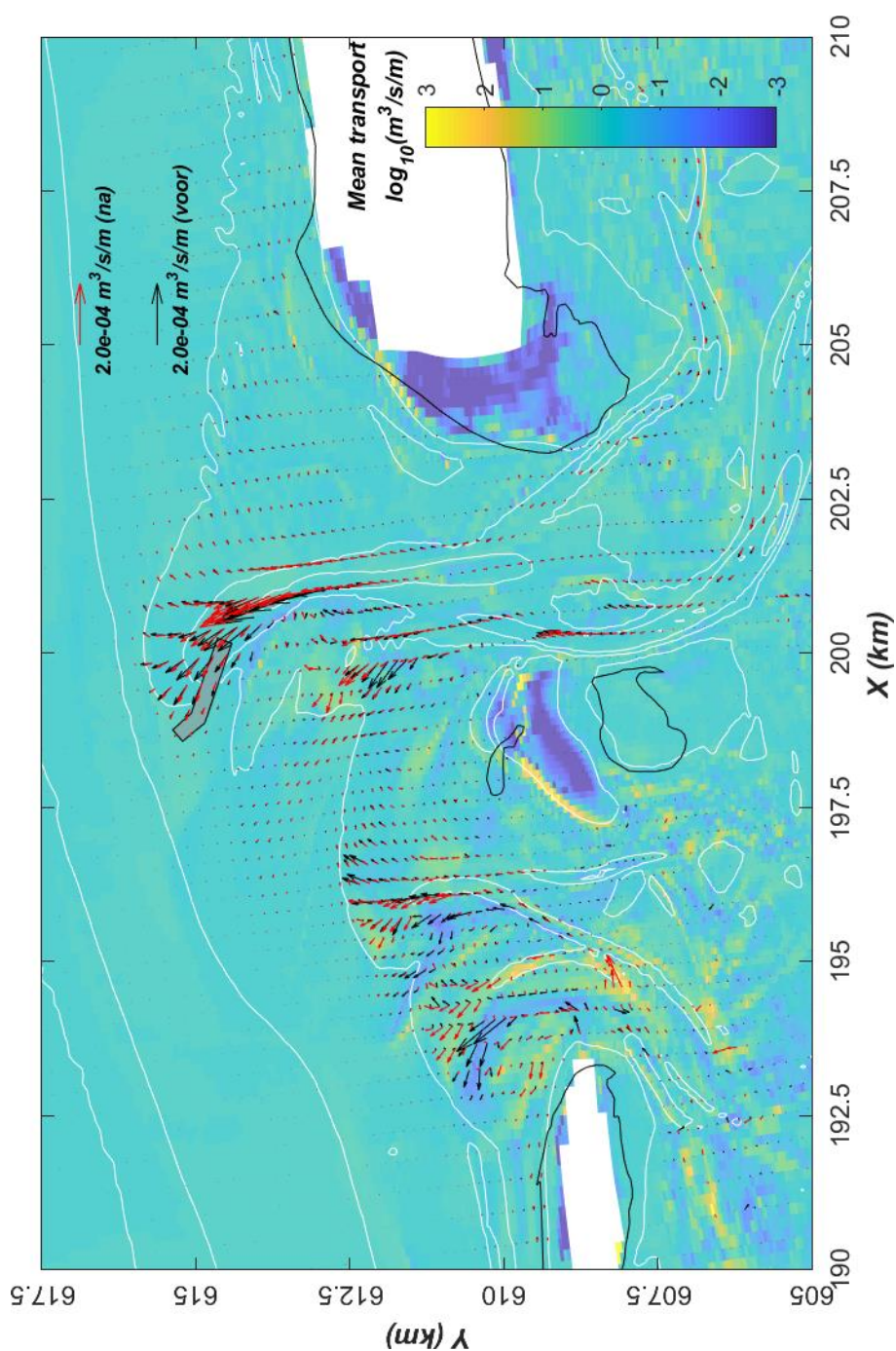


Figuur C.12 : Vergelijking van de stroomvelden van de gemeten bodem vóór (morf1, zwarte vectoren) en bodem inclusief de kunstmatige verdieping (morf3, rode vectoren) voor maximale vloedstroming in het Westgat (detailkaart). Achtergrond kleur geeft het verschil in stromingsmagnitude aan.

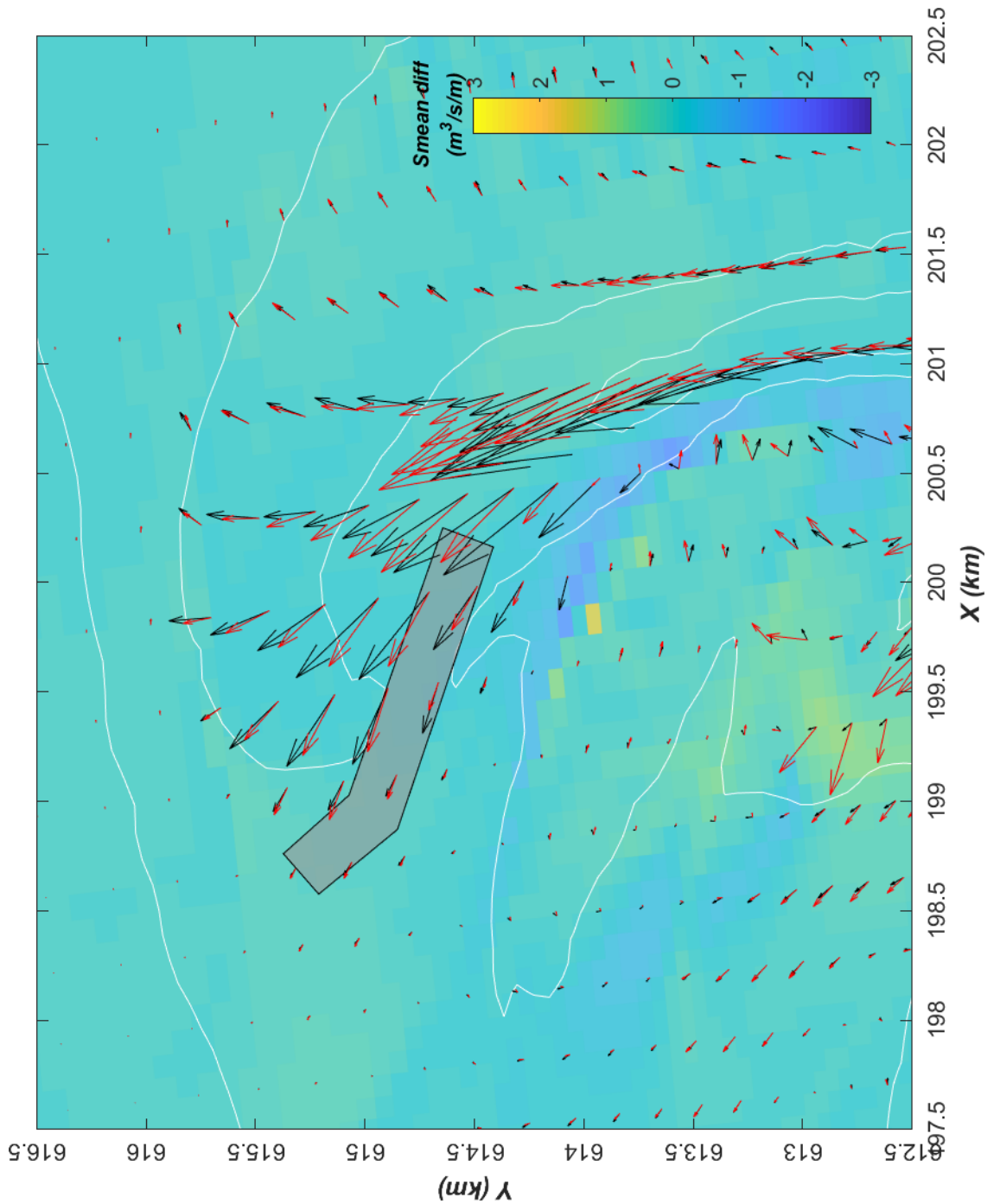


Figuur C.13 : Vergelijking van de stroomvelden van de gemeten bodem vóór (morf1, zwarte vectoren) en bodem inclusief de kunstmatige verdieping (morf3, rode vectoren) voor maximale ebstroming in het Westgat (detailkaart). Achtergrond kleur geeft het verschil in stromingsmagnitude aan.

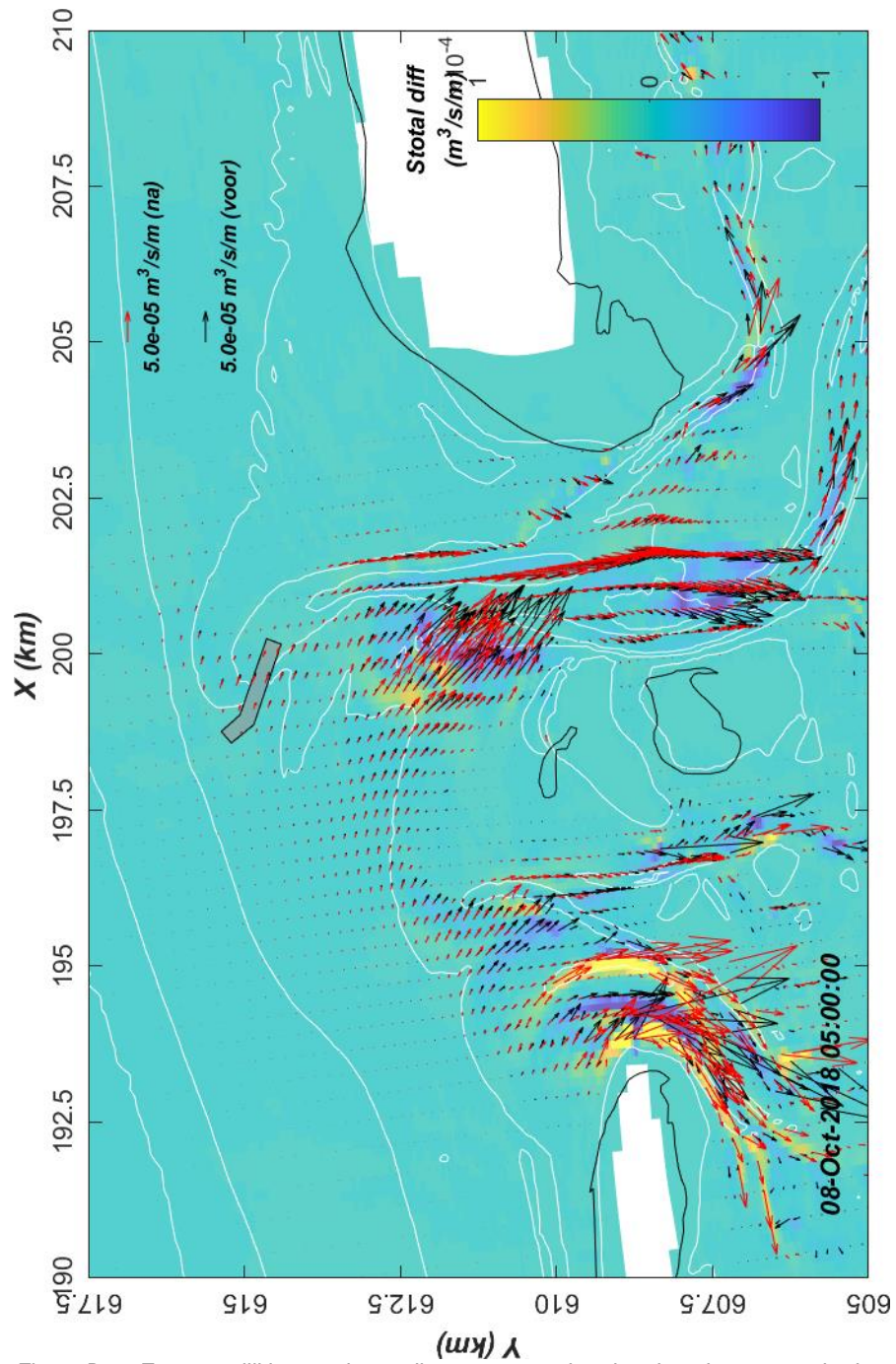
D Kaarten sedimenttransporten



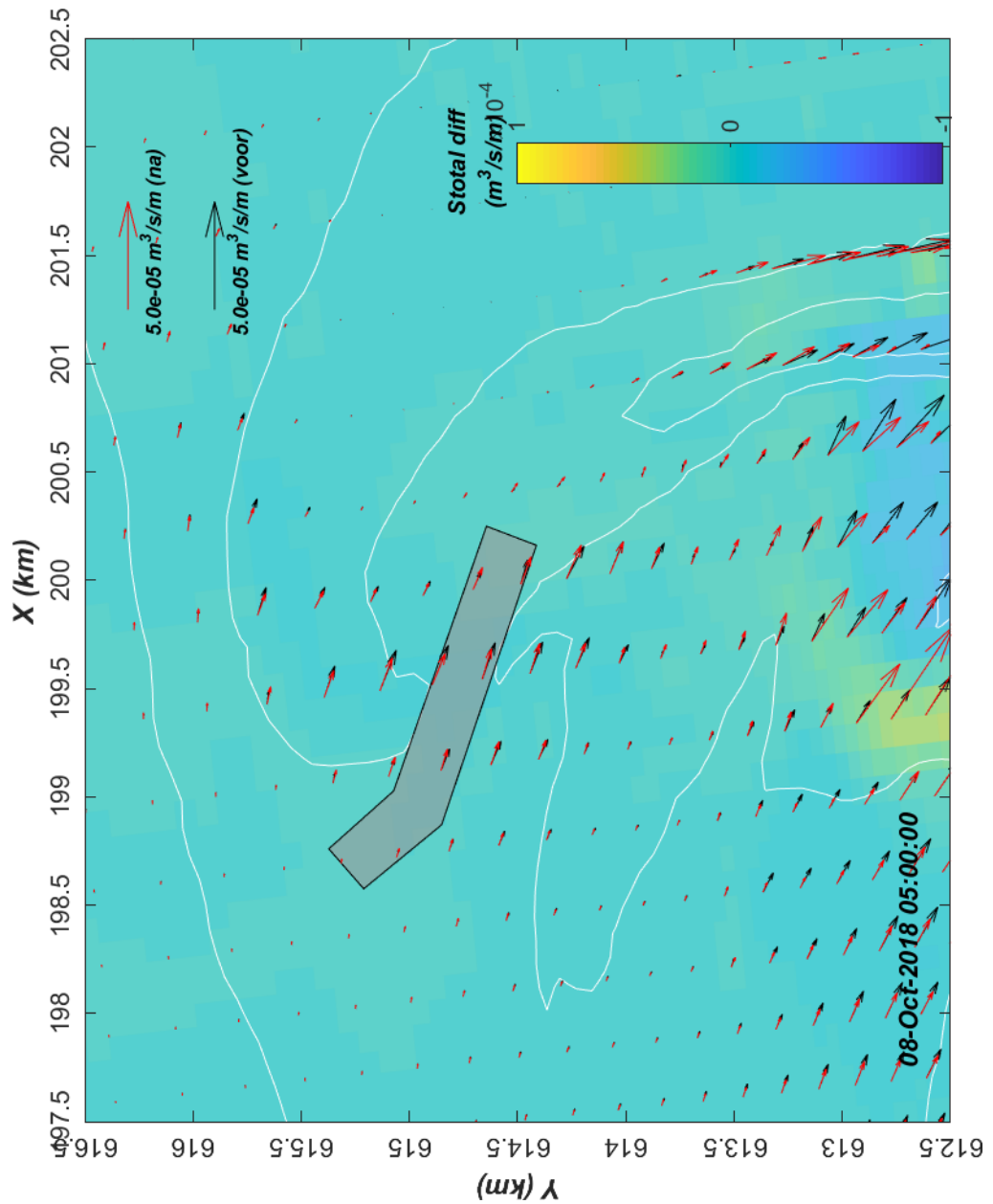
Figuur D.1 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en gemeten bodem na verdieping (rode vectoren, morf2) voor het jaarlijks gemiddelde transport. De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.



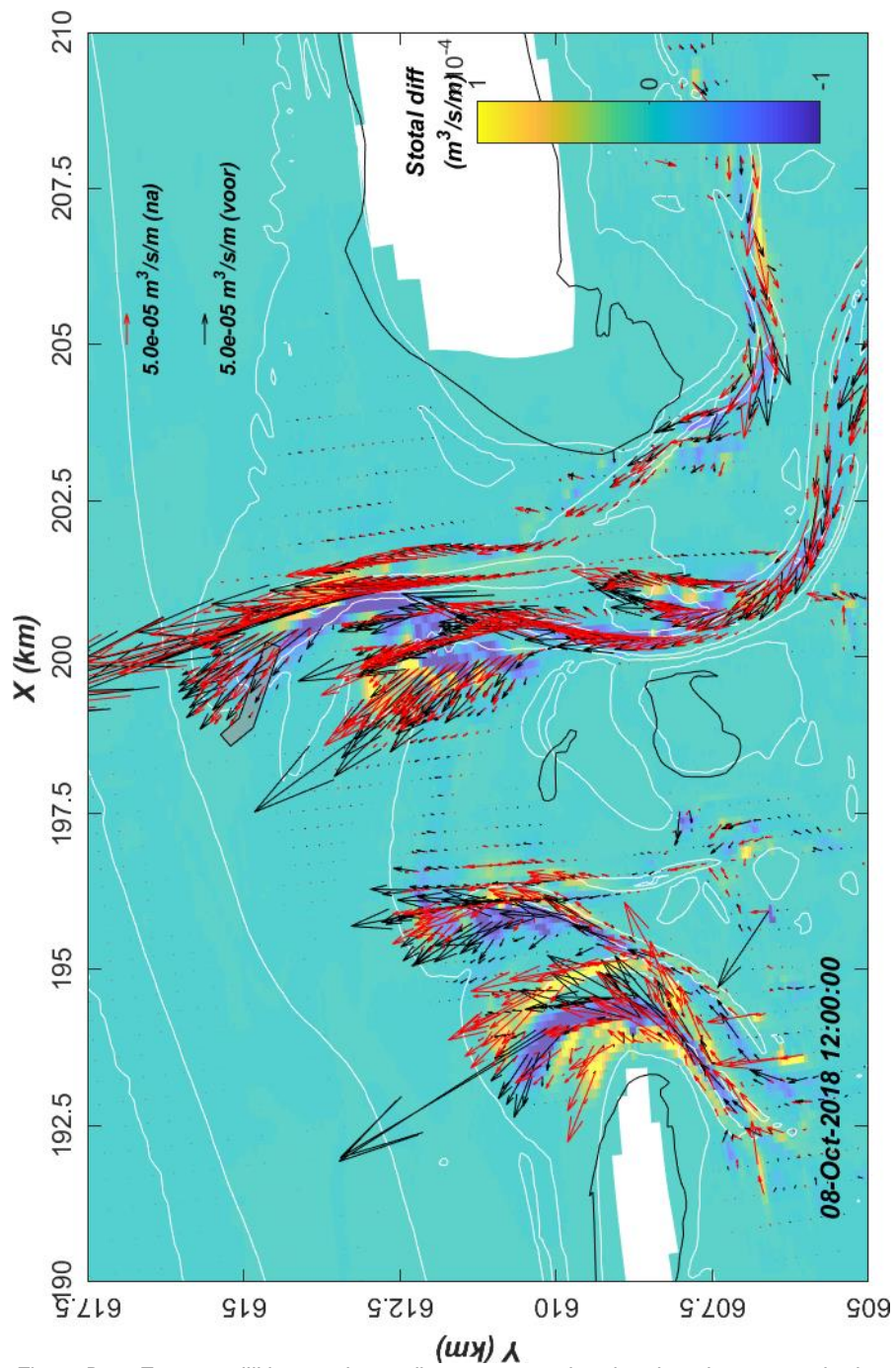
Figuur D.2 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en gemeten bodem na verdieping (rode vectoren, morf2) voor het jaarlijks gemiddelde transport (detailkaart). De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.



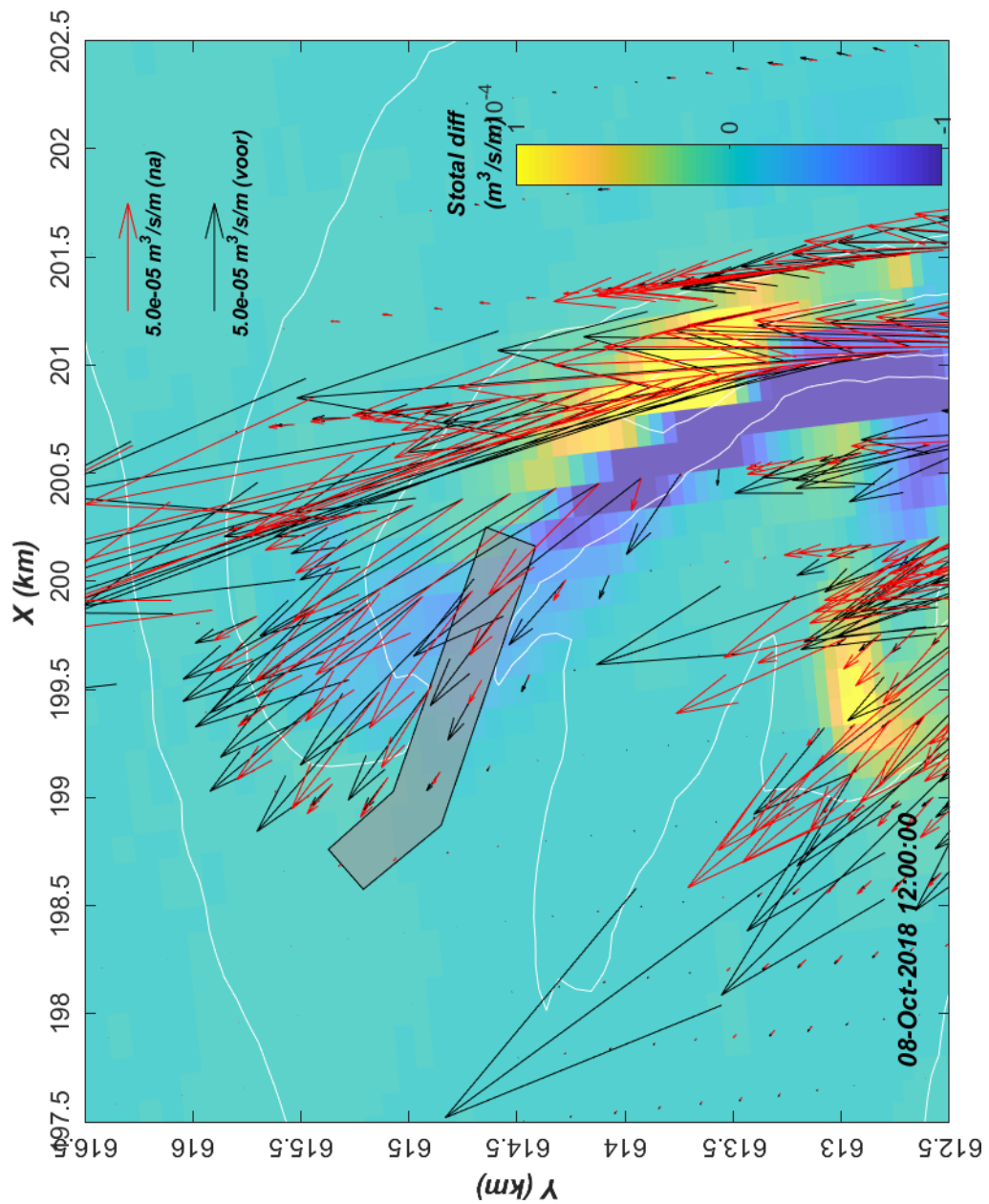
Figuur D.3 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en gemeten bodem na verdieping (rode vectoren, morf2) voor transporten tijdens maximale vloed. De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.



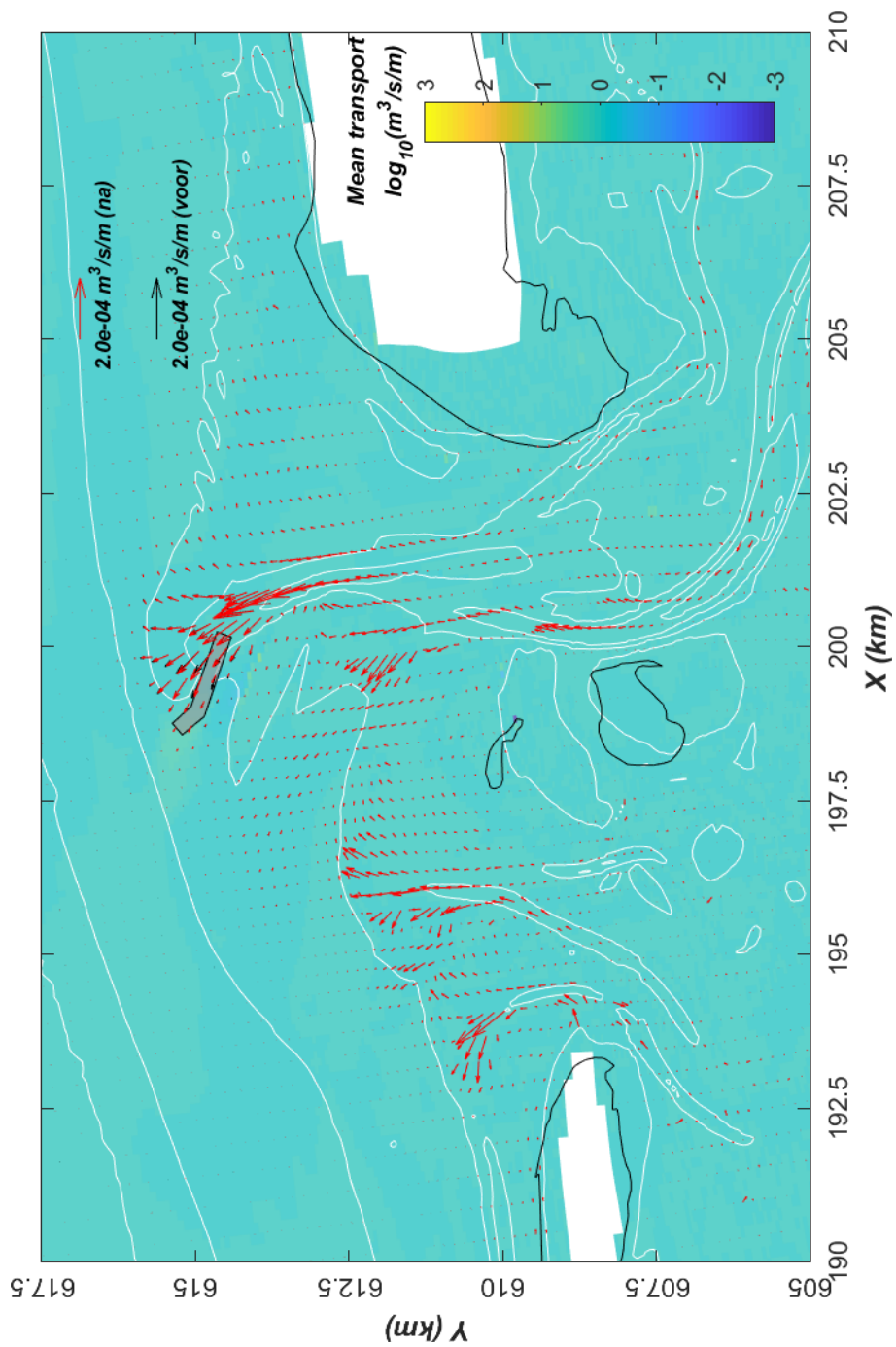
Figuur D.4 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en gemeten bodem na verdieping (rode vectoren, morf2) voor transporten tijdens maximale vloed (detailkaart). De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.



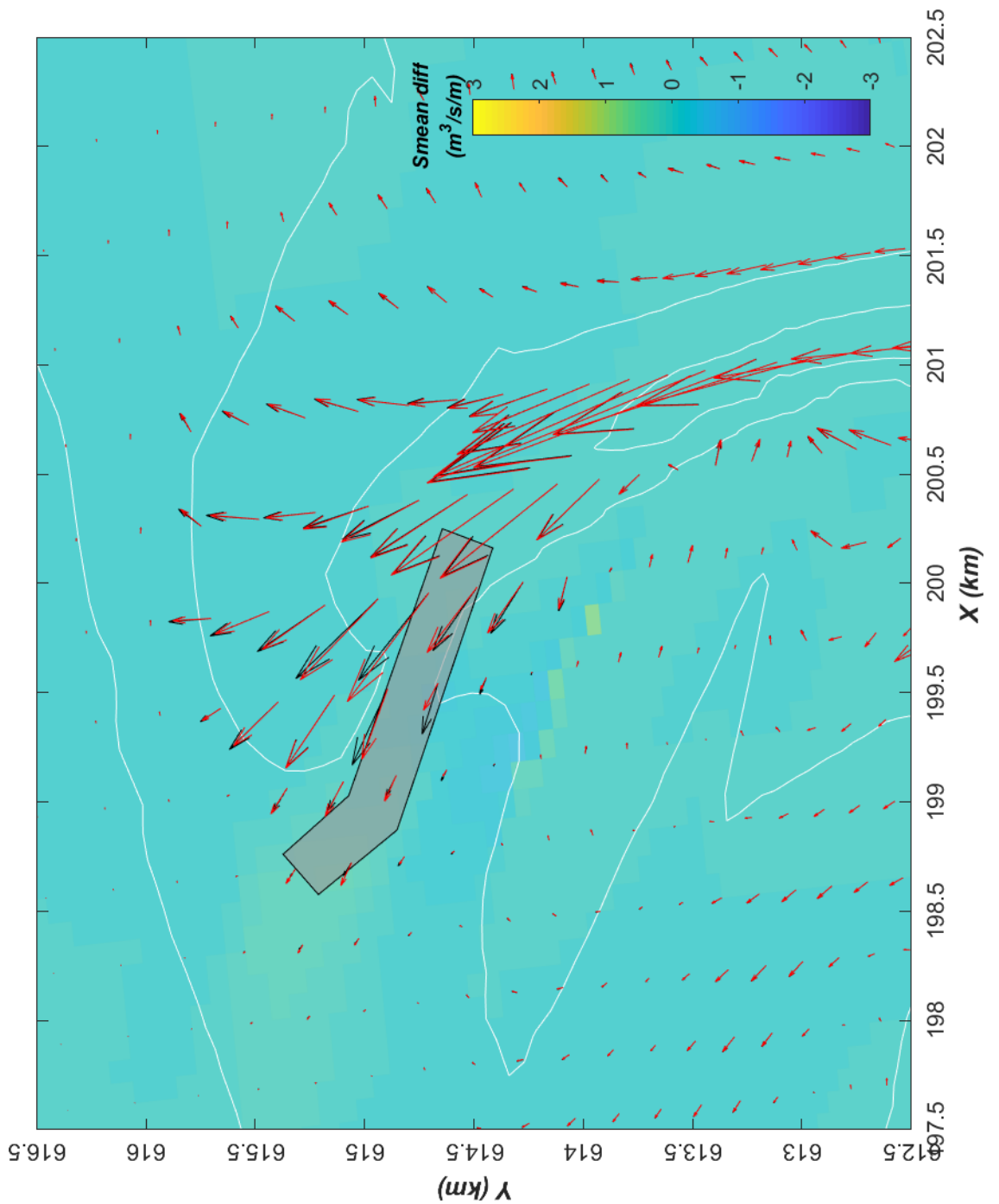
Figuur D.5 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en gemeten bodem na verdieping (rode vectoren, morf2) voor transporten tijdens maximale eb. De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.



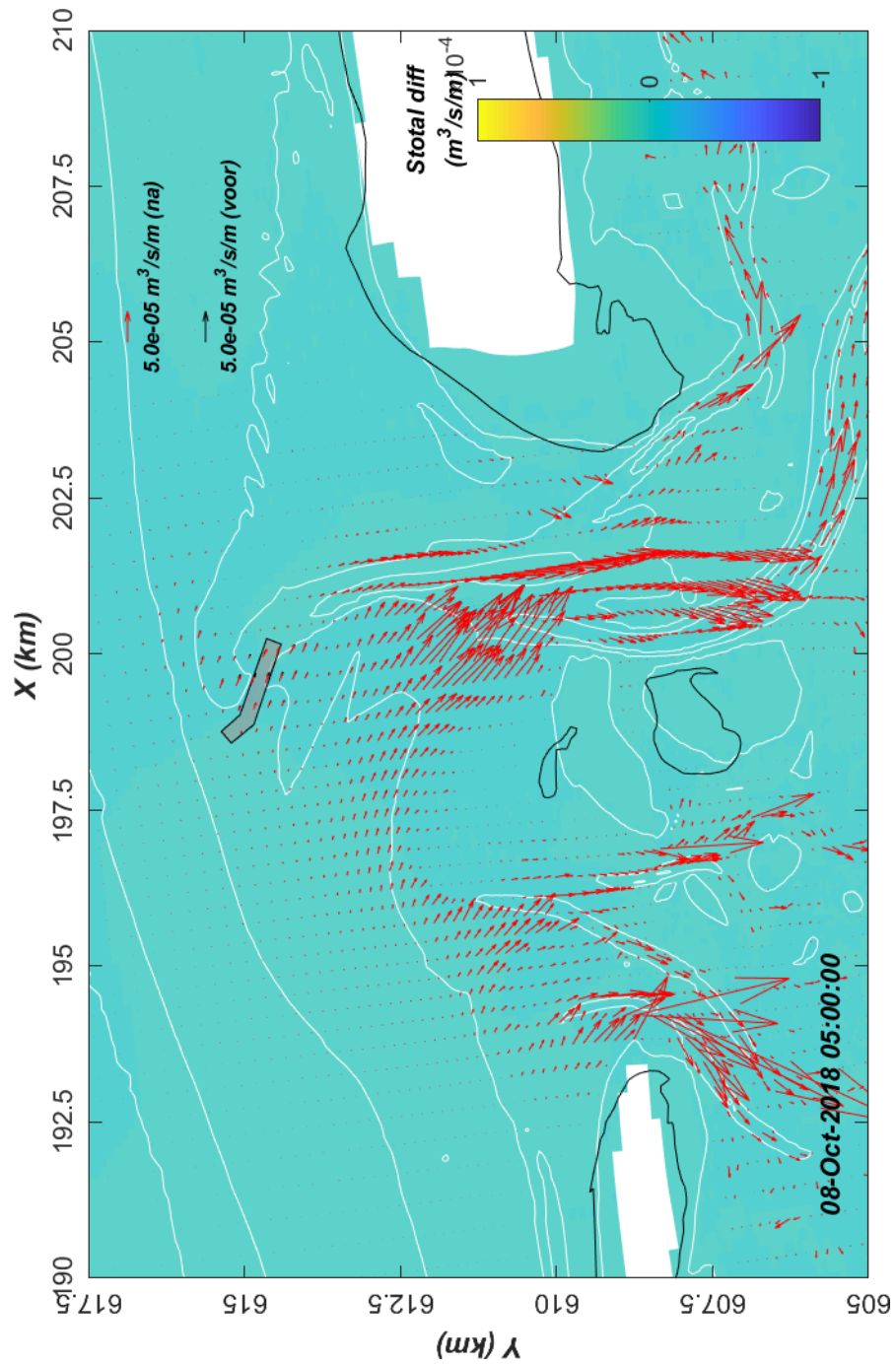
Figuur D.6 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en gemeten bodem na verdieping (rode vectoren, morf2) voor transporten tijdens maximale eb (detailkaart). De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.



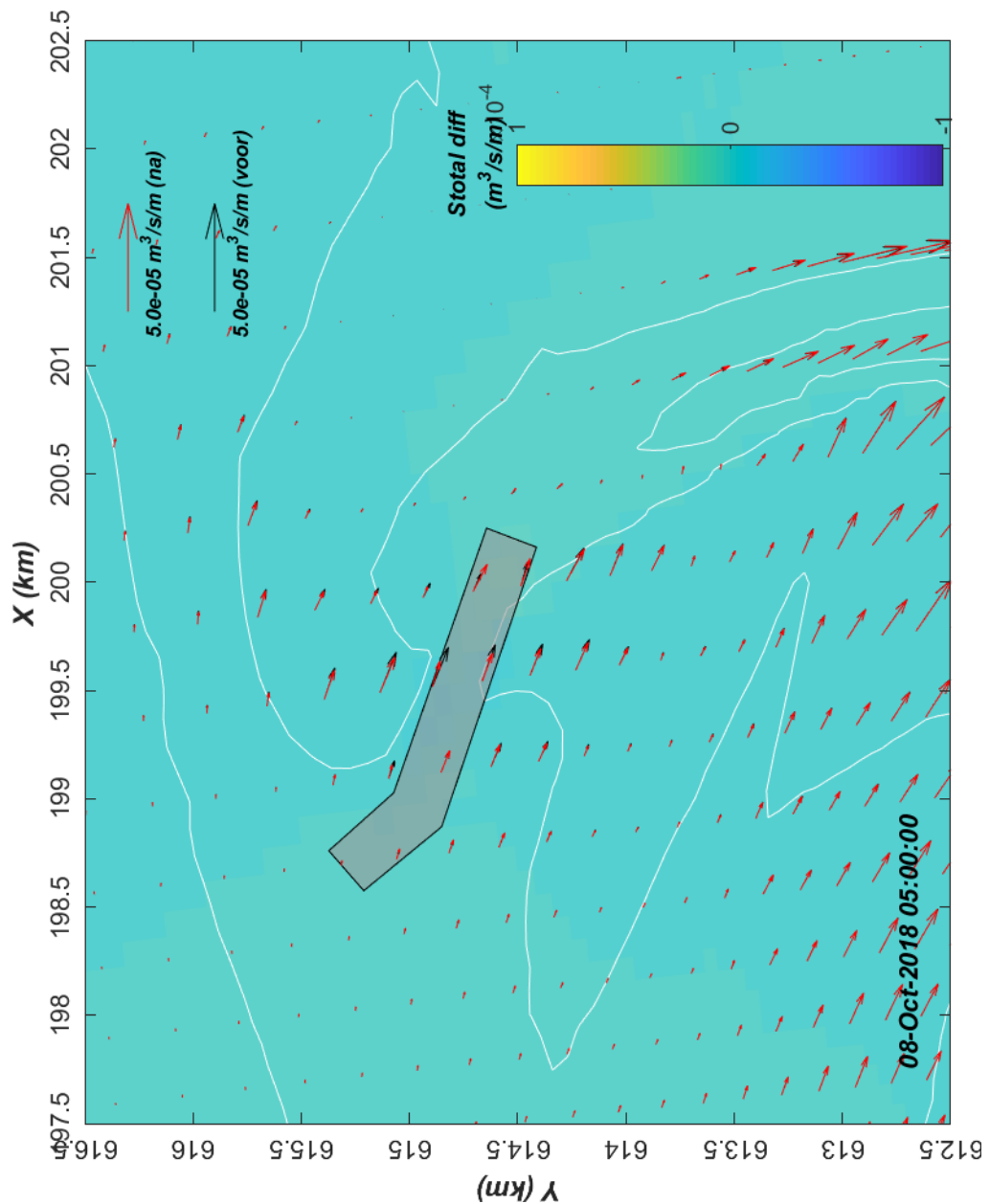
Figuur D.7 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en bodem met kunstmatige verdieping (rode vectoren, morf3) voor het jaarlijks gemiddelde transport. De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.



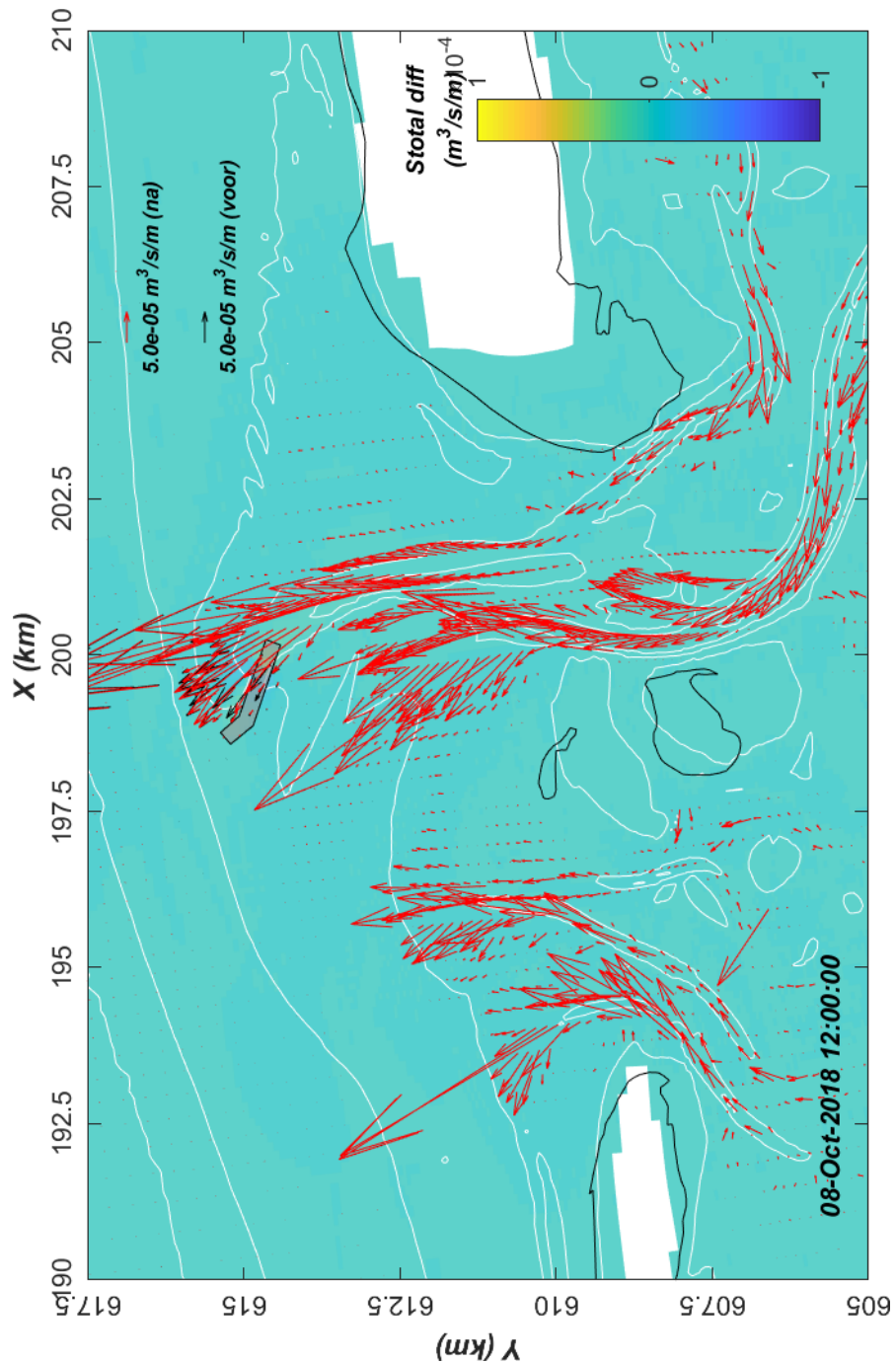
Figuur D.8 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en bodem met kunstmatige verdieping (rode vectoren, morf3) voor het jaarlijks gemiddelde transport (detailkaart). De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.



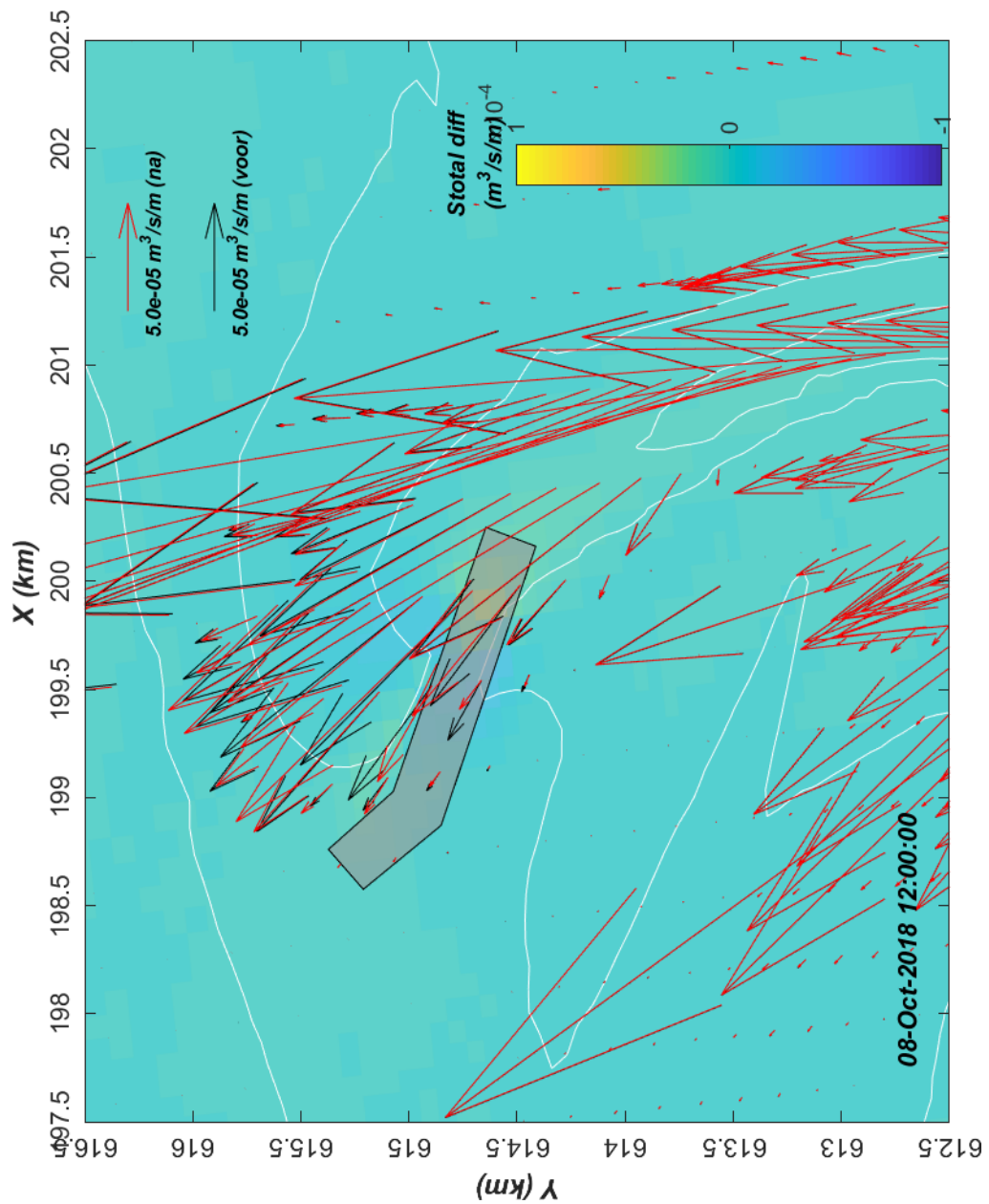
Figuur D.9 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en bodem met kunstmatige verdieping (rode vectoren, morf3), voor transporten tijdens maximale vloed. De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.



Figuur D.10 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en bodem met kunstmatige verdieping (rode vectoren, morf3) voor transporten tijdens maximale vloed (detailkaart). De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.



Figuur D.11 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en bodem met kunstmatige verdieping (rode vectoren, morf3) voor transporten tijdens maximale eb. De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.



Figuur D.12 : Een vergelijking van het sedimenttransport berekend op de gemeten bodem voor verdieping (zwarte vectoren, morf1) en bodem met kunstmatige verdieping (rode vectoren, morf3) voor transporten tijdens maximale eb (detailkaart). De onderliggende kleuren geven een indicatie van het verschil in transportgrootte tussen de 2 simulaties.