

Werking van het Friesche Zeegat

Morfologie en hydrodynamica



Werking van het Friesche Zeegat

Morfologie en hydrodynamica

Tommer Vermaas
Edwin Elias







Titel
Werking van het Friesche Zeegat

Opdrachtgever Rijkswaterstaat **Project** 11203669-000 **Kenmerk** 11203669-000-ZKS-0005 **Pagina's** 2

Trefwoorden
Friesche Zeegat, pilot Westgat, Delft3D model, morfologie, buitendelta

Samenvatting
Het Westgat is de noordelijkste eb-gedomineerde buitendelta-geul in de Zoutkamperlaag (het Friesche Zeegat). Deze geul wordt gebruikt als vaarroute tussen Lauwersoog en de Noordzee en is belangrijk voor met name de visserij en de recreatievaart. Sinds 2013 heeft zich in het Westgat een hoge rug (drempel) ontwikkeld, op de overgang naar de Noordzee. De vaargeul kan daardoor niet meer bij gemiddelde getijcondities betrouwbaar worden gebruikt door de aanwezige scheepvaart. In juli 2018 is de noordelijke drempel in het Westgat in de buitendelta van het Friese Zeegat verdiept met ca. 1 meter. Om de morfologische ontwikkeling voor en na deze verdieping beter te begrijpen wordt er door Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat onderzoek gedaan. Het voorliggende rapport beschrijft de resultaten van een deel van dit onderzoek: de modelanalyse die is uitgevoerd om de grootschalige hydrodynamica van het zeegat te begrijpen.

In deze studie is gewerkt met een Delft3D-FLOW (hydrodynamisch) model gebaseerd op het Wadsea model dat de gehele Waddenzee beslaat. Naast dit grove model is een detailmodel gemaakt voor het Friesche Zeegat. De modellen zijn gebruikt om de grootschalige stromingen en debieten te berekenen en analyseren voor het jaar 2017. Model simulaties zijn uitgevoerd op zowel de 2017 bathymetrie als op de 2005 bathymetrie. De modelresultaten laten zien hoe de getijstroming door het zeegat plaatsvindt, wat de netto debieten over wantijen en door de keel en verschillende geulen zijn en hoe groot de stroomsnelheden in de geulen zijn. De windcondities blijken volgens het model een duidelijke invloed op de stroomsnelheden en debieten over de wantijen en geulen. De grootschalige morfologie en het effect daarvan op de stromingen is vermoedelijk verantwoordelijk voor de ontwikkeling van het Westgat en de drempel, en daarmee verantwoordelijk voor de ontwikkeling van de vaargeul.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	apr. 2019	Tommer Vermaas		Nicky Villars		Frank Hoozemans	
		Edwin Elias					
2.0	sept. 2019	Tommer Vermaas		Nicky Villars		Frank Hoozemans	
		Edwin Elias					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doelstelling	2
1.2.1 Achterliggende (onderzoeks) vragen	2
1.3 Leeswijzer	3
2 Studiegebied	4
2.1 Grootschalige morfologie	4
2.2 Ontwikkeling Westgat op basis van lodingen	6
2.3 De verdieping van het Westgat	7
3 Aanpak van de modelstudie	11
3.1 Modelbeschrijving	11
3.2 Model bodems	14
3.3 Modelschematisatie van getij en wind	15
4 Modelresultaten	20
4.1 Stromingspatronen	20
4.1.1 2017 bathymetrie	20
4.1.2 2005 bathymetrie	27
4.1.3 Verschil in stromingspatronen tussen 2017 en 2005 bathymetrie	27
4.2 Stroomsnelheden	30
4.3 Debieten	38
5 Conclusies	45
6 Referenties	49

Bijlage(n)

No table of contents entries found.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Rijkswaterstaat en Programma naar een Rijke Waddenzee zijn in 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 onderzoekopdrachten uitgevoerd vanuit een specifiek project. Het voorliggende 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.

Het Westgat is de noordelijkste eb-gedomineerde buiten-deltageul in de Zoutkamperlaag, in het Friesche Zeegat (zie hoofdstuk 2). 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, welke is afgesproken in het Beheersplan Waddenzee (Ministerie van Verkeer & Waterstaat et al., 1996). De vaargeul kan daardoor niet meer bij gemiddelde getijcondities betrouwbaar worden gebruikt door de aanwezige scheepvaart.

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 en de Provincie Groningen. Dit is een eenmalige ingreep en heeft de functie van een pilot. Rijkswaterstaat heeft op zich genomen deze ingreep te monitoren en hierover morfologische kennis te ontwikkelen. Het voorliggende rapport beschrijft de resultaten van onderzoek dat door Deltares in dit kader is uitgevoerd.

1.2 Doelstelling

Ten behoeve van kennisontwikkeling worden door Rijkswaterstaat extra monitoring en extra metingen rondom de verdieping uitgevoerd. De (morfologische) evaluatie van de ingreep wordt uitgevoerd door Deltares in 2018 en 2019 onder het KPP programma Morfologie Waddenzee. De hoofdvraag voor de evaluatie is als volgt:

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

1.2.1 Achterliggende (onderzoeks) vragen

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. Hiervoor is in de voorgaande studies (Oost et al. 2015, Vermaas en Oost 2016) al de basis gelegd.

De stroming door het zeegat stuurt de grootschalige morfologische ontwikkelingen. 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 het Westgat, is het noodzakelijk goed te begrijpen wat de rol is van het Westgat in het zeegat systeem. Naast de morfologische veranderingen is ook begrip van de hydrodynamica in het gehele zeegat nodig. Dit wordt gedaan door gebruik te maken van Delft3D stromings-berekeningen.

De focus van deze modelstudie is op de invloed van het getij en wind op de stromingen door het zeegat. Het in en uitstromen van het getij gaat gepaard met hoge stroomsnelheden die ervoor zorgen dat er diepe getijgeulen zijn. Recente metingen (KustGenese 2) en modelstudies (Duran-Matute, 2014) geven aan dat windgedreven stromingen naast getijstroming ook een belangrijke invloed kunnen uitoefenen. Golven worden in deze fase van de studie nog niet beschouwd, dat gebeurt in de tweede fase van het onderzoek. Golven zijn wel belangrijk in de uiteindelijke vorming van de platen op de buitendelta, maar zijn minder van belang voor het begrijpen van de grootschalige stroombeelden en werking van het zeegat.

De analyse op grotere schaal moet inzicht geven 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. Ze vormen de link tussen de grootschalige morfologie en de werking op kleinere schaal van het Westgat. Deze informatie en kennis wordt in het tweede deel van het onderzoek gebruikt om de effecten van de verdieping te analyseren en hiermee te vergelijken. In het tweede deel van het onderzoek wordt op kortere tijdschaal en in meer detail naar de verdieping zelf gekeken, met behulp van modelberekeningen. Deze resultaten worden in een apart rapport gepresenteerd.

De deelvragen die in deze rapportage worden onderzocht zijn:

- 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?

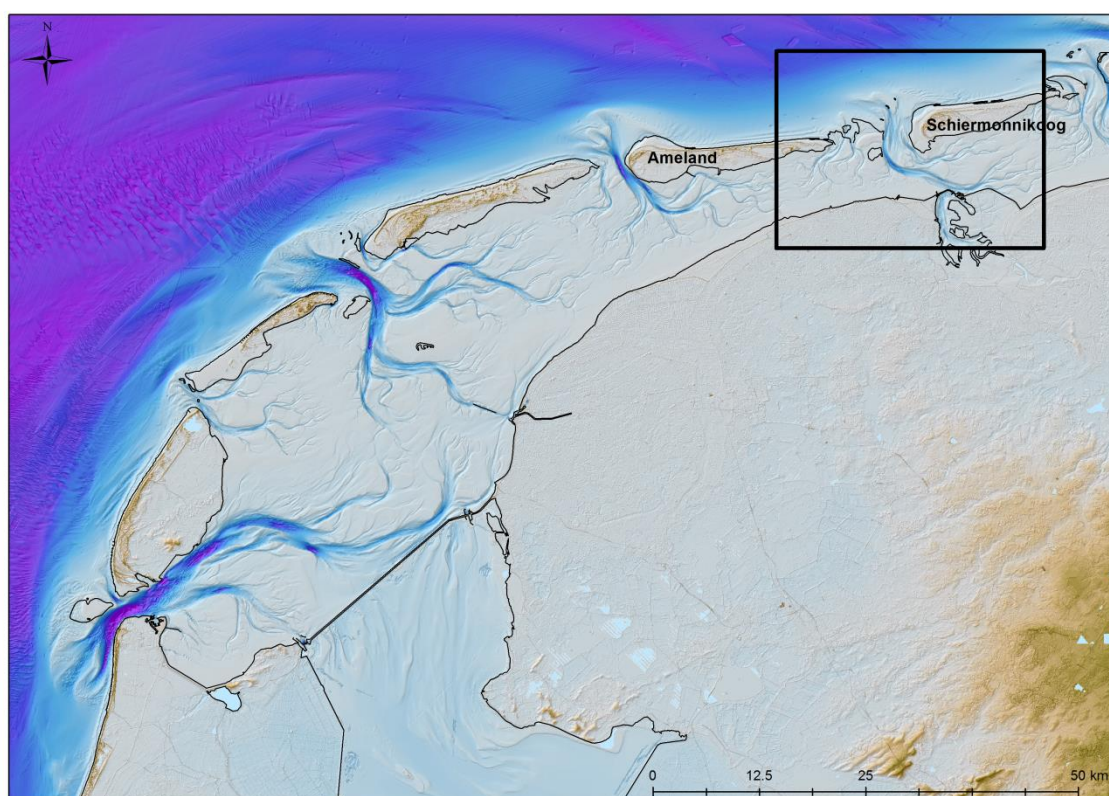
1.3 Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk wordt het studiegebied beschreven, zowel de grootschalige morfologie als de ontwikkelingen van het Westgat. De beschrijving van het gebruikte model en de uitgevoerde modelberekeningen is te lezen in hoofdstuk 3. De resultaten van de modelstudie zijn in hoofdstuk 4 beschreven, waarna in hoofdstuk 5 de conclusies zijn te lezen.

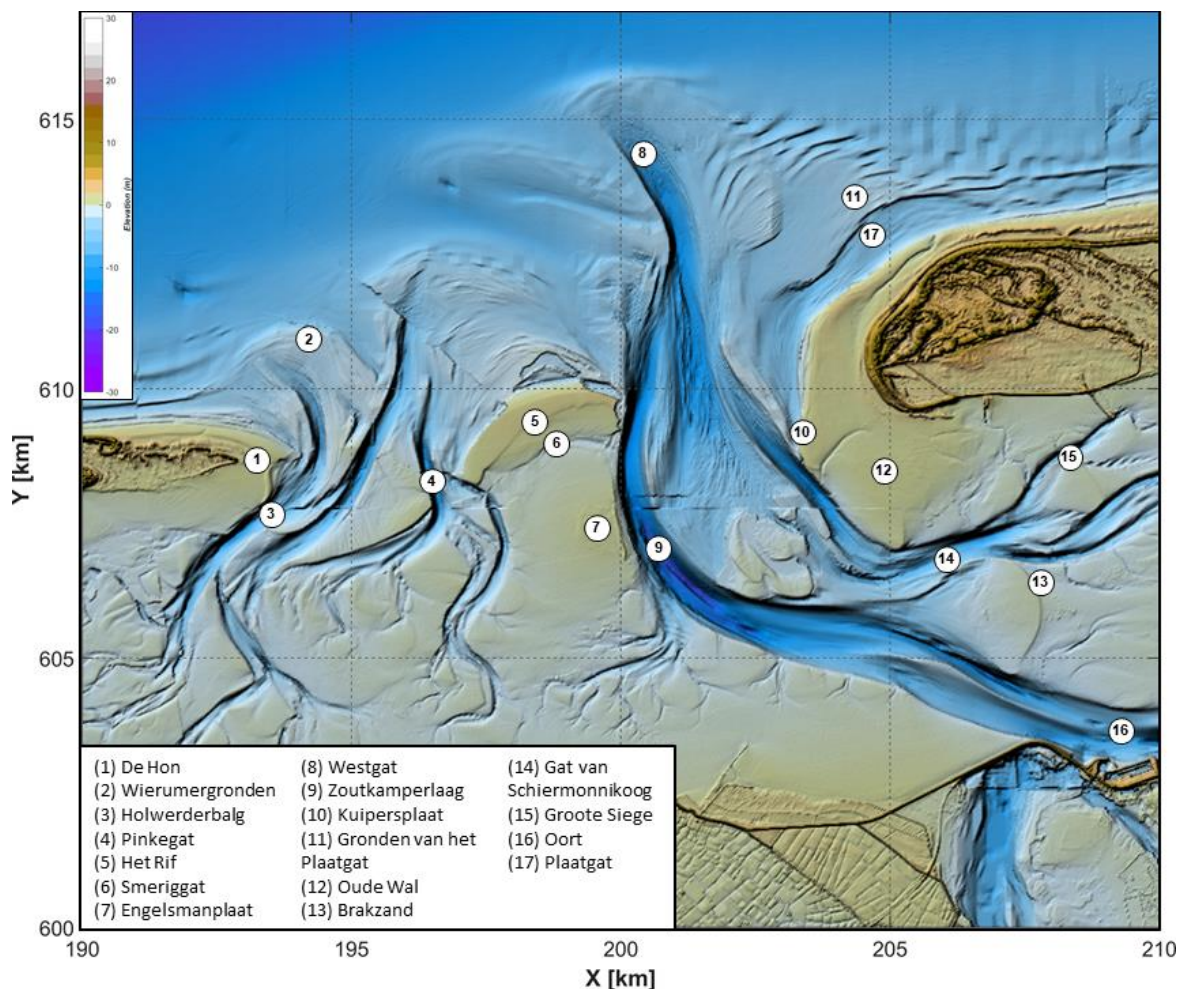
2 Studiegebied

2.1 Grootschalige morfologie

Het Friesche Zeegat is gelegen tussen de Waddeneilanden Ameland en Schiermonnikoog (Figuur 2.1). Het zeegat bestaat uit twee deelsystemen die worden gescheiden door de ondieptes het Rif en Engelsmanplaat (Figuur 2.2). Het westelijke deelsysteem wordt aangeduid als Pinkegat, het oostelijke als Zoutkamperlaag. Het Pinkegat bestaat uit meerdere kleinere geulen, waaronder het Pinkegat en de Holwerderbalg. De geulen vertakken zich in de Waddenzee voornamelijk richting het zuidwesten. Deze geulen vormen een buitendelta met eb- en vloedchilden die relatief klein is ten opzichte de buitendelta van de Zoutkamperlaag, maar wel invloed heeft op de ontwikkeling van de buitendelta van het Zoutkamperlaag deelsysteem. In het Zoutkamperlaag deelsysteem zijn grotere geulen aanwezig, waarvan de geul Zoutkamperlaag veruit de grootste is. De geulen hebben in de Waddenzee een oostelijke oriëntatie, die sterker is geworden na de afsluiting van de Lauwerszee.



Figuur 2.1 Overzichtskartaal van de Waddenzee met de ligging van het studiegebied



Figuur 2.2 Ligging van de belangrijkste geulen en platen in het Friesche Zeegat. Het zeegat bestaat uit twee deelsystemen die worden gescheiden door de ondieptes het Rif (5) en Engelsmanplaat (7). Het westelijke deelsysteem wordt aangeduid als Pinkegat, het oostelijke als Zoutkamperlaag. Het Westgat (8) ligt in de buitendelta van de Zoutkamperlaag. Deze bodem is samengesteld uit de opnames van 2017 (buitendelta Zoutkamperlaag) en 2012 (overige) aangevuld met AHN data

In de keel van het zeegat (de doorsnede waar het zeegat het smalste is, tussen beide eilanden) vinden we twee geulen. De hoofgeul Zoutkamperlaag ligt aan de westzijde direct langs Het Rif en strekt zich noordwaarts uit op de buitendelta. Aan de oostzijde van het zeegat vinden we de kleine geul Gat van Schiermonnikoog die zich rond de (zuid)westelijke zijde van Schiermonnikoog uitstrekt. Tussen deze twee geulen vinden we een ondiepe zone, in het zuiden begrenst door een ondiepe plaat. Richting de buitendelta wordt dit gebied dieper en gaat dan over in het Westgat. Er bevindt zich een drempel tussen zowel het Westgat en de Zoutkamperlaag als tussen het Westgat en het Gat van Schiermonnikoog. Deze drempels zijn een indicatie van tegengestelde stromingsdominanties (vloed- en ebgedomineerd) in de geulen. De voormalige geul Plaatgat is in deze bodem nog te zien als de ondiepe geul langs de kust van Schiermonnikoog.

2.2 Ontwikkeling Westgat op basis van lodingen

De volgende beschrijving behorende bij Figuur 2.3 is gebaseerd op Oost et al. (2015) en aangevuld met beschrijvingen van recentere ontwikkelingen (Figuur 2.4).

De recente ontwikkeling van geulen op de buitendelta van de Zoutkamperlaag (2000-2015) is nader bekeken aan de hand van de beschikbare lodingen (Figuur 2.3). De verschillende geulen zijn aangegeven met afzonderlijke kleuren om hun verplaatsing in de tijd duidelijk te kunnen volgen, in de tekst wordt naar deze kleuren verwezen.

In de situatie van 2000 was het Westgat¹ (rood) een kleine ebschaar en vond de uitstroom van het bekken vanaf de Zoutkamperlaag waarschijnlijk voornamelijk noordoostwaarts plaats, via het Plaatgat. In deze situatie was er geen duidelijke doorgaande geul in noordelijke of westelijke richting. Hier lag een groot plaatoppervlak met een aantal ondiepe (> -5m openingen) tussen de "hogere" platen. Ten zuiden van het Westgat1 was er een tweede, nog klein ebschaartje te onderscheiden. Ten noorden van Westgat1 lag een ondiepe vloedgeul.

In 2002 is deze situatie drastisch veranderd. Zowel Westgat1 als het secundaire ebschaartje zijn sterk in grote toegenomen. De ebschaar heeft hierbij een duidelijk ebschild opgebouwd. Aan de noordzijde van dit ebschild heeft het Westgat1 zich ontwikkeld tot een doorgaande geul. Het is waarschijnlijk dat de ebfunctie van Westgat1 grotendeels is overgenomen door de ebschaar, waardoor het Westgat1 zich als een vloedgeul kan ontwikkelen. Hierdoor is de diepte van Westgat1 ook toegenomen, waardoor nu ook in noordwestelijke richting een doorgang dieper dan -5 m NAP aanwezig is.

Doordat de zuidelijke geul (groen) groter wordt zal het debiet hiervan toenemen, ten koste van het debiet in de noordelijke geul (rood). Hierdoor schuiven de geulen en platen naar het noorden op, waardoor in 2005 het oorspronkelijke Westgat1 aan de zuidkant is dichtgedrukt en dat alleen de vloedgeul is overgebleven (oranje). De zuidelijke geul (groen) heeft de functie als grootste ebgeul van het Westgat1 uit 2002 overgenomen (vanaf hier is dit Westgat2 met groen aangegeven). De uitstroom van de Zoutkamperlaag, die in 2000 nog in de richting van het Plaatgat lag, is nu voor een aanzienlijk deel in de richting van het Westgat. Het getijvolume dat door deze geul loopt is groot genoeg om voor een doorgang dieper dan -5 m NAP te zorgen.

De oude vloedgeul (oranje) blijft in 2007 nog zichtbaar als dieper deel tussen de platen, maar de debieten door deze geul zullen zijn afgenomen. Dit debiet is deels overgenomen door de nieuwe, zuidelijke vloedgeul (wit), die nu een verbinding maakt met het Westgat2, en nog steeds dieper is dan -5 m NAP. Een wezenlijk verschil tussen de 2007 en 2000 bathymetrie is het behoud van eb-debiet door het Westgat2 en de vorming van een vloedgeul ten zuiden hiervan. Deze vloedgeul draagt bij aan de noordelijke verlenging van het Rif /Engelsmanplaat. De relatief hoge drempel voorkomt de vorming van eb-schaartjes en draagt zo bij aan de stabiliteit van het Westgat2.

Het Westgat2 schuift noordwaarts en daarmee heeft de vloedgeul ten zuiden daarvan ruimte om een vloedschild op te bouwen, zoals te zien in de meting van 2009. De platen in het oostelijke deel van de buitendelta zijn ondertussen ook verder opgeschoven en hebben de oostelijke

¹ Doordat vrijwel alle ebgeulen aan de NW kant van de buitendelta "Westgat" worden genoemd in de hydrografische literatuur, is er voor de duidelijkheid gekozen om de opeenvolgende Westgaten van een steeds hoger nummer te voorzien. Daarbij wordt het huidige gat in dit hoofdstuk aangegeven met Westgat2. In de rest van dit rapport wordt dit 'Westgat' genoemd.

doorgang, het restant van het Plaatgat, zo ver dichtgedrukt dat deze minder diep dan -5 m NAP is.

Het schild van de vloedgeul (wit) drukt het Westgat2 tegen de plaat ten noorden daarvan aan, waardoor de watervoerende capaciteit afneemt. Hierdoor wordt het overblijfsel van de oude vloedgeul (oranje) in 2011 weer enigszins actief als ebgeul (rood).

In 2012 is het Westgat2 naar het noorden gedraaid, waarbij er ruimte is ontstaan voor een tweede vloedgeul (geel). Hier sluit het Westgat2 dan nog op aan, waardoor de drempel nog dieper dan -5 m NAP blijft. In 2014 en 2015 is de uitstroom van het Westgat2 bijna noordwaarts geworden, waardoor de geul nog meer in het verlengde van de Zoutkamperlaag ligt. Het gevolg hiervan is dat het Westgat2 zich naar het noorden verlengt en daarbij een ebschild vormt, en dat de uitmonding steeds dieper wordt. De drempel die nu is ontstaan verschilt van de drempels van het Westgat2 met westelijke uitstroom en de kleine geultjes ('chutes') in westelijke richting. De westelijke uitstroom laat het bekende beeld van elkaar ontwijkende eb- en vloedscharen zien, waarvan de bijbehorende eb- en vloedschilden de drempel vormen. Het ebschild dat aan de noordzijde vormt bouwt het nieuwe deltafront op in de Noordzee, waar dus geen vloedgeul ligt.

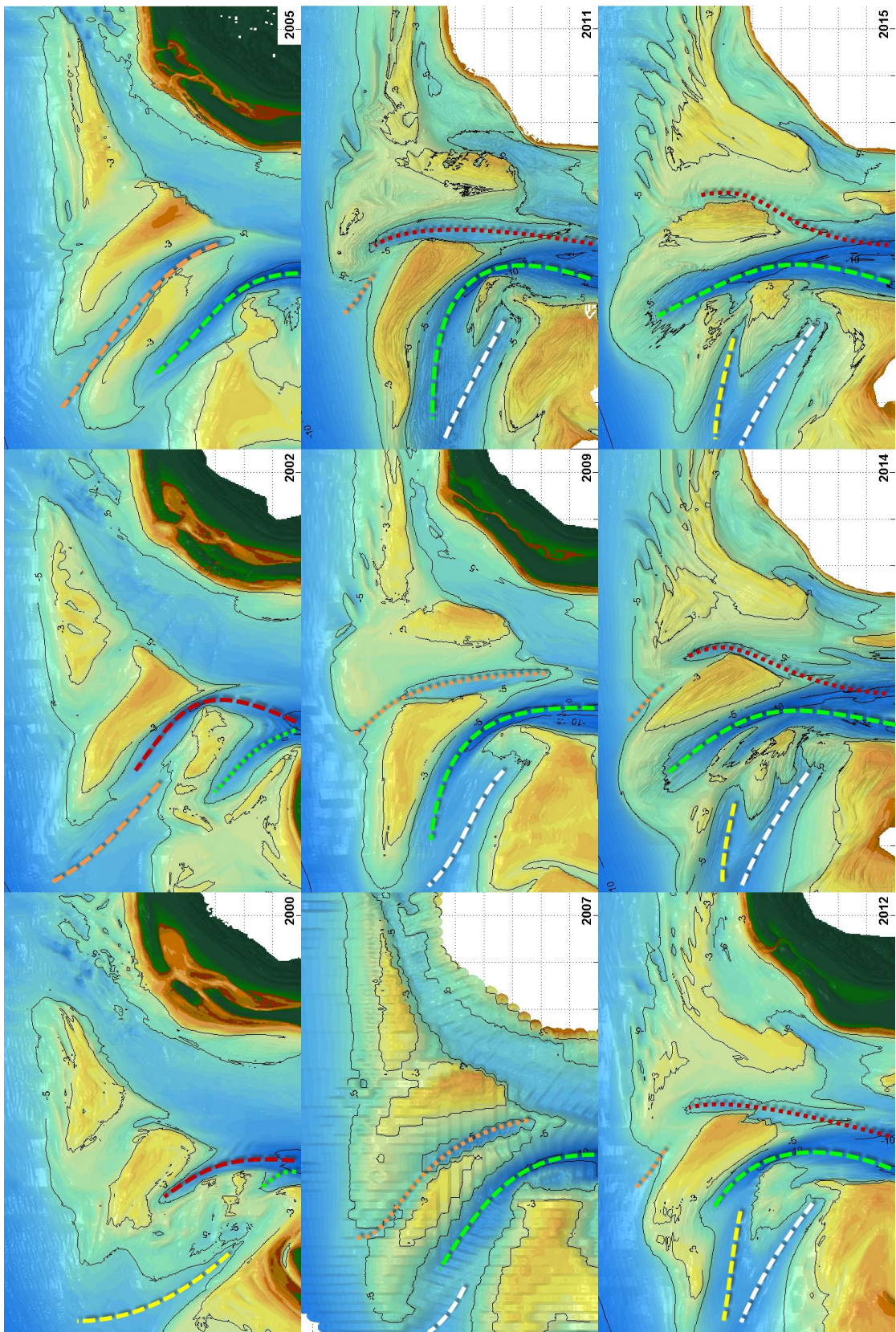
In de 2015 situatie is er geen aansluiting meer tussen Westgat2 en de vloedgeul. Hierbij hebben de vloedgeulen hun schilden verder op kunnen bouwen en is de diepte daar afgenomen tot minder dan -5 m NAP. De zandplaten westelijk van de restanten van het Plaatgat (pal naast Schiermonnikoog) zijn nog verder naar het oosten verplaatst en deels samengegroeid.

Vanaf 2015 is te zien dat het Westgat2 weinig verder met de klok meedraait (Figuur 2.4). De platen ten oosten van het Westgat2 bouwen zich ook nog verder op, maar migreren nog niet significant richting Schiermonnikoog. De eb- en vloedschilden ten noorden van het Rif bouwen nog verder op. Tot aan de bodem van 2018 lijken ook de geultjes in dit gebied langzaam kleiner te worden. In 2018 is echter te zien dat de zuidelijke ebgeul een stuk in noordwestelijke richting is uitgebreid. In deze bodem is ook de uitgevoerde verdieping van de drempel van het Westgat2 al te zien. In de rest van het rapport wordt het huidige Westgat aangeduid zonder nummer.

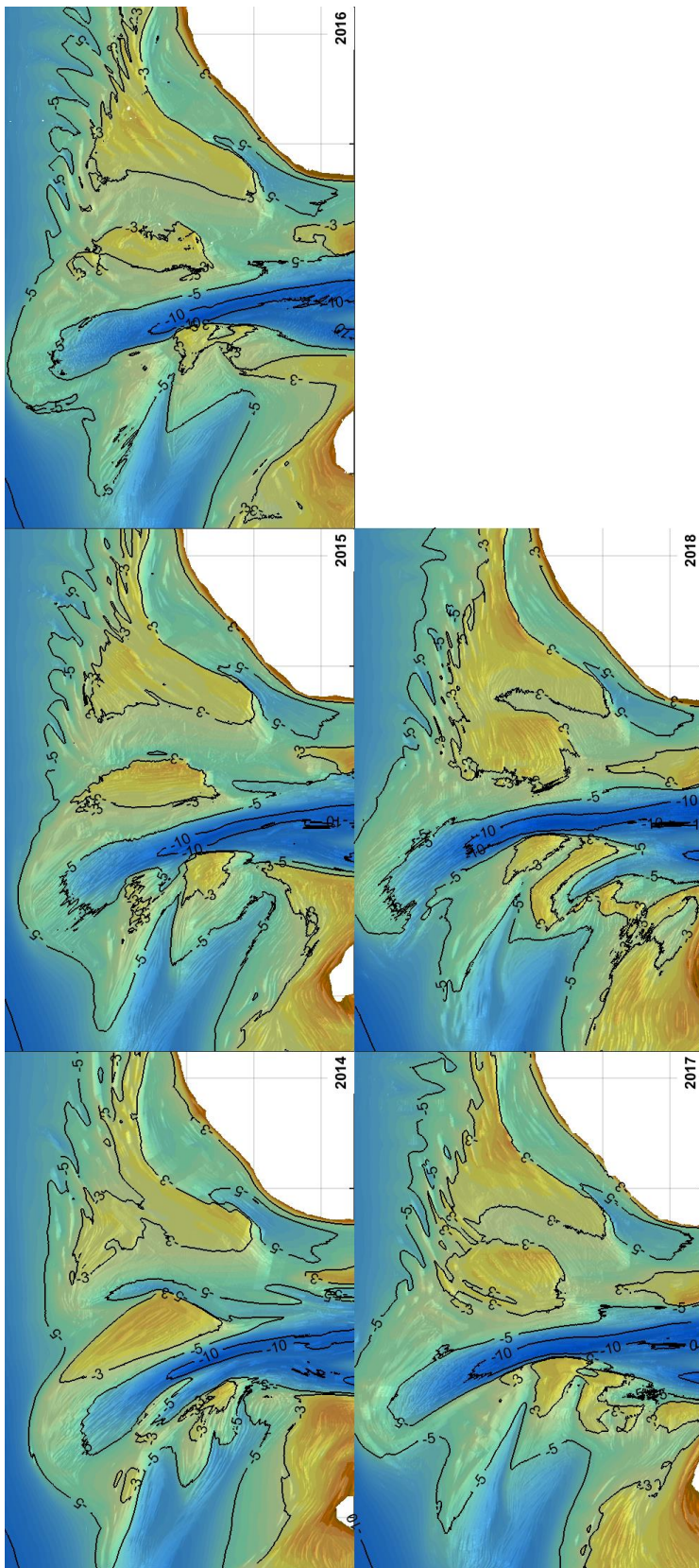
2.3 De verdieping van het Westgat

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 en de Provincie Groningen. Dit is een eenmalige ingreep en heeft de functie van een pilot. De locatie van de verdieping is aangegeven in Figuur 2.5. De verdieping is duidelijk te zien in de verschilkaart in Figuur 2.6.

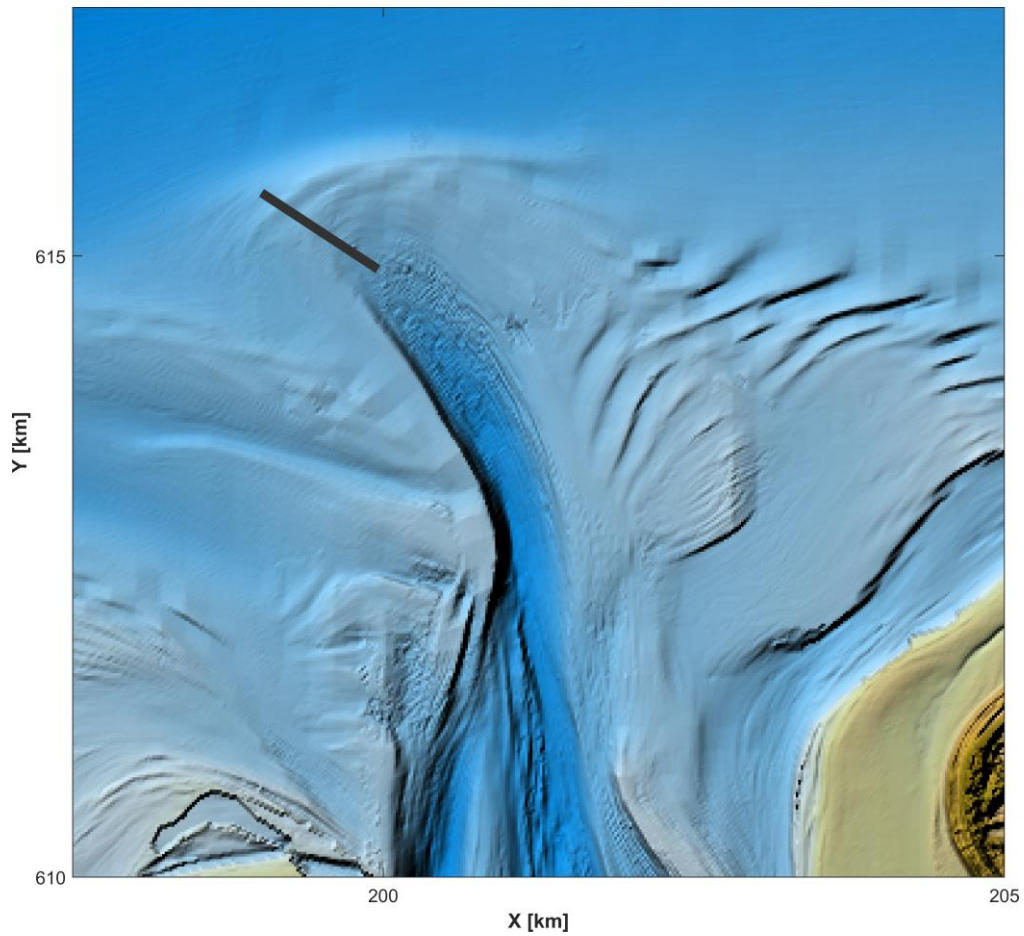
Relevant voor de verdieping is het verschil in configuratie van de geulen: de stroomsnelheden ter hoogte van de drempel zullen verschillen tussen de situatie waarin het Westgat in het verlengde ligt van de Zoutkamperlaag - zoals in 2018 het geval is - en de situatie waarin het Westgat een 'chute' in westelijke richting is die afbuigt van de Zoutkamperlaag - zoals de situatie in 2012 was.



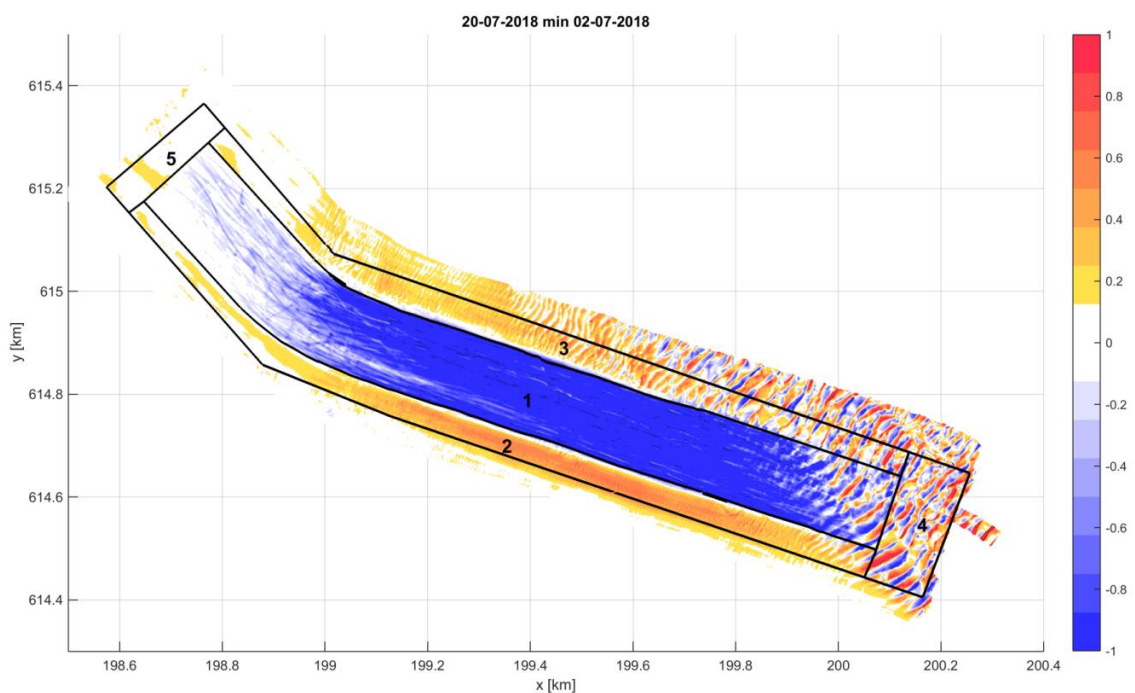
Figuur 2.3 Recente ontwikkeling van de geulen op de buitendelta van de Zoutkamperlaag (2000-2015) op basis van vaklodingen en beheerslodingen. De geulen zijn in de tijd met dezelfde kleur lijn aangegeven. Bron: Oost et al. (2015)



Figuur 2.4 Ontwikkeling 2014 t/m 2018 van de geulen op de buitendelta van de Zoutkamperlaag op basis van vaklodingen en beheerslodingen.



Figuur 2.5 Bathymetrie 2017 met locatie van de verdieping (zwarte lijn) van de vaargeul, zie ook Figuur 2.2 voor overzichtskaart Friesche Zeegat



Figuur 2.6 Verschilkaart multibeam, voor (2 juli 2018) en na (20 juli 2018) de verdieping van de vaargeul (vak 1)

3 Aanpak van de modelstudie

Om een beter begrip te krijgen van de werking van het Friesche Zeegat is in deze studie gewerkt met een grootschalig model (het Wadsea model) waarmee voor heel 2017 simulaties zijn gedaan. De resolutie van dit model is te laag om in detail de stromingen in het zeegat te bekijken, maar is gebruikt voor de calibratie van de waterstanden en analyse van de grootschalige fenomenen zoals debieten over wantij en keel en effect van wind daarop. Het model wordt aangestuurd door een tijdserie van de waterstanden op de randen. In deze tijdserie zijn zowel het effect van getij als setup inbegrepen.

Daarnaast is voor analyse van de stromingen in het zeegat een gedetailleerd model opgezet met behulp van domein-decompositie. Dit model heeft een veel langere rekentijd en is daarom alleen voor delen van 2017 doorgerekend. Voor het huidige model is alleen op de waterstand een calibratie uitgevoerd. De debieten die worden getoond in deze rapportage zijn daarom indicatief en moeten eerst geëvalueerd worden voor er met zekerheid conclusies kunnen worden getrokken. De 13-uurs meting die in 2018 in het Westgat is uitgevoerd is heel geschikt voor een verdere model validatie, wat in het tweede deel van deze studie gedaan zal worden. Over relatieve verschillen en effecten van bepaalde factoren kunnen wel al uitspraken worden gedaan met het huidige model. Het model is, met de condities van 2017, ook uitgevoerd met de bodem van 2005, om de effecten van de morfologie te analyseren.

3.1 Modelbeschrijving

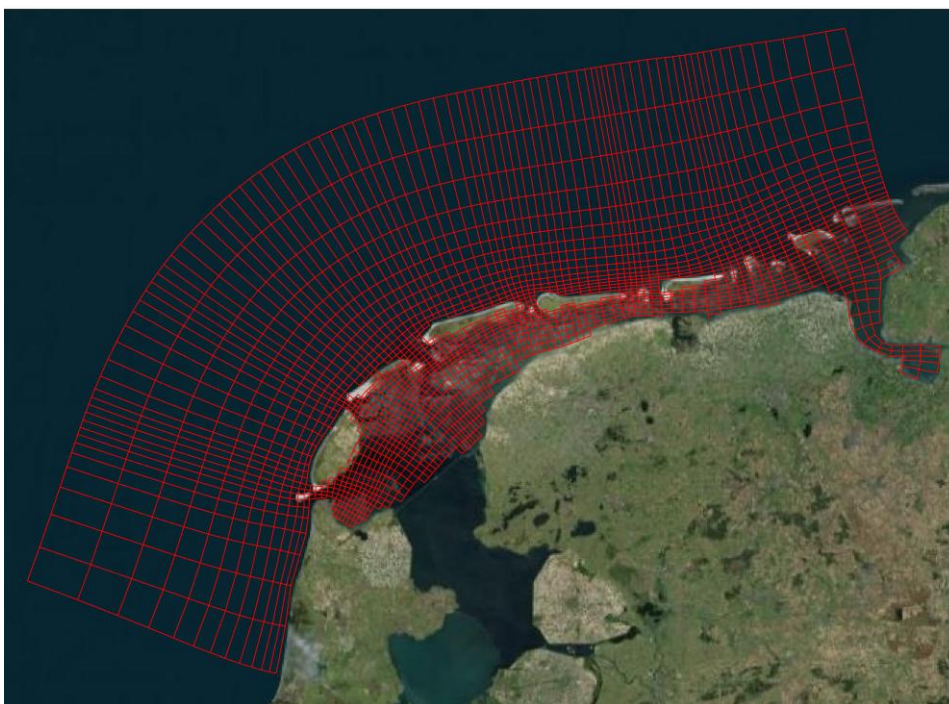
Voor deze studie is met twee dieptegemiddelde Delft3D modellen gewerkt. Als basis is het 'Wadsea' model (De Graaf, 2009) gebruikt, dat de hele Waddenzee beslaat (Figuur 3.1). Dit model is gebruikt om waterstanden te calibreren en voor analyse van de grootschalige processen over heel 2017. Het jaar 2017 is gekozen vanwege de grote variatie aan weer- en golfcondities die zijn opgetreden. Het model wordt aangestuurd door een tijdserie met waterstanden aan de open randen (zie paragraaf 3.3).

Daarnaast is een detailmodel voor het Friesche Zeegat gemaakt, waarin de resolutie met een factor drie hoger is. Deze resolutie is nodig om de platen en geulen op de buitendelta in voldoende detail weer te geven. Dit model wordt aangestuurd vanuit het Wadsea model via domein-decompositie (Figuur 3.2). Het detailmodel is gebruikt om in meer detail naar de stroming in het zeegat en de afzonderlijke geulen te kijken. Er zijn twee periodes gemodelleerd: maart en oktober 2017. Deze periodes zijn gekozen op basis van de resultaten van de modelsimulaties met het Wadsea model voor heel 2017 en de windcondities (zie paragraaf 3.3). In maart zijn relatief rustige condities met lage windsnelheden die hoofdzakelijk uit het zuidwesten komen. Oktober wordt juist gekenmerkt door hoge windsnelheden en uit noordwestelijke richting.

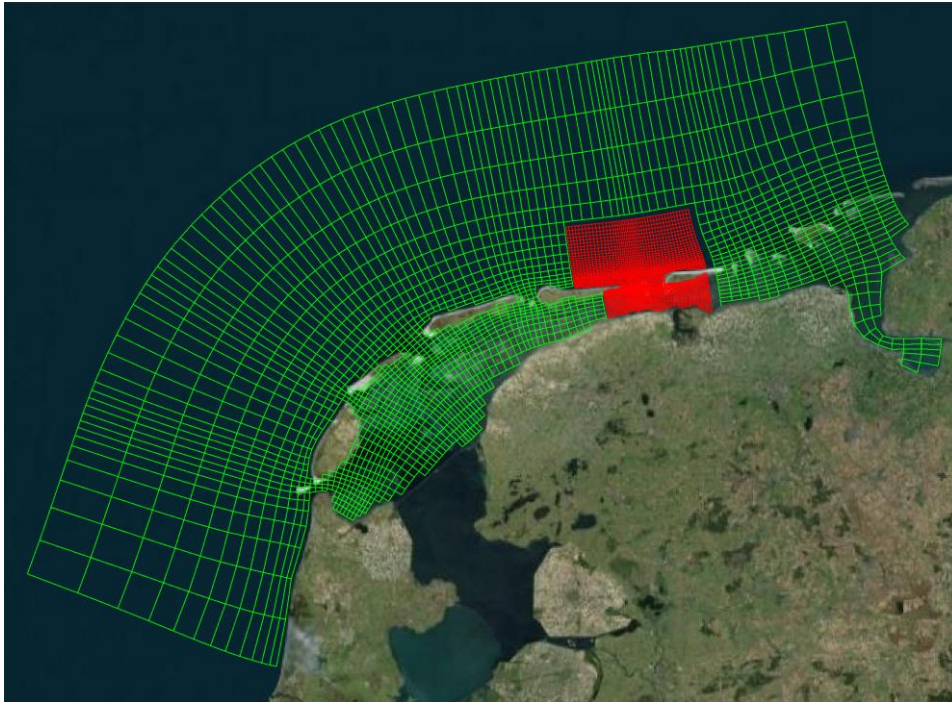
In beide modellen vormt Delft3D-Flow (versie 6.02.13.7545) de kern van het model en berekend de waterbeweging ten gevolge van getij- en meteorologische forcering door de ondiep water vergelijkingen op te lossen (zie Lesser et al., 2004). De opgelegde bodemruwheid wordt berekend aan de hand van de in het model geïmplementeerde Van Rijn2007 ruwheidsvoorspeller.

Het stromingsmodel van het detailmodel beslaat het Friesche Zeegat, het achterliggende bekken en de aanliggende eilanden Ameland en Schiermonnikoog (zie Figuur 3.3). De roosters zijn zodanig gekozen dat zowel de ondiepe zone langs de kust (brandingszone) en de ligging van de hoofdgeul in het zeegat in hoge resolutie worden weergegeven, terwijl de resolute naar

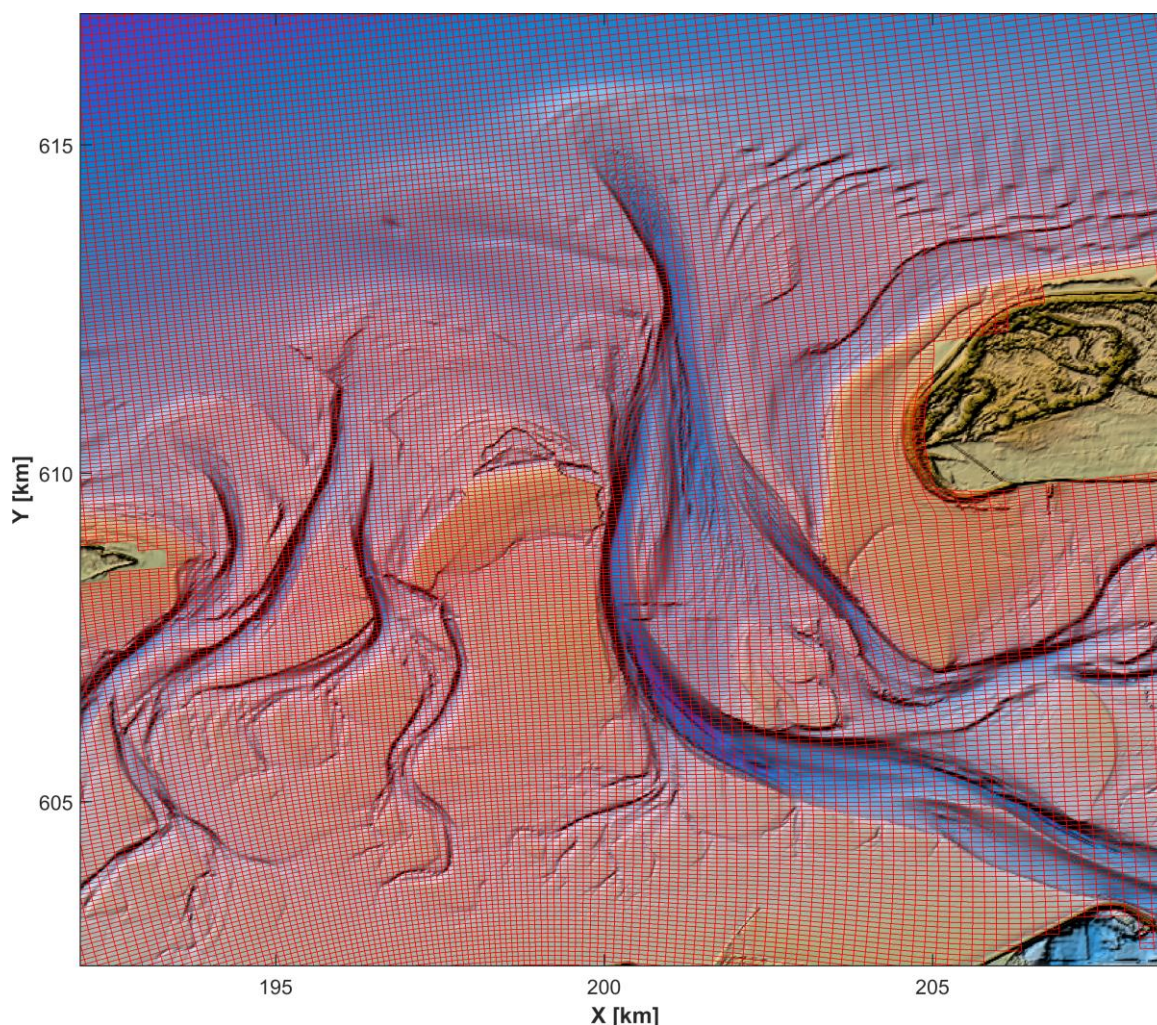
de randen toe lager is. Deze schematisatie geeft ons nauwkeurige en tevens efficiënte modelsimulaties. De ruimtelijke resolutie van ca. 100 x 50 m (oost-west x noord-zuid) in het zeegat en langs de aanliggende kust is toereikend om de maatgevende stromingen en transporten weer te geven. De open randen worden geforceerd via het grootschalige Waddenzee model (Wadsea), waar de waterstanden op open zee worden opgelegd (zie paragraaf 3.3). Hierdoor wordt zowel de uitwisseling tussen het bekken en de Noordzee als de uitwisseling over de wantijen heen richting het bekken van het Zeegat van Ameland en het Groninger wad meegenomen.



Figuur 3.1 Rekenrooster van het gehele Wadsea model, weergegeven met een factor 5 grover



Figuur 3.2 Rekenrooster van het domein-decompositie model, in groen het aansturende, grovere Wadsea model en in rood het detailmodel van het Friesche Zeegat. Beide roosters zijn weergegeven met een factor 5 grover

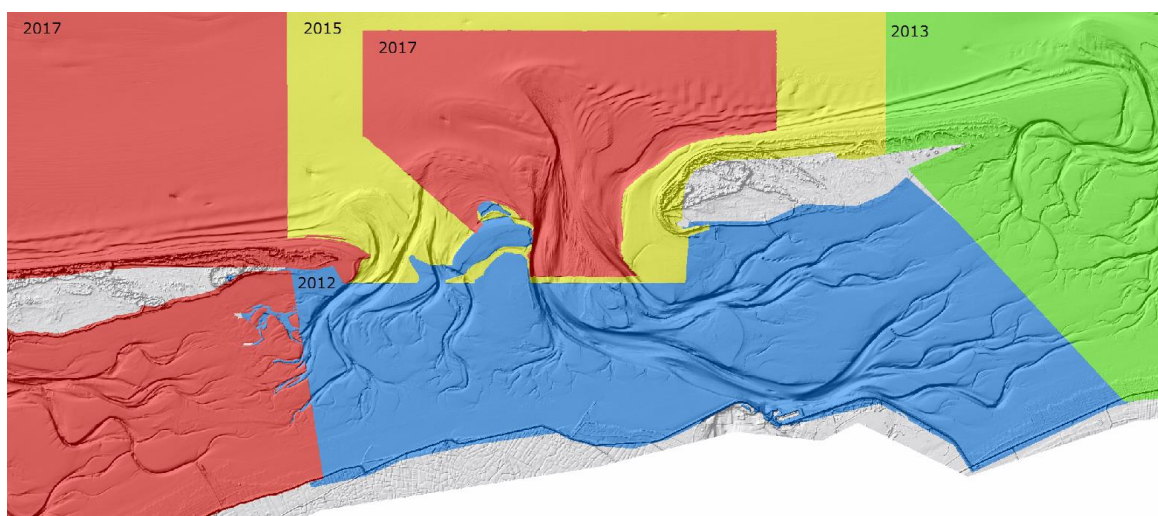


Figuur 3.3 Rekenrooster van het stromingsgrid van het detail model en bathymetrie, weergegeven op daadwerkelijke resolutie. De ruimtelijke resolutie is ca. 100 x 50 m (oost-west x noord-zuid) in het zeegat en langs de aanliggende kust.

3.2 Model bodems

Voor de gebruikte modelbodems voor het grootschalige en detailmodel van het zeegat zijn de meest recente bodemmetingen gebruikt (de 'recente bodem', zie Figuur 3.4). Daarnaast zijn enkele modelberekeningen gemaakt met een tweede bodem, die gebaseerd is op de opname van de Waddenzee tussen 2003 en 2008. Het Friesche Zeegat is in 2005 opgenomen.

De bodemsamenstelling in het model gaat uit van een onbeperkte hoeveelheid sediment met een gemiddelde (d50) korreldiameter van 200 μm . Deze korreldiameter is representatief voor het zeegat, maar op de buitendelta ter hoogte van de verdieping van het Westgat ligt de korreldiameter wel iets lager (ca. 150 μm). Dit verschil in diameter kan wel een invloed hebben op de grootte van de transporten, maar de invloed op de transportpatronen is waarschijnlijk beperkt. Voor het doel van de huidige analyse (begrip van de hydrodynamica in het gehele zeegat) is dit geen probleem. Deze informatie en kennis wordt in het tweede deel van het onderzoek gebruikt om de ontwikkeling van de morfologie in het Westgat en de effecten van de verdieping te analyseren. Voor het tweede deel zal er meer aandacht worden besteed aan het effect van een andere korreldiameter in de modelberekeningen.

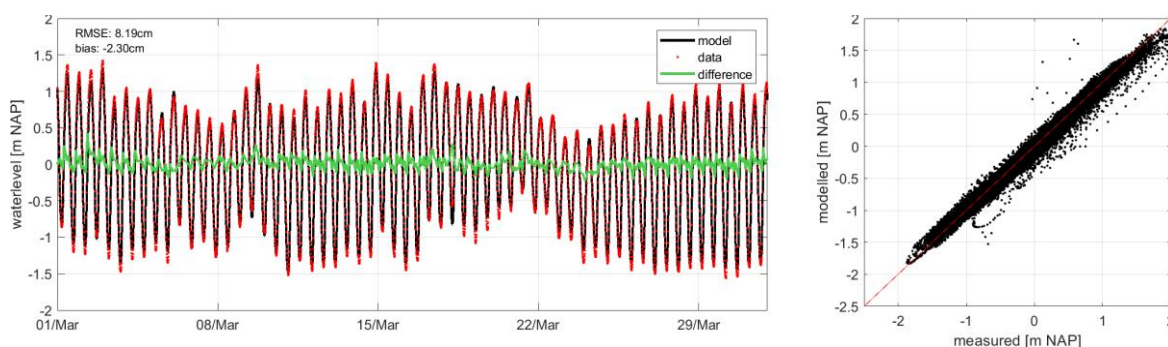


Figuur 3.4 Jaar van opname van de samengestelde 'recente bodem' voor het Friesche Zeegat

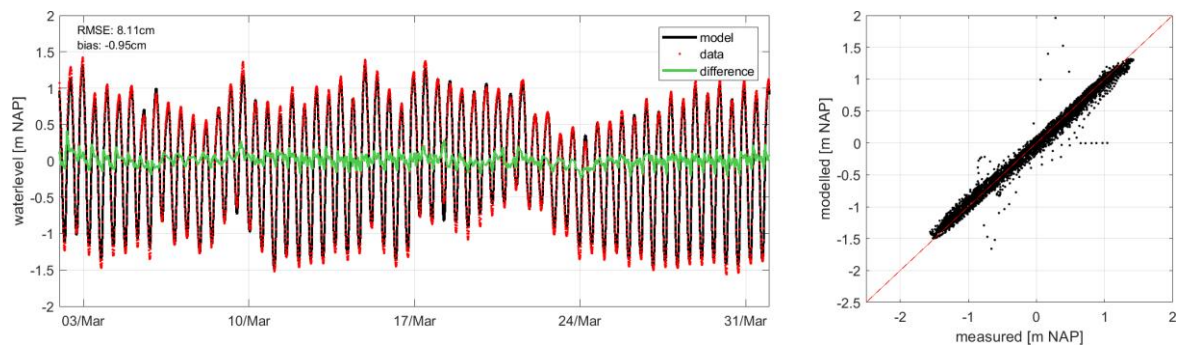
3.3 Modelschematisatie van getij en wind

De gebruikte modellen worden aangestuurd door tijdseries van het waterniveau, waarin zowel getij als setup in zijn verwerkt. Het voordeel van deze randvoorwaarde is dat ook grootschalige verhangen, door bijvoorbeeld wind, dan ook netjes meegenomen worden in de modellering. De waterstanden zijn afgeleid voor heel 2017 uit het model DCSM-v6_ZUNO-v4 dat de gehele Noordzee beslaat.

Op basis van het grootschalige Waddenzee model (Wadsea) zijn de waterstanden gecalibreerd op vier meetboeien op de Noordzee: Texel Noordzee, Terschelling Noordzee, Wierumergronden en Huibertgat. De gebruikte randvoorwaarden bleken hieruit een systematische fout ten opzichte van de meetwaardes van deze boeien te hebben van gemiddeld bijna 10 cm. De gehele tijdserie van het waterniveau waarmee het model wordt aangestuurd is eenvoudig gecorrigeerd door dit gemiddelde verschil ervan af te trekken. Waardoor deze gemiddelde afwijking aanwezig was is niet duidelijk maar heeft mogelijk te maken met referentieniveau van de waterstand. Na correctie van deze fout was de standaardfout (RMSE) voor deze vier locaties tussen de 7.95 en 12.18 cm. Het gedetailleerde model geeft een vergelijkbare afwijking als het grootschalige model (Figuur 3.5 en Figuur 3.6).

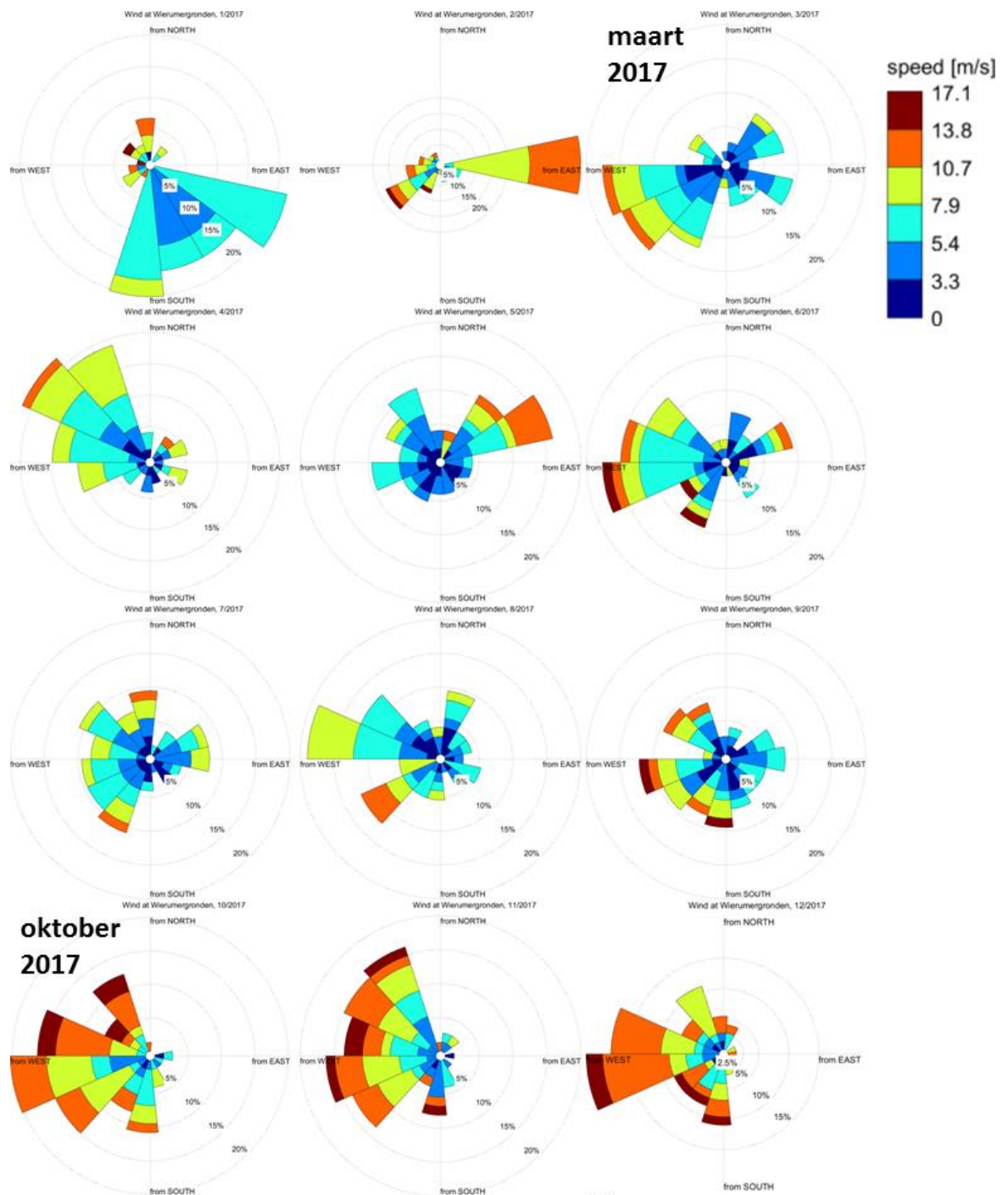


Figuur 3.5 Vergelijking gemeten en gemodelleerd waterniveau van meetboei Wierumergronden, na correctie randvoorwaarden (waardes berekend op heel 2017, Wadsea model)

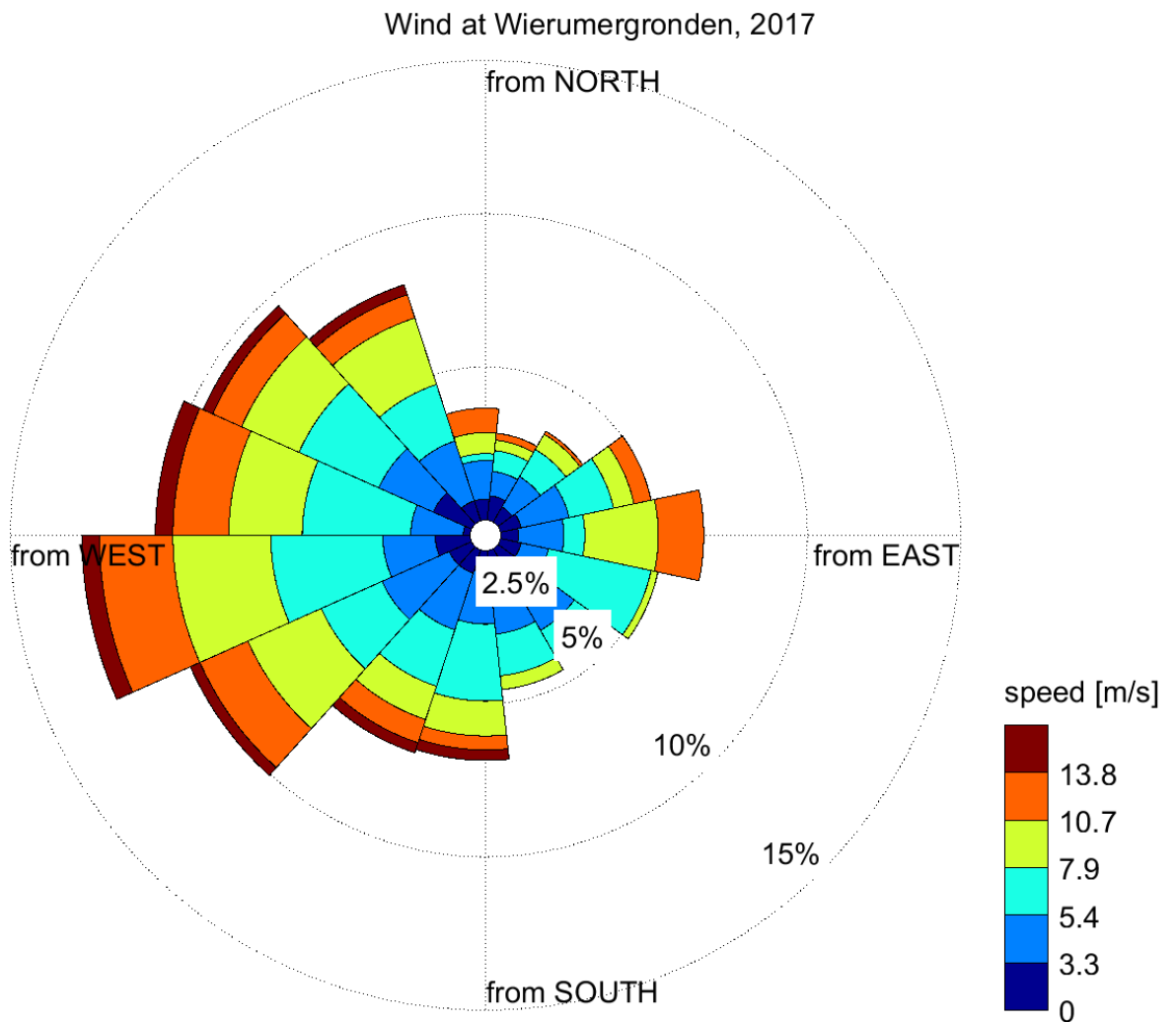


Figuur 3.6 Vergelijking gemeten en gemodelleerd waterniveau van meetboei Wierumergronden, na correctie randvoorwaarden (waardes berekend op maart 2017, gedetailleerde model)

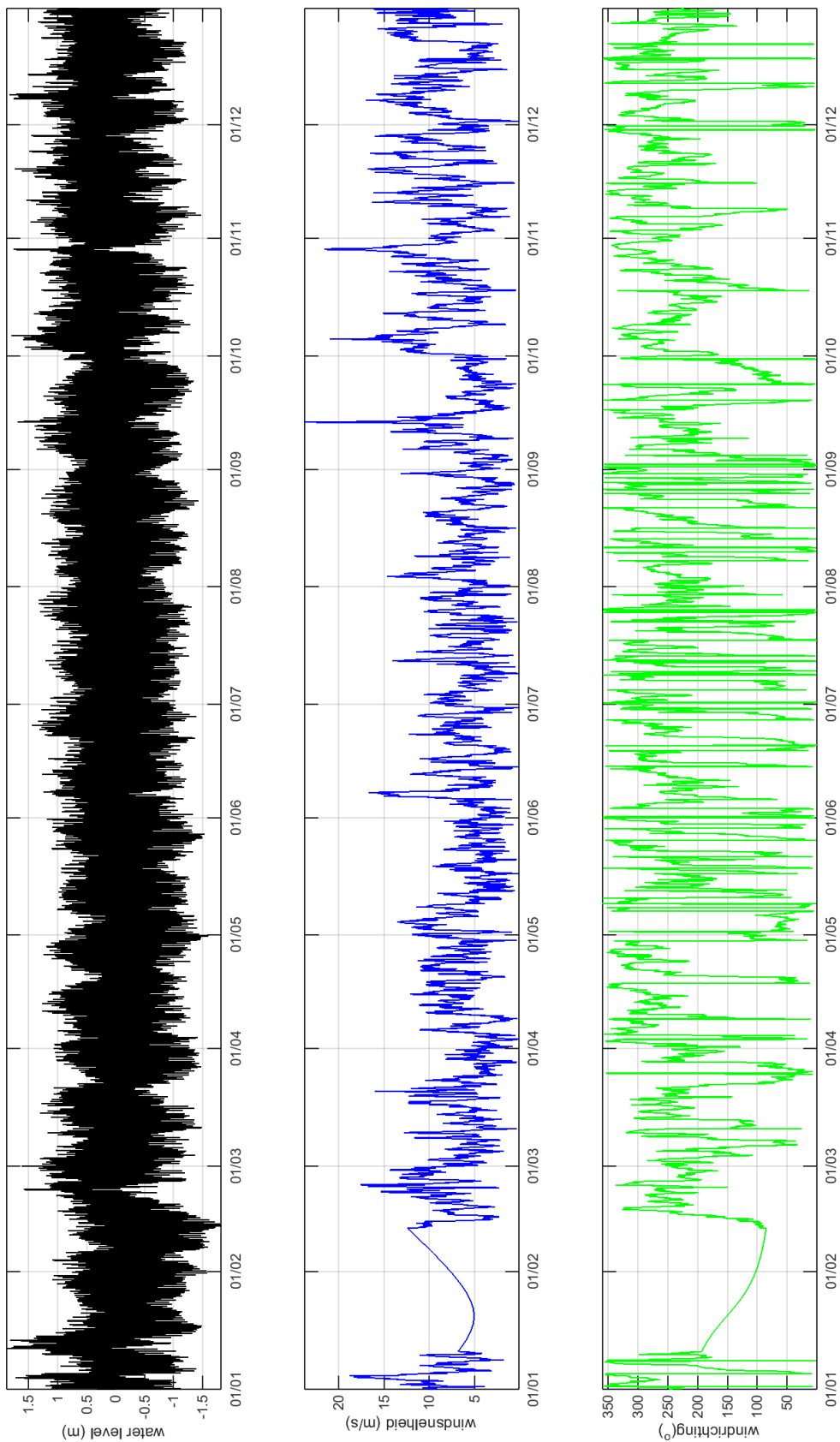
De windcondities voor heel 2017 zijn verkregen uit het HIRLAM-model. Hierbij zijn de windsnelheid en –richting en de druk voor het gehele modelgebied en de gehele periode als rooster beschikbaar. De windcondities zijn te zien in Figuur 3.7, Figuur 3.8 en Figuur 3.9.



Figuur 3.7 Windcondities per maand in 2017 op basis van HIRLAM modeloutput. Condities zijn voor de locatie van boei Wierumergronden weergegeven



Figuur 3.8 Windcondities in heel 2017 op basis van modeloutput van boei Wierumergronden



Figuur 3.9 Verloop van de waterstanden (links), windsnelheden (midden) en windrichting (rechts) bij meetboei Wierumergronden voor heel 2017 uit het Wadsea model

4 Modelresultaten

De modelresultaten zijn geanalyseerd om de stromingspatronen, stroomsnelheden en debieten door het Friesche zeegat in kaart te brengen en te kwantificeren. Er is ook gekeken naar de invloed van getij en wind op de stromingen door het zeegat en de debieten over wantijen. De modelresultaten laten zien hoe de getijstroming door het zeegat plaatsvindt, wat de netto debieten over wantijen en door de keel en verschillende geulen zijn en hoe groot de stroomsnelheden in de geulen zijn. Ook is het verschil in stroomsnelheid te zien bij andere morfologische situatie, in de modelberekeningen met de 2005 bodem.

De analyse geeft inzicht 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.

4.1 Stromingspatronen

4.1.1 2017 bathymetrie

De stromingen in het zeegat worden beschreven aan de hand van een volledig getij op 8 maart 2017, gebaseerd op het gedetailleerde model van het zeegat inclusief het effect van wind. Dit getij is willekeurig gekozen, het getij zal op andere dagen verschillen, als er andere condities gelden. Hoewel de stroomsnelheden zullen verschillen, blijft het algemene beeld vergelijkbaar. De ontwikkeling in het zeegat wordt beschreven voor 1) de eb-periode (5.00 uur tot 11.00 uur, Figuur 4.1) en 2) de vloed-periode (11.00 uur tot 18.00 uur, Figuur 4.2). De stromingspatronen en snelheden zijn te zien in Figuur 4.3 en Figuur 4.4 (eb-periode) en in Figuur 4.5 en Figuur 4.6 (vloed-periode).

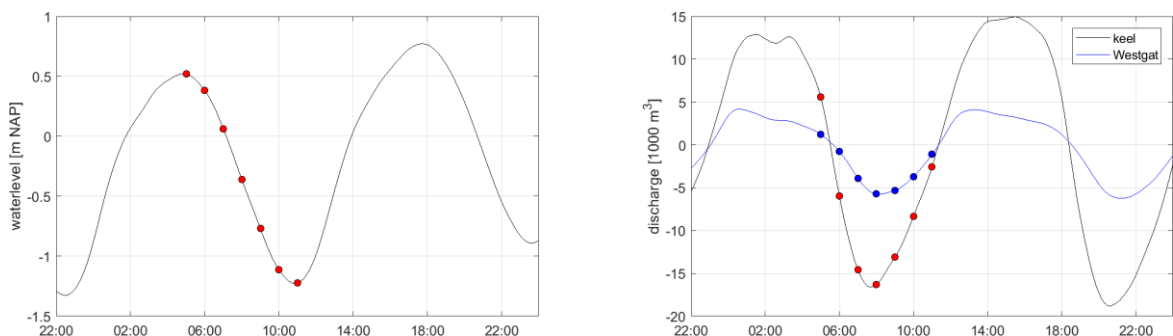
Tijdens hoogwater om 5.00 uur is er op de open zee en in het bekken nog steeds stroming in vloed richting te zien. Met name in de Zoutkamperlaag is nog een duidelijke stroming in de geul te zien. Tussen 5.00 en 6.00 uur draait de stroming om en is om 6.00 uur vrijwel nul op open zee. In de Holwerderbalg is de stroomsnelheid al rond 5.30 uur nul en is om 6.00 al een duidelijke stroming in de geul te zien. Over de gehele buitendelta van het Pinkegat is een noordwestelijke stroming te zien. Op de wadplaten van het Pinkegat is stroming richting de getijdegeultjes te zien. In het deelsysteem Zoutkamperlaag is om 6.00 uur vooral een stroming te zien vanuit de Zoutkamperlaag net ten noorden van het Rif richting het noordwesten en beperkte stroming over de Gronden van het Plaatgat, het ebschild van het Westgat en in de geul Gat van Schiermonnikoog.

Om 7.00 uur nemen de stroomsnelheden in de geulen van het Pinkegat significant toe om rond 8.00 uur hun maximale snelheid te bereiken. De stroming op de buitendelta draait van noordwest richting noord, terwijl die op open zee nog pal west is. In het Westgat wordt de maximale snelheid iets later bereikt, zo rond 9.00 uur. Door de lagere waterstand is dan de stroming meer geconcentreerd in de geul zelf. Rond 8.00 uur is daardoor juist de maximale snelheid over de plaat ten noorden van het Rif. Deze stroming ten noorden van het Rif is relevant voor de ontwikkeling van het Westgat. Hierdoor ontstaat er een nieuwe geul en zullen het debiet en de snelheid door het Westgat afnemen. Ook in het Gat van Schiermonnikoog is de snelheid rond 8.00 uur maximaal.

Om 9.00 uur zijn de snelheden in het Pinkegat al afgenomen en wordt de uitstroom van het Pinkegat enigszins richting het oosten. Om 10.00 uur zien we ook in de Zoutkamperlaag

afname van de snelheden en nog verdere concentratie in de geulen. De uitstroming van het Westgat is nu iets meer noordelijk geworden.

Om 11.00 uur, tijdens laagwater, is in het Pinkegat de stroomsnelheid in de geulen vrijwel nul, behalve bij het uiteinde op de wadplaten waar het water zich nog concentreert. In het Zoutkamperlaag deelsysteem zijn de snelheden ook al zeer laag. Op open zee is de stroming al flink afgenomen maar nog wel richting het westen.



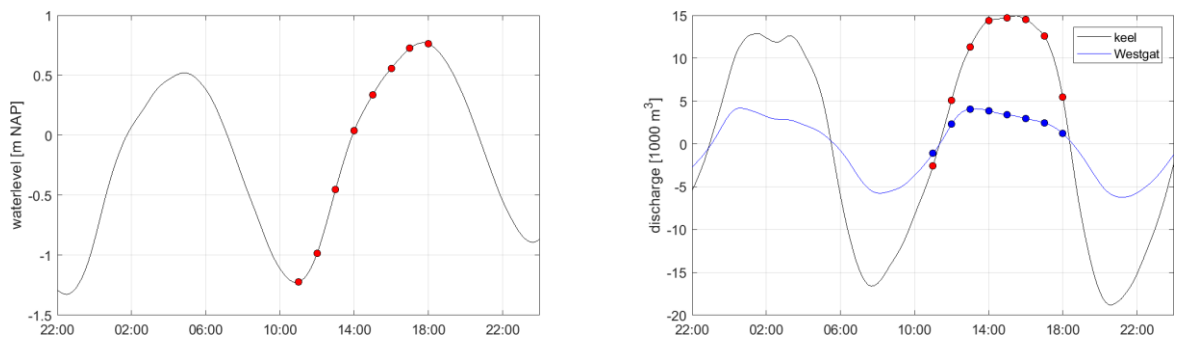
Figuur 4.1 Waterniveau (links) en debiet (rechts) tijdens de eb-periode, zie Figuur 4.3 voor locatie en raai. De rode en blauwe punten geven de tijdstippen aan die zijn weergegeven in Figuur 4.3

Met het opkomende tij is rond 12.00 uur op open zee de stroomsnelheid vrijwel nul. Op de buitendelta's van zowel Pinkegat als Zoutkamperlaag nemen de snelheden over de schilden alweer toe, terwijl in de geulen nog weinig stroming is. De stroming is west tot zuidwest georiënteerd en laat de hoogste snelheden zien op de ebschilden net ten noorden van het Rif, dwars op de Zoutkamperlaag. Op de wadplaten is nog een kleine zeewaarts gerichte stroming te zien.

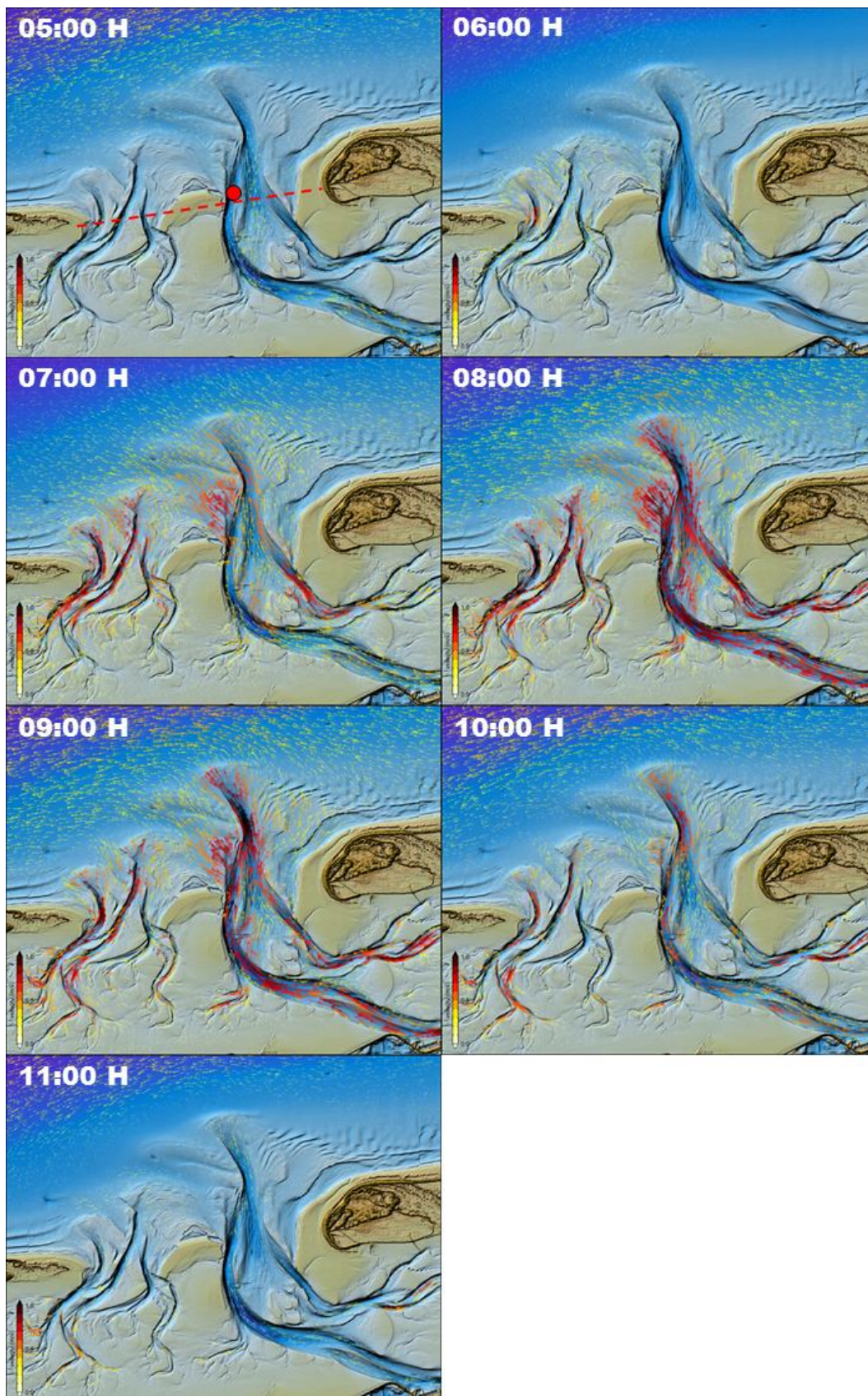
Om 13.00 zijn de snelheden verder toegenomen en hebben ongeveer dezelfde oriëntatie. Op de Gronden van het Plaatgat draait de stroming richting zuid, net als in het Westgat en Zoutkamperlaag. In de Zoutkamperlaag zijn de grootste snelheden in de 'oostelijke tak' ervan te zien. In het Pinkegat systeem zijn alleen in de geul Holwerderbalg significante snelheden te zien, deze liggen beduidend lager dan in de Zoutkamperlaag.

Rond 14.00 uur zijn de maximale snelheden ongeveer bereikt, die wel lager liggen dan de maximale eb snelheden. In het Pinkegat blijft grootste snelheid vooral in de Holwerderbalg, hier zijn nu ook verder richting de wadplaten grotere snelheden te zien. De Zoutkamperlaag toont nu ook grotere snelheden verder naar het zuiden.

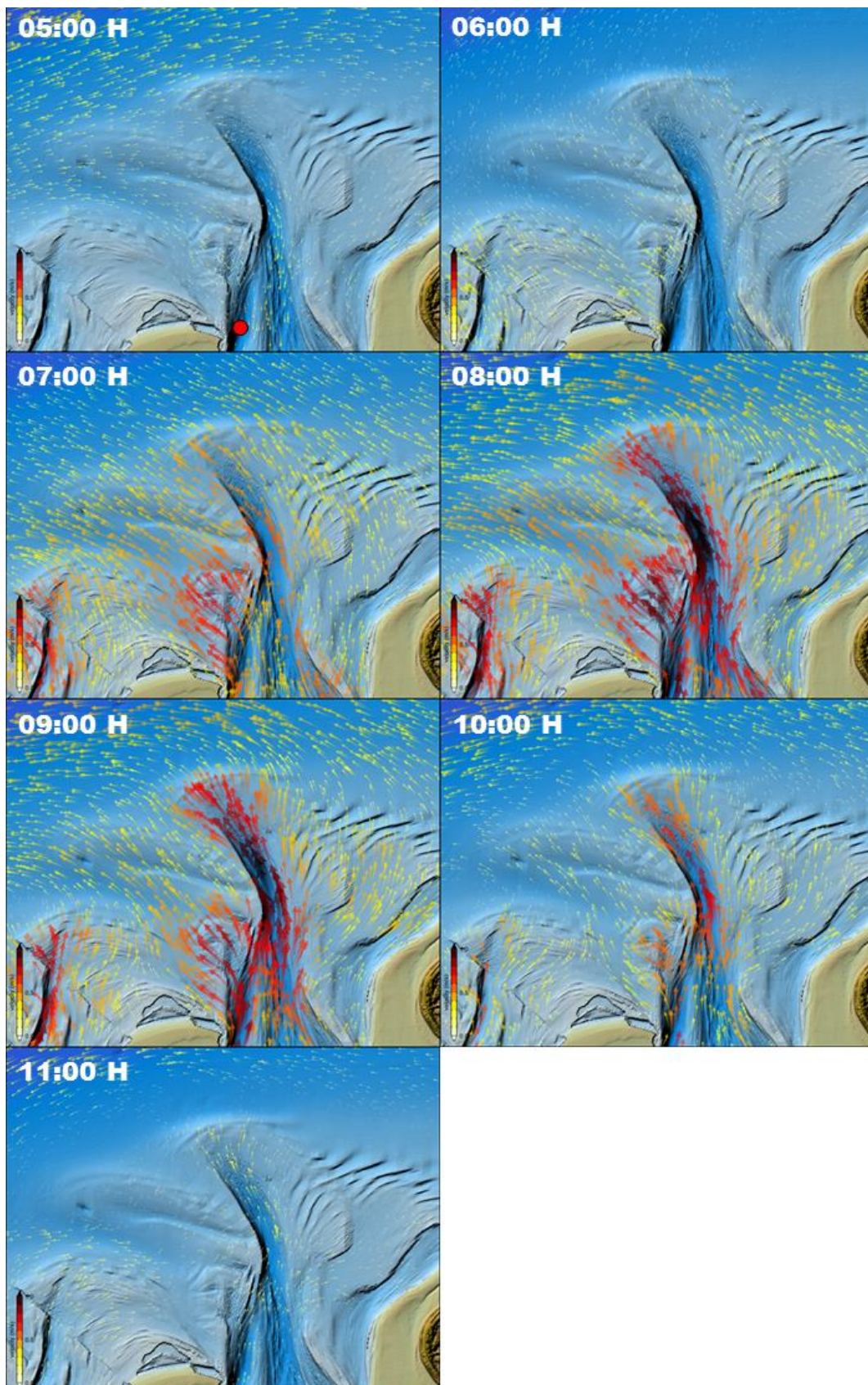
Vanaf 15.00 uur is al een afname in de snelheden te zien, die iets sneller plaatsvindt in de Zoutkamperlaag dan in de Holwerderbalg. Grote delen van de wadplaten liggen nu ook onder water en tonen daar een landwaartse stroming die rond 15.00 uur maximaal is. Op de open zee zijn de snelheden tot 16.00 nog relatief hoog en nemen daarna pas af. De snelheden nemen af tot 18.00 (hoogwater), wanneer er alleen nog in de Zoutkamperlaag stroming is te zien.



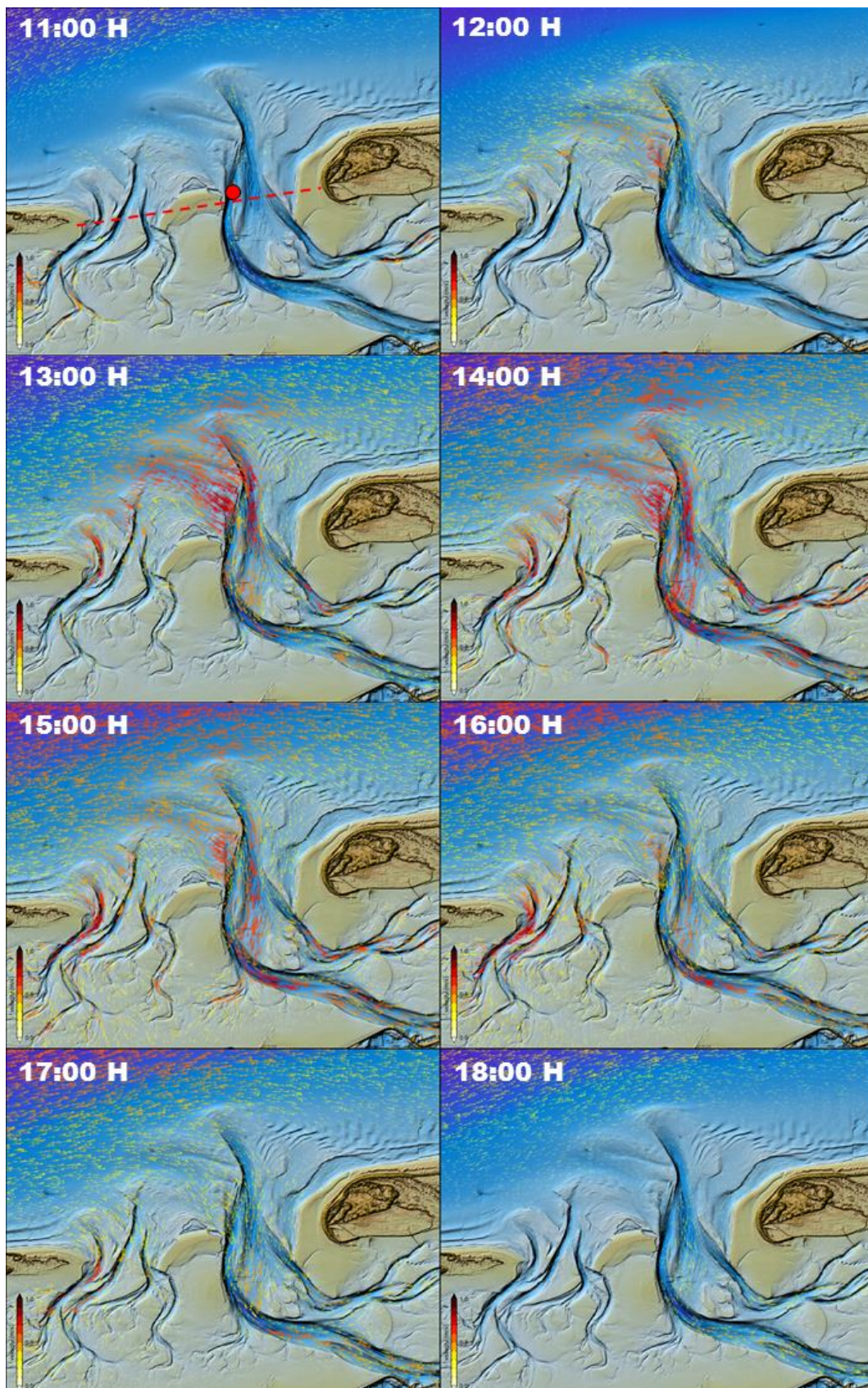
Figuur 4.2 Waterniveau (links) en debiet (rechts) tijdens de vloed-periode, zie Figuur 4.5 voor locatie en raaien. De rode en blauwe punten geven de tijdstippen aan die zijn weergegeven in Figuur 4.5



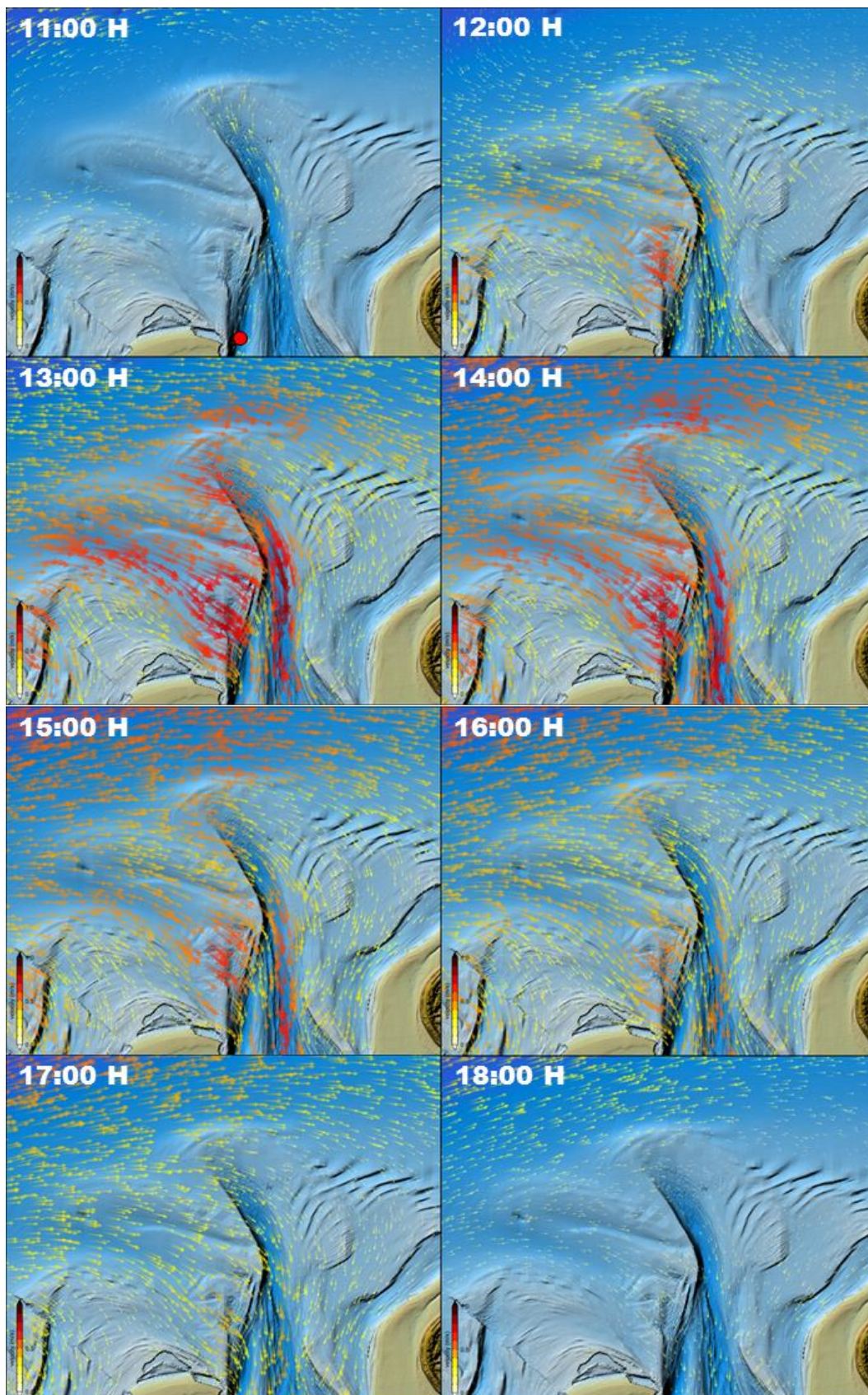
Figuur 4.3 Stroomingen tijdens eb-periode, eerste deelfiguur geeft locatie van waterstand en debietraai weer, zie Figuur 4.1. De kleur geeft de stroomsnelheid aan: geel=0 m/s, zwart=1m/s en hoger.



Figuur 4.4 Detailkaarten van Figuur 4.3 met stromingen tijdens eb-periode, eerste deelfiguur geeft locatie van waterstand weer, zie Figuur 4.1. De kleur geeft de stroomsnelheid aan: geel=0 m/s, zwart=1 m/s en hoger.



Figuur 4.5 Stroomingen tijdens vloed-periode, eerste deelfiguur geeft locatie van waterstand en debietraai weer, zie Figuur 4.2. De kleur geeft de stroomsnelheid aan: geel=0 m/s, zwart=1m/s en hoger.



Figuur 4.6 Detailkaarten met stromingen tijdens vloed-periode, eerste deelfiguur geeft locatie van waterstand weer, zie Figuur 4.2. De kleur geeft de stroomsnelheid aan: geel=0 m/s, zwart=1m/s en hoger.

4.1.2 2005 bathymetrie

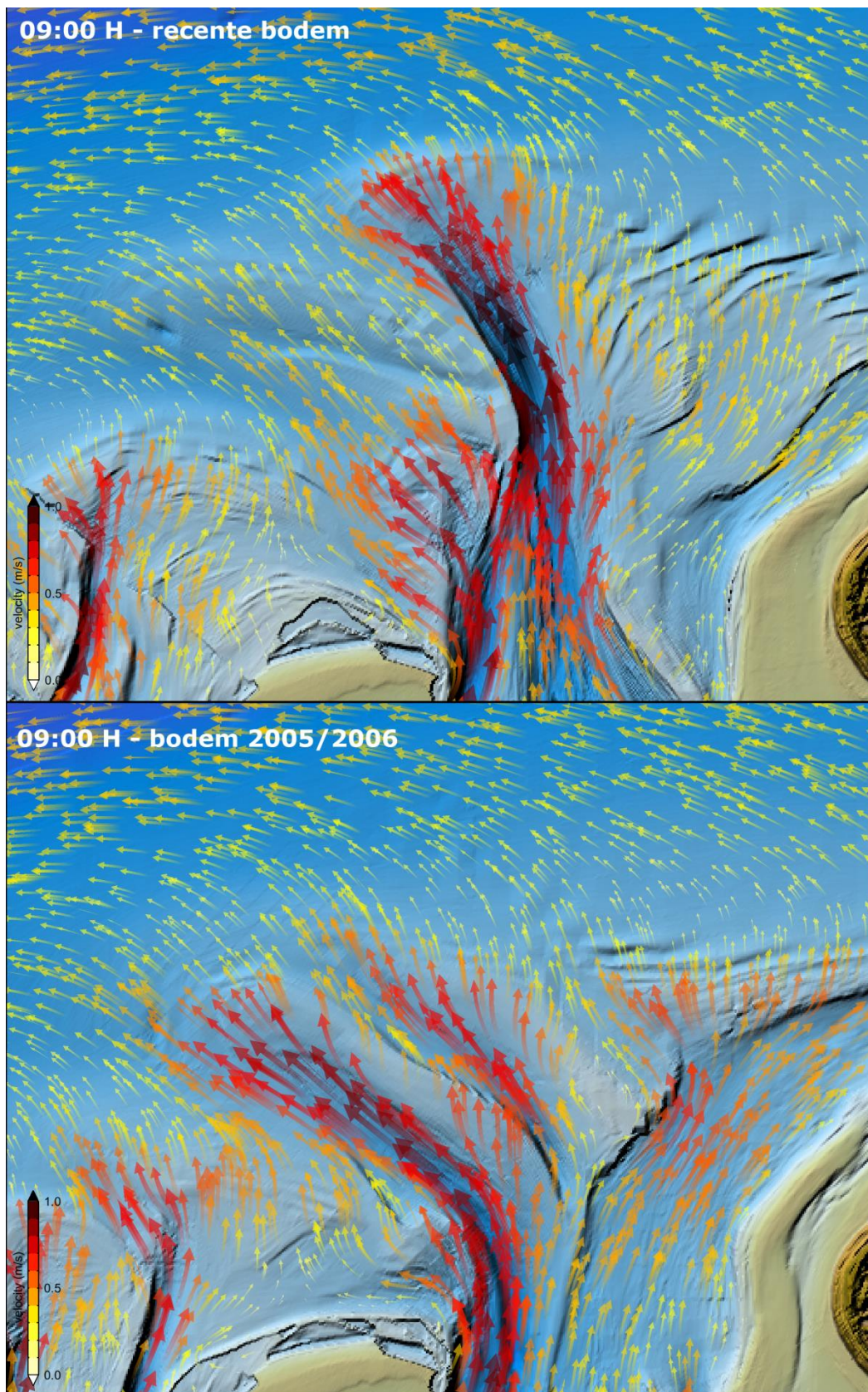
De stromingspatronen zoals berekend met de 2005 bodem zijn getoond voor de tijdstippen met de maximale eb- en vloedsnelheden tezamen met de stromingen met de recente bodem (Figuur 4.7 en Figuur 4.8).

In 2005 is tijdens eb de stroming vanaf de Zoutkamperlaag behoorlijk geconcentreerd in de geul en is er weinig stroming over de platen ten noorden van het Rif. Een kleine stroming blijft noordwaarts gericht over de bank en stroomt via de oude geul richting de Noordzee.

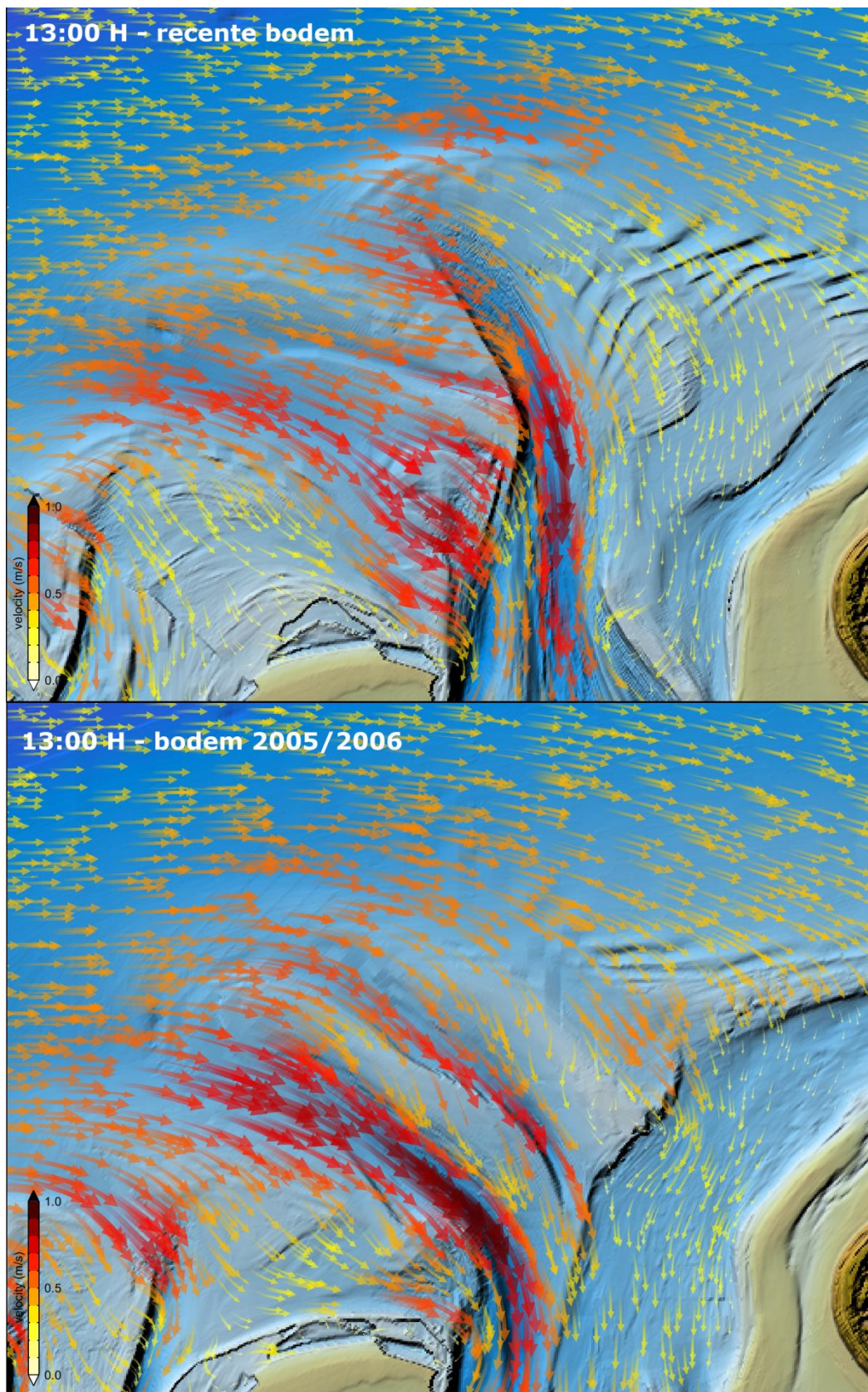
4.1.3 Verschil in stromingspatronen tussen 2017 en 2005 bathymetrie

Het belangrijkste punt waarop de stroming over de recente (2017) bodem verschilt met die van 2005 is de stroming in noordwestelijke richting over de platen ten noorden van het Rif. De stroming door het Plaatgat is in 2005 groter dan in de recente bodem.

Met de vloed is door de oostwaarts georiënteerd stroming deze in 2005 geconcentreerd door de geul (Westgat) zelf, terwijl in de recente bodem de stroming dwars op het Westgat/Zoutkamperlaag is.



Figuur 4.7 Detailkaart met stroming tijdens eb voor de recente bodem (boven) en de 2005 bodem (onder)



Figuur 4.8 Detailkaart met stroming tijdens vloed voor de recente bodem (boven) en de 2005 bodem (onder)

4.2 Stroomsnelheden

In de Zoutkamperlaag en het Westgat zijn de stroomsnelheden geanalyseerd doormiddel van vaste observatiepunten in het model en de afstanden langs deze punten vanaf het eerst punt gemeten (Figuur 4.9 en Figuur 4.10). De verschillen tussen de verschillende bodems en het effect van wind zijn hieronder beschreven.

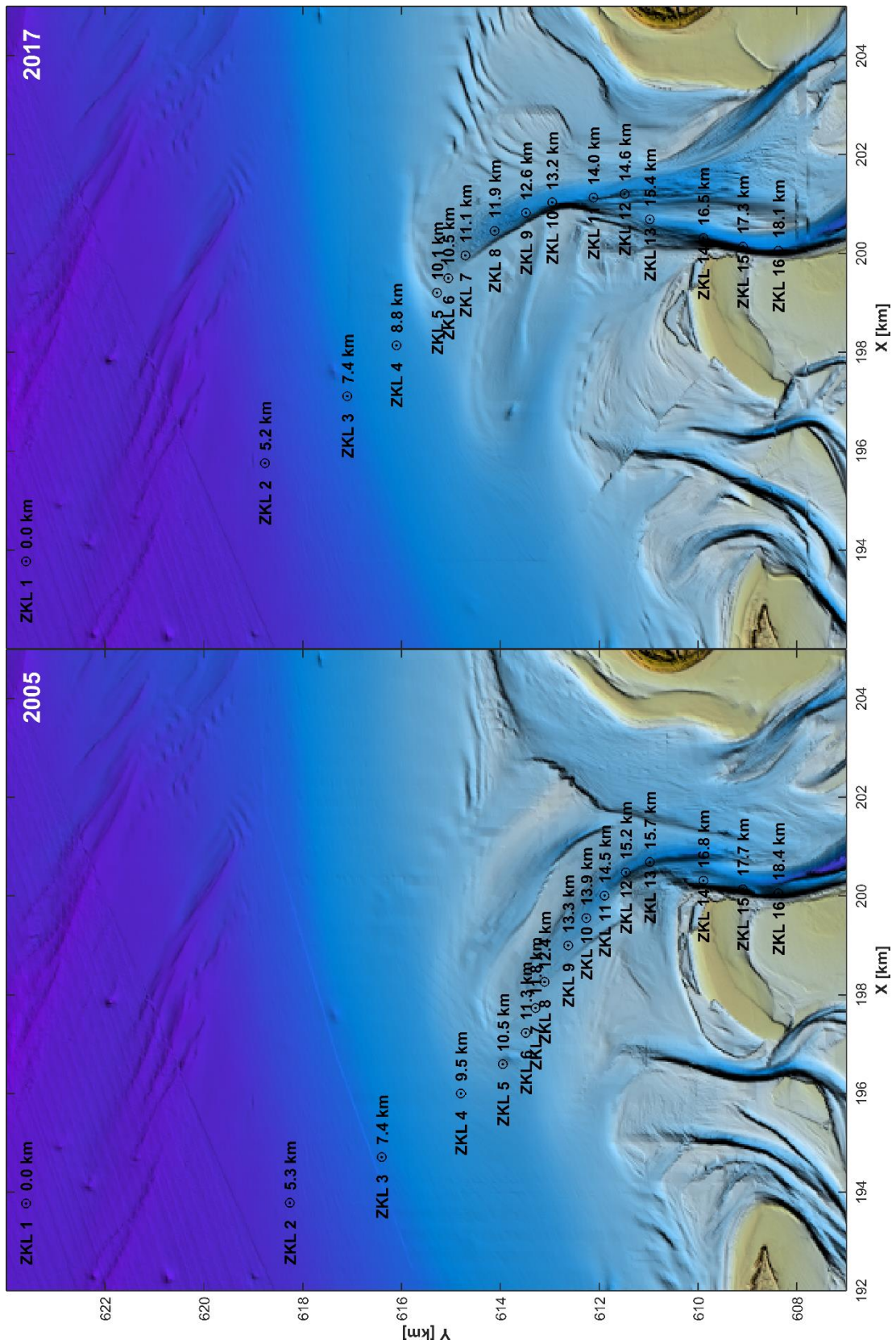
De stroomsnelheden ter hoogte van de drempel voor de maand maart zijn te zien in Figuur 4.11. Hierin is de springtij-doodtij cyclus duidelijk te zien met maximale ebsnelheden rondom 1 m/s tijdens springtij en rondom 0,7 m/s tijdens doodtij en maximale vloednelheden rondom 0,7 m/s voor springtij en rondom 0,4 m/s voor doodtij. De maximale snelheden zijn tijdens eb 0,2-0,3 m/s hoger dan tijdens vloed.

De snelheden nemen af in noordelijke richting tijdens eb in zowel de huidige bathymetrie als met de 2005 bathymetrie (Figuur 4.12 en Figuur 4.13). Tijdens vloed is voor de huidige bathymetrie deze afname in noordelijke richting niet te zien, maar wel voor de 2005 bathymetrie. In het laatste geval zijn de maximale vloednelheden dan ook aanzienlijk hoger dan met de huidige bathymetrie. Ook is de snelheid tijdens eb veel minder symmetrisch dan met de recente bathymetrie.

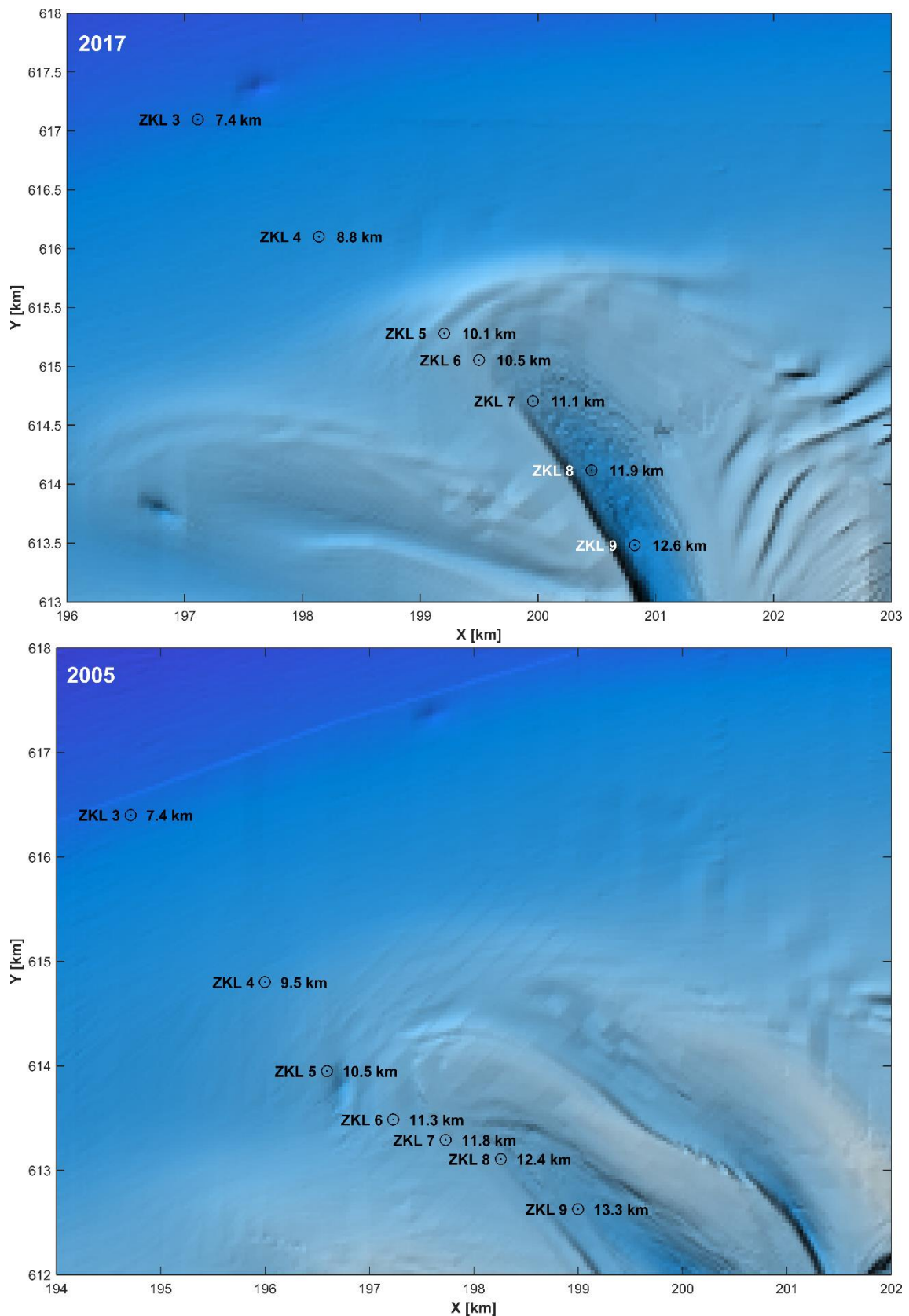
Het effect van wind op de stroomsnelheid over de drempel is voor observatiepunt ZKL 05 getoond in Figuur 4.14. De verschillen in stroomsnelheid zijn maximaal ruim 0,2 m/s, welke bereikt worden bij windsnelheden van ruim boven de 10 m/s. Bij windsnelheden tot ca. 5 m/s is het effect relatief klein.

De afname van de snelheid tijdens eb in noordelijke richting is te zien vanaf ongeveer 13 km in de recente bodem en iets zuidelijker, vanaf 15 km, in de 2005 bodem (Figuur 4.15 en Figuur 4.16). Hoewel in de recente bodem de maximale snelheid in de geul hoger ligt (ruim 1,5 m/s t.o.v. ruim 1,2 m/s), is de snelheid ter hoogte van de drempel vergelijkbaar. Deze neemt af van ruim 1 m/s tot iets onder de 0,5 m/s.

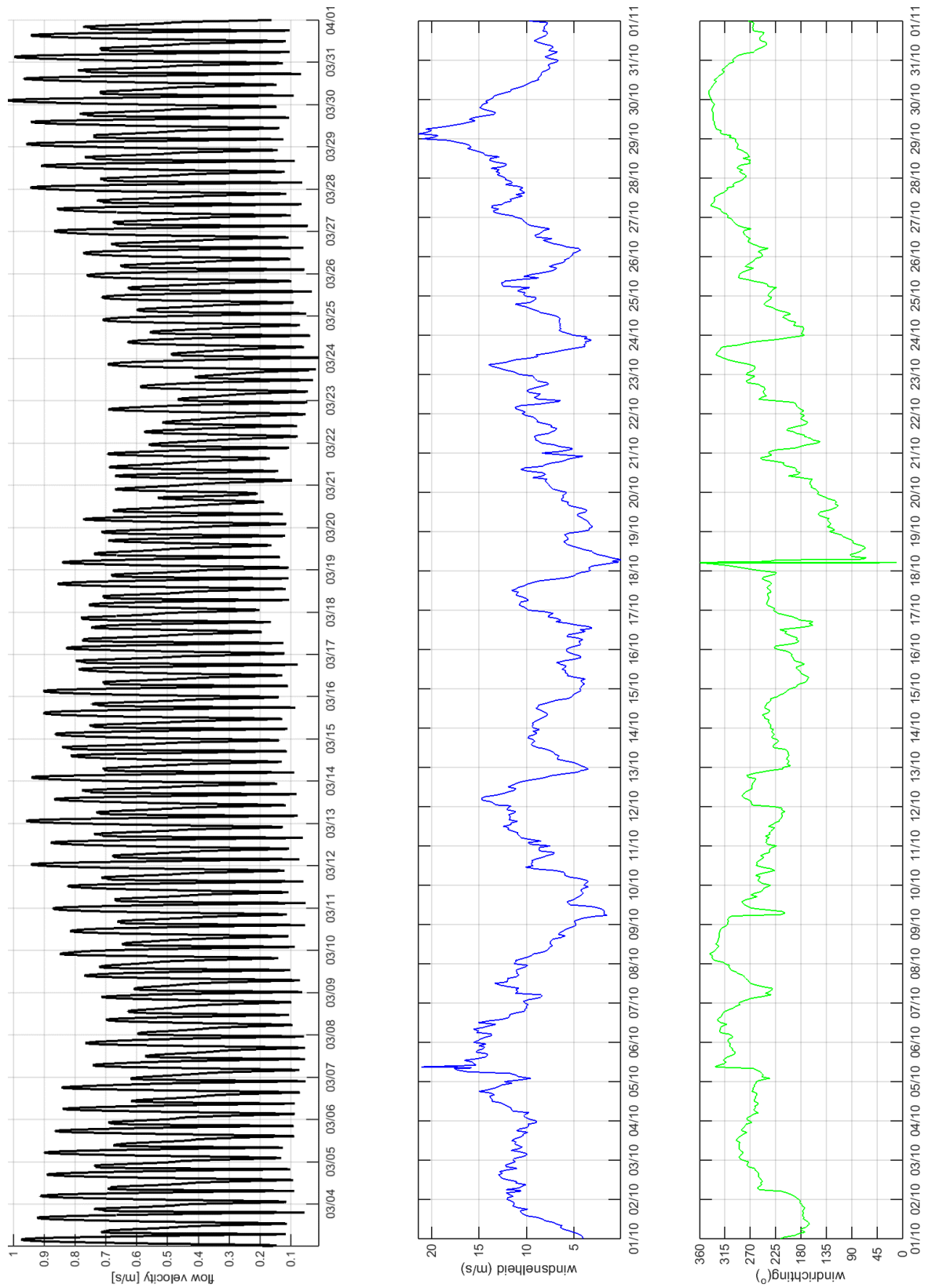
Tijdens vloed is de snelheid hoger in de 2005 bodem, met maximale snelheden ten zuiden van de drempel van net iets boven de 1 m/s. De maximale snelheden in de geul met de recente bodem liggen net iets boven de 0,8 m/s.



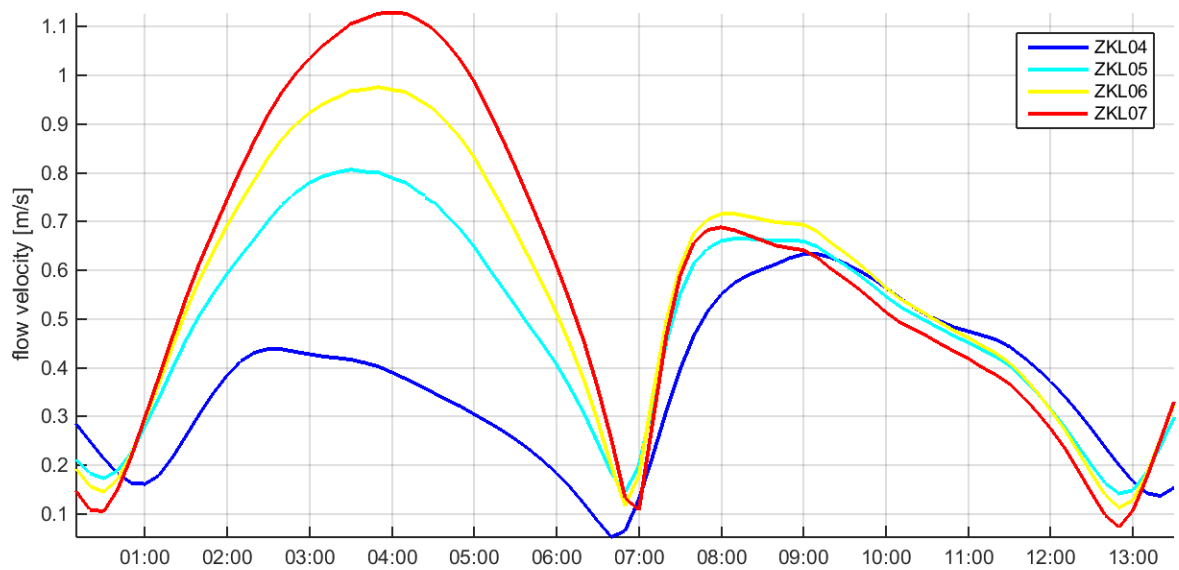
Figuur 4.9 Overzicht van observatiepunten en de afstand langs deze punten op de Noordzee en in de geulen Westgat en Zoutkamperlaag voor de recente bodem (boven) en de bodem rond 2005 (onder)



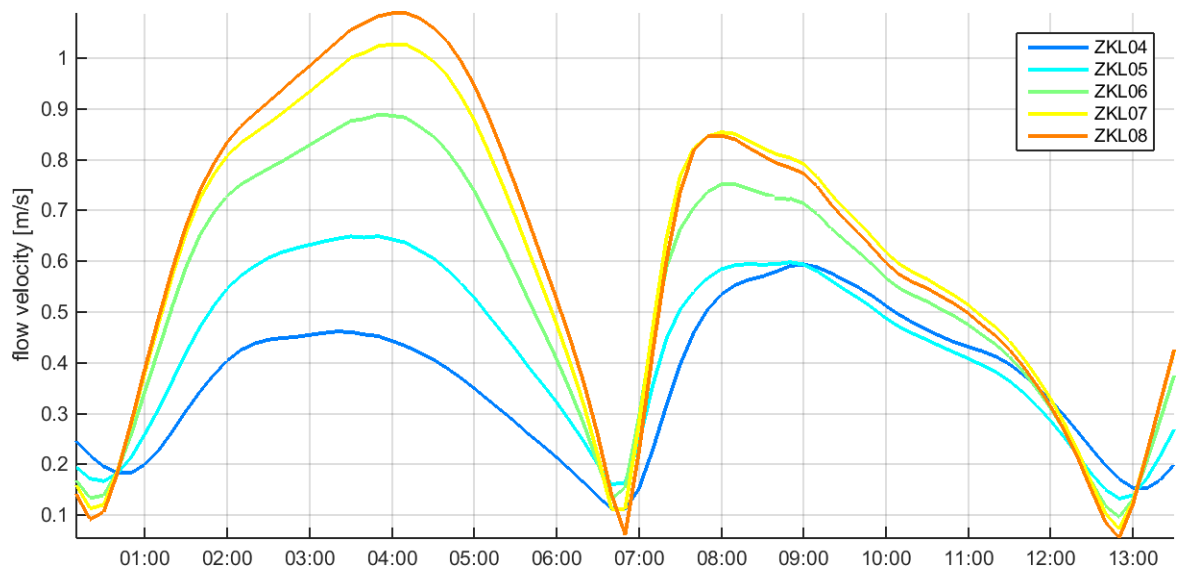
Figuur 4.10 Overzicht van observatiepunten en de afstand langs deze punten rondom de drempel voor de recente bodem (boven) en de bodem rond 2005 (onder)



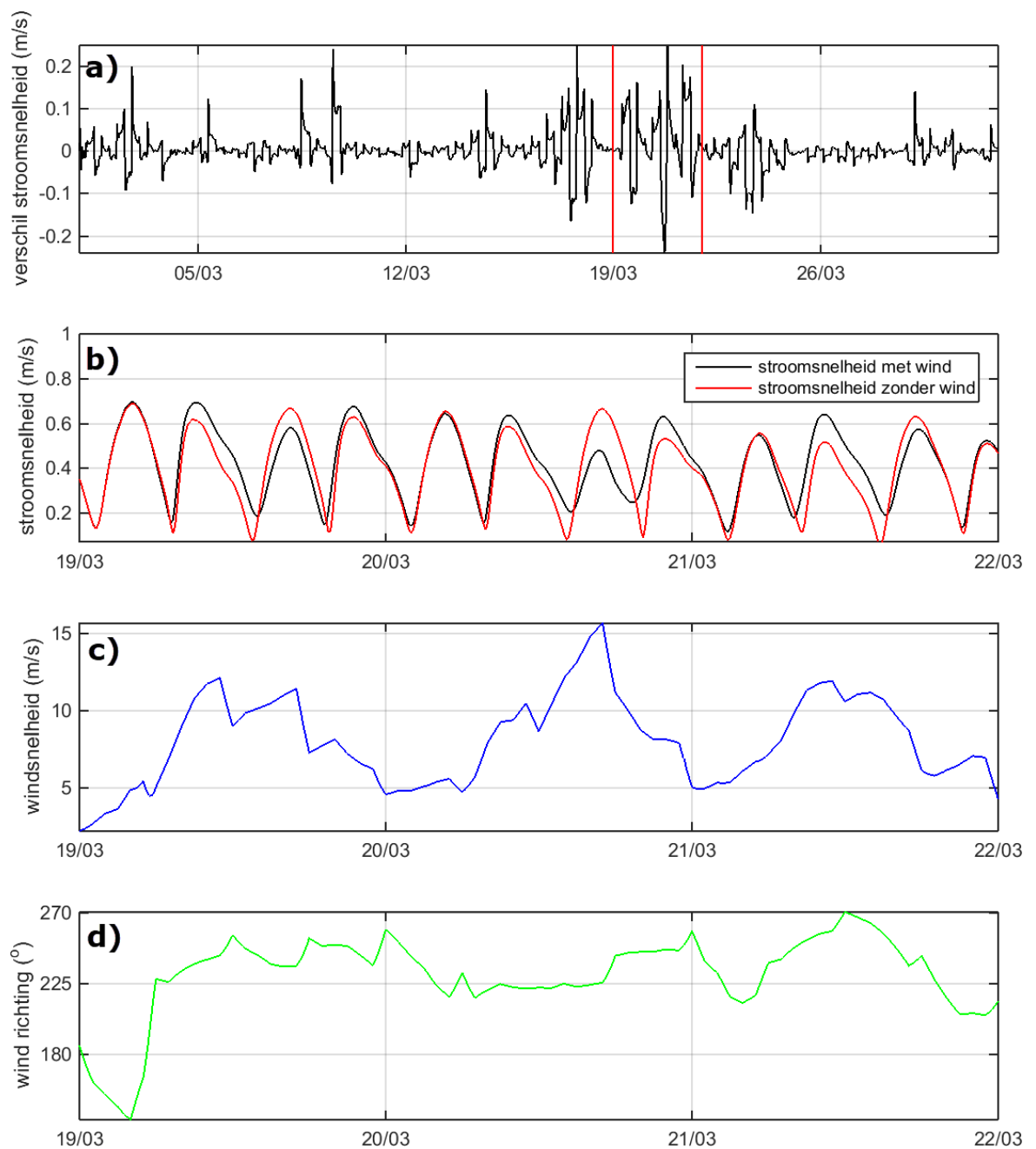
Figuur 4.11 Magnitude van de stroomsnelheden op de drempel (locatie ZKL06) in maart voor de recente bathymetrie (links); windsnelheid (midden) en windrichting (rechts)



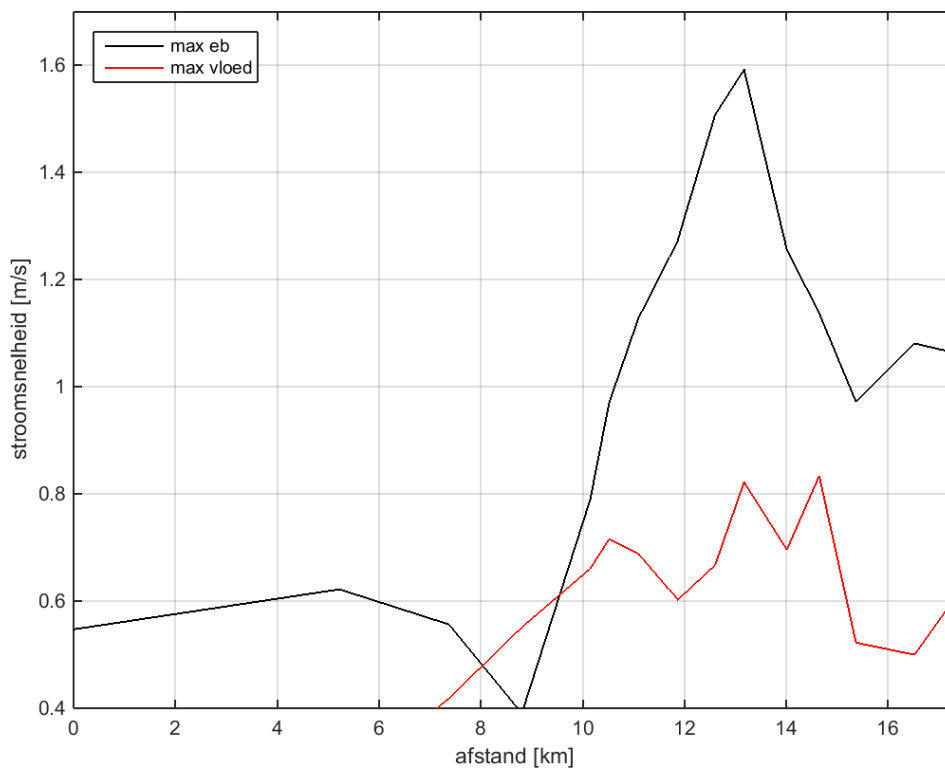
Figuur 4.12 Magnitude van de stroomsnelheden over de drempel van zuid (ZKL 07) naar noord (ZKL 04) voor een volledig getij op 3 maart 2017 met de recente bathymetrie



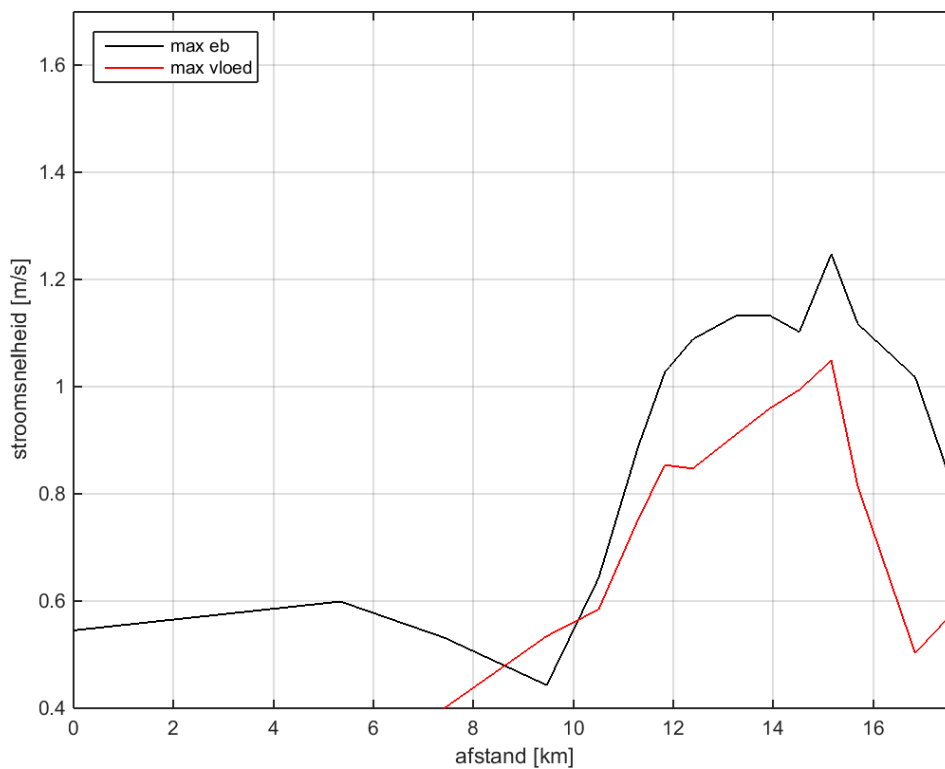
Figuur 4.13 Magnitude van de stroomsnelheden over de drempel van zuid (ZKL 08) naar noord (ZKL 04) voor een volledig getij op 3 maart 2017 met de bathymetrie van 2005



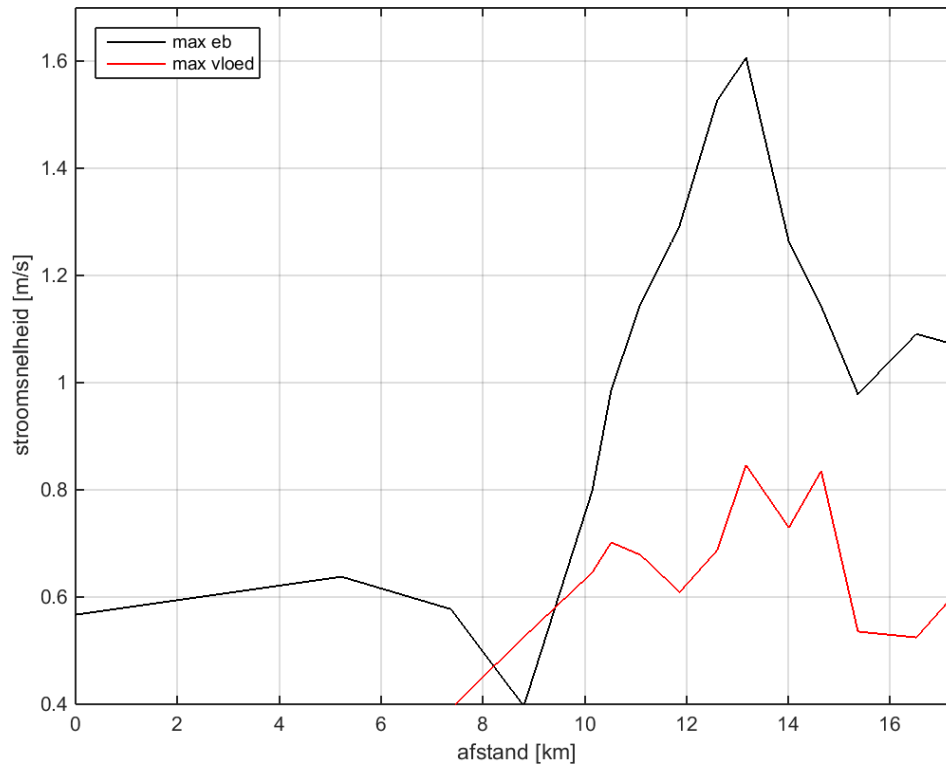
Figuur 4.14 Effect van wind op de magnitude van de stroomsnelheid over de drempel (ZKL 05) van het Westgat (recente bathymetrie): a) Verschil in stroomsnelheid tussen het model met en zonder wind voor heel maart, verticale rode lijnen geven periode aan van b) t/m d); b) stroomsnelheid voor de berekeningen met en zonder wind van 19-22 maart; c) windsnelheid van 19-22 maart; d) windrichting van 19-22 maart.



Figuur 4.15 Verloop maximale stroomsnelheidsmagnitude tijdens eb (3 maart 2017 04.00 uur, zie Figuur 4.12) en vloed (3 maart 2017 08.00 uur) door het Westgat/Zoutkamperlaag met de recente bathymetrie



Figuur 4.16 Verloop maximale stroomsnelheidsmagnitude tijdens eb (3 maart 2017 04.00 uur, zie Figuur 4.13) en vloed (3 maart 2017 08.00 uur) door het Westgat/Zoutkamperlaag met de bathymetrie van 2005



Figuur 4.17 Verloop maximale stroomsnelheidsmagnitude tijdens eb (3 maart 2017 04.00 uur, zie Figuur 4.12) en vloed (3 maart 2017 08.00 uur) door het Westgat/Zoutkamperlaag met de recente bathymetrie, zonder wind

4.3 Debieten

Bij de beschrijving van de debieten in deze paragraaf dienen twee zaken in ogenschouw te worden gehouden:

- 1 De debieten zijn (nog) niet gevalideerd, waardoor vooral de relatieve verschillen en de trends in de resultaten relevant zijn, meer dan de absolute waarden van de snelheden.
- 2 In het model zijn getij en setup niet gescheiden. Hierdoor zullen de beschreven effecten mogelijk ten dele door de setup komen, en niet enkel door windcondities.

De resulterende debieten van het Wadsea model zijn vergeleken met modelresultaten zoals gepubliceerd door Duran-Matute et al. (2014), zie Tabel 4.1. Doordat de periode verschillend is, kunnen de uitkomsten alleen op hoofdlijn worden vergeleken. Bovendien maken zij gebruik van andere modelsoftware, het 'General Estuarine Transport Model, GETM', waardoor verschillen waarschijnlijk zijn. Het grootste verschil is te zien in het debiet door het Marsdiep – factor 4 verschil - en het Eijerlandse gat - andere richting. Het niet meenemen van de afvoer vanaf het IJsselmeer door de sluisen bij Kornwerderzand en Den Oever in deze studie zal hier vermoedelijk grotendeels verantwoordelijk voor zijn. Dit heeft naar verwachting weinig invloed op de stromingen en debieten in het Friesche Zeegat. Duran-Matute et al. (2014) rapporteren een gemiddelde uitstroom vanaf het IJsselmeer van 20 miljoen m³ per getij. De overige debieten hebben dezelfde orde grootte en richting.

In het gedetailleerde model wijkt het netto debiet door de keel van het Friesche Zeegat aanzienlijk af van het grovere Wadsea model. Deze afwijking is vermoedelijk het gevolg van de meer gedetailleerde bathymetrie, waardoor de geulwanden steiler zijn en de platen iets anders zijn. Hierdoor wordt de stroming dwars op de geul kleiner en is de stroming rondom de platen bij laagwater anders. Zonder metingen ter calibratie kan niet worden aangegeven welk model juist is. In principe wordt er nu vanuit gegaan dat de stroming in het gedetailleerde model beter is.

Tabel 4.1 Netto debiet door verschillende zeegaten en het wantij onder Terschelling zoals gerapporteerd door Duran-Matute en gebaseerd op het Wadsea model

Locatie	Duran-Matute (2014) Periode: 2009-2010 Miljoen m ³ per getij	Deze studie (Wadsea)* Periode: 2017, recente bodem Miljoen m ³ per getij
Marsdiep	-17	-4
Eijerlandse gat	-4	2
Vlie	22	32
Ameland	-12	-23
Friesche zeegat	-8	-6 (Wadsea) / -1 (detailmodel)
Wantij Terschelling	23	30

* in deze studie is geen afvoer vanuit het IJsselmeer meegenomen

De debieten over de wantijen en door de keel van het zeegat hangen sterk samen met de windcondities (Figuur 4.18 en Figuur 3.7). Zonder wind verloopt het cumulatieve debiet lineair, met ca. 1000 miljoen m³ over beide wantijen richting het bekken en ca. 2000 miljoen m³ netto uitstroom door de keel. Over het wantij onder Schiermonnikoog is zonder wind ook netto stroming richting het Friesche Zeegat. Dit komt mogelijk door waterstandsetup, die ook in de berekeningen zonder wind aanwezig is.

De toevoeging van wind laat nog steeds een netto debiet over het Ameland wantij richting het Friesche Zeegat zien, dat over heel 2017 gezien ruim zesmaal groter is dan zonder wind. Het transport over het wantij onder Schiermonnikoog is flink toegenomen en van richting veranderd: oostwaarts, richting het Groninger wad. De toename over het Ameland Wad is echter veel groter dan het verlies over het Groninger Wad waardoor de uitstroom door de keel ook sterk toeneemt.

Gedurende het jaar zijn er echter ook periodes te zien met weinig netto uitstroom, zoals in maart, mei en juli. Begin september is er ca. een derde van het totale debiet over het Ameland wantij gestroomd, in de resterende vier maanden van het jaar neemt de netto stroomsnelheid dus significant toe. In de maand oktober is er netto ruim 1200 miljoen m³ over het wantij gestroomd, terwijl dat in maart minder dan 400 miljoen m³ was (Figuur 4.19).

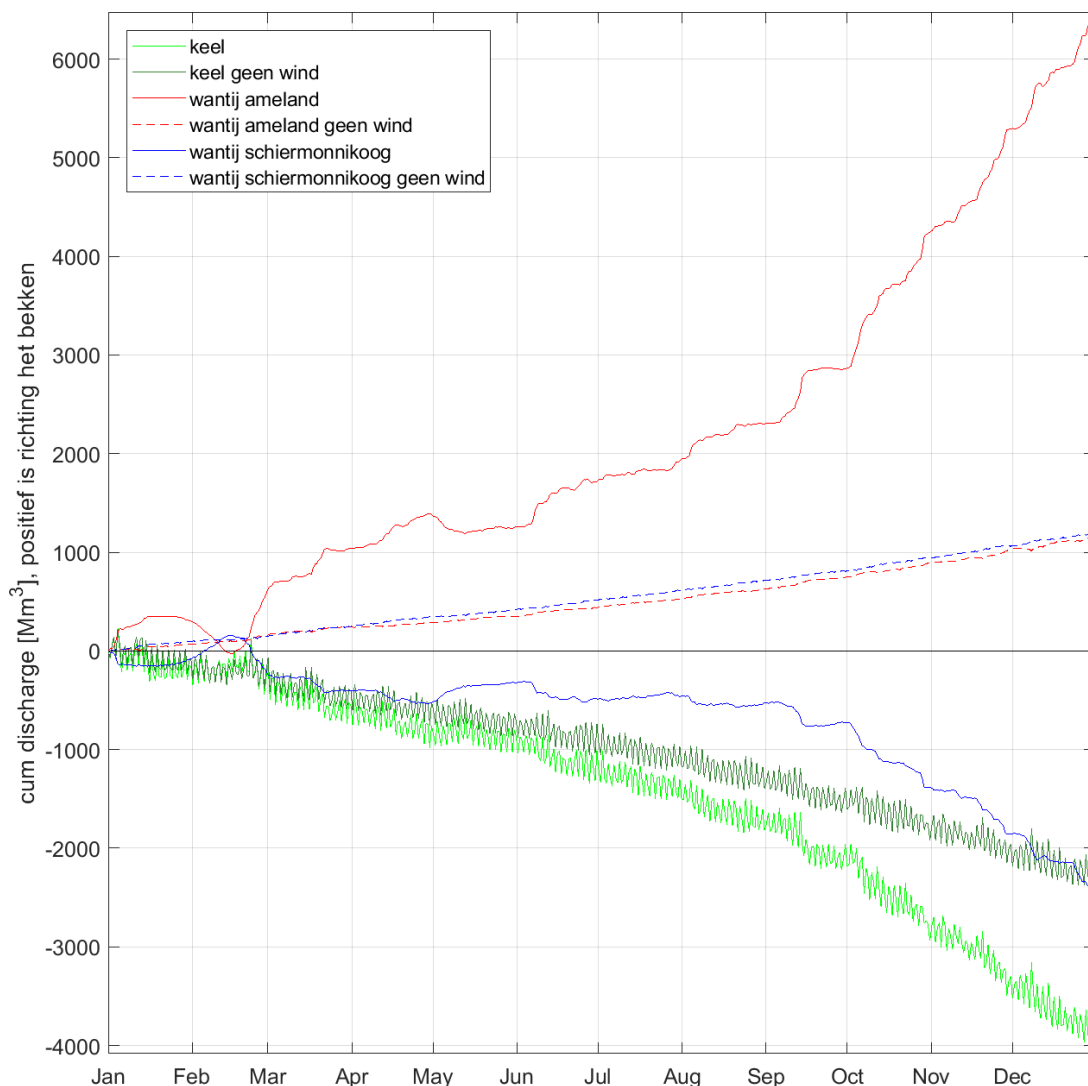
De stabiele periodes hangen duidelijk samen relatief lage windsnelheden en een oostelijke component. De sterke oostelijke stroming hangt samen met de grotere windsnelheden in herfst en winter die een veel sterkere westelijke component hebben. Gemiddeld over heel 2017 genomen is de wind uit het westen dan ook dominant (Figuur 3.8).

Uit de debieten door de verschillende geulen op de buitendelta is te zien dat de verschillende windcondities ook effect hebben op de buitendelta (Figuur 4.20 en Figuur 4.21). Het debiet door alle geulen is in oktober hoger dan in maart, maar ook de verhouding wordt helemaal anders: de noordelijke geul laat een veel grotere verandering zien dan de andere. Het debiet door het Westgat zelf is in oktober een stuk minder toegenomen dan dat van de andere geulen. De debieten laten ook zien dat de netto stroming door het Westgat noordwaarts is, terwijl de netto stroming over de drie andere dwarsdoorsnedes oostwaarts is.

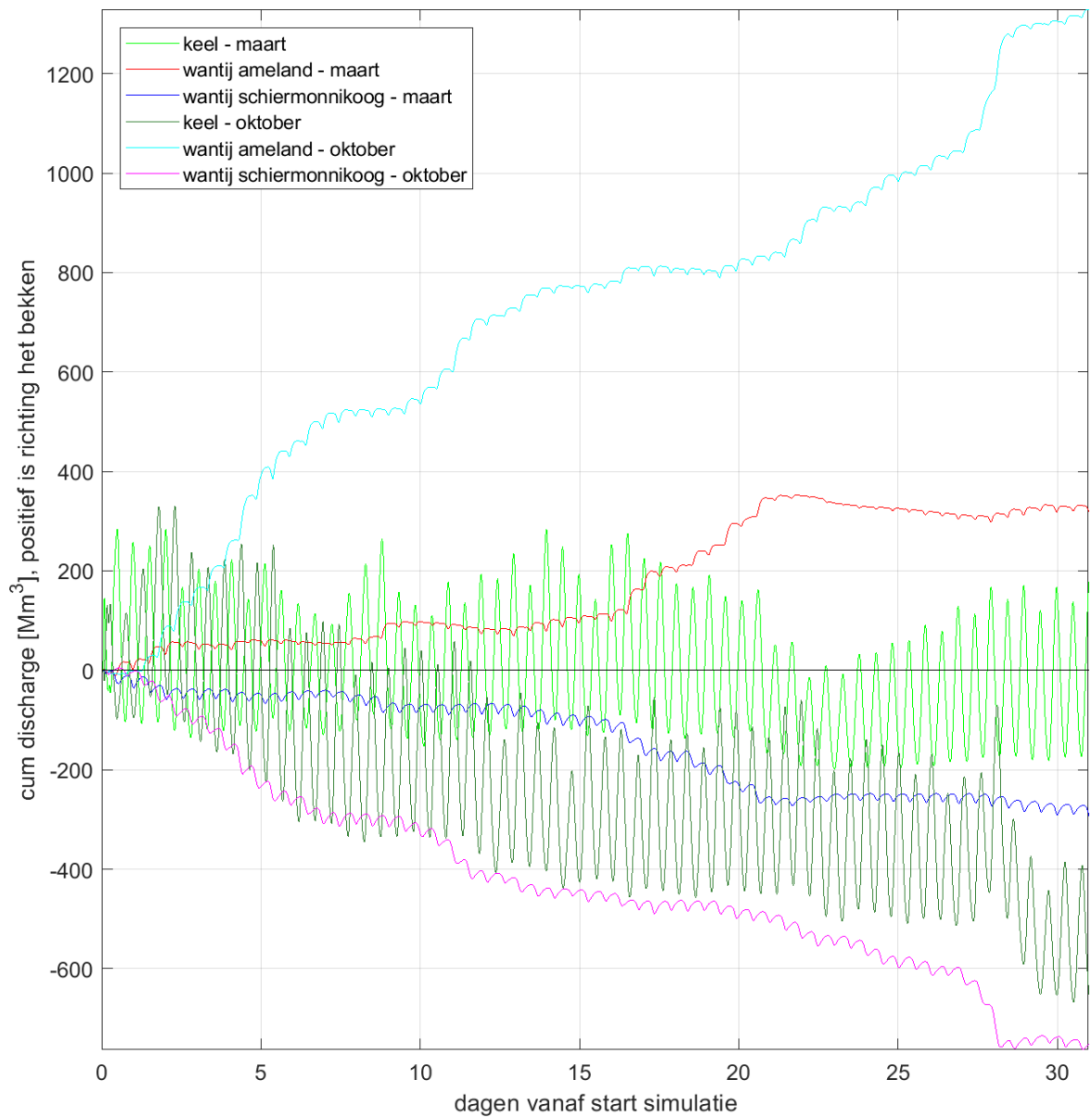
Een overzicht van de netto debieten omgerekend naar 1 getij is te zien in Figuur 4.22 voor de berekeningen met en zonder wind, waarin het debiet door de keel is opgesplitst in de debieten door het Pinkegat en de Zoutkamperlaag.

In de berekening met wind is er een groot verschil te zien tussen de debieten in maart en oktober, zoals ook hierboven beschreven. In maart is het debiet door de Zoutkamperlaag (6,1 miljoen m³) groter dan de uitstroom in westelijke richting over het wantij bij Schiermonnikoog (4,5 miljoen m³). Er is dus een netto stroming over het wantij van het Rif in oostelijke richting, die bijdraagt aan de netto uitstroom door het Pinkegat (7,1 miljoen m³). In oktober is de westelijke stroming als gevolg van de windcondities zo groot (22,1 miljoen m³ bij Ameland en 12,4 miljoen m³ bij Schiermonnikoog) dat er ook over het wantij van het Rif een westelijke netto debiet is: 13,3 miljoen m³ stroomt uit door het Pinkegat, waarna er nog 8,8 miljoen m³ richting het Zoutkamperlaag deelsysteem stroomt. De netto import door de Zoutkamperlaag is nu ook aanzienlijk kleiner (3,6 miljoen m³). Er is een relatief groot verschil tussen de bruto debieten over de wantijen in westelijke en oostelijke richting: in maart is dat ongeveer een factor 1,5; in oktober een factor 2 (Schiermonnikoog) tot meer dan 3 (Ameland) voor de berekeningen met wind.

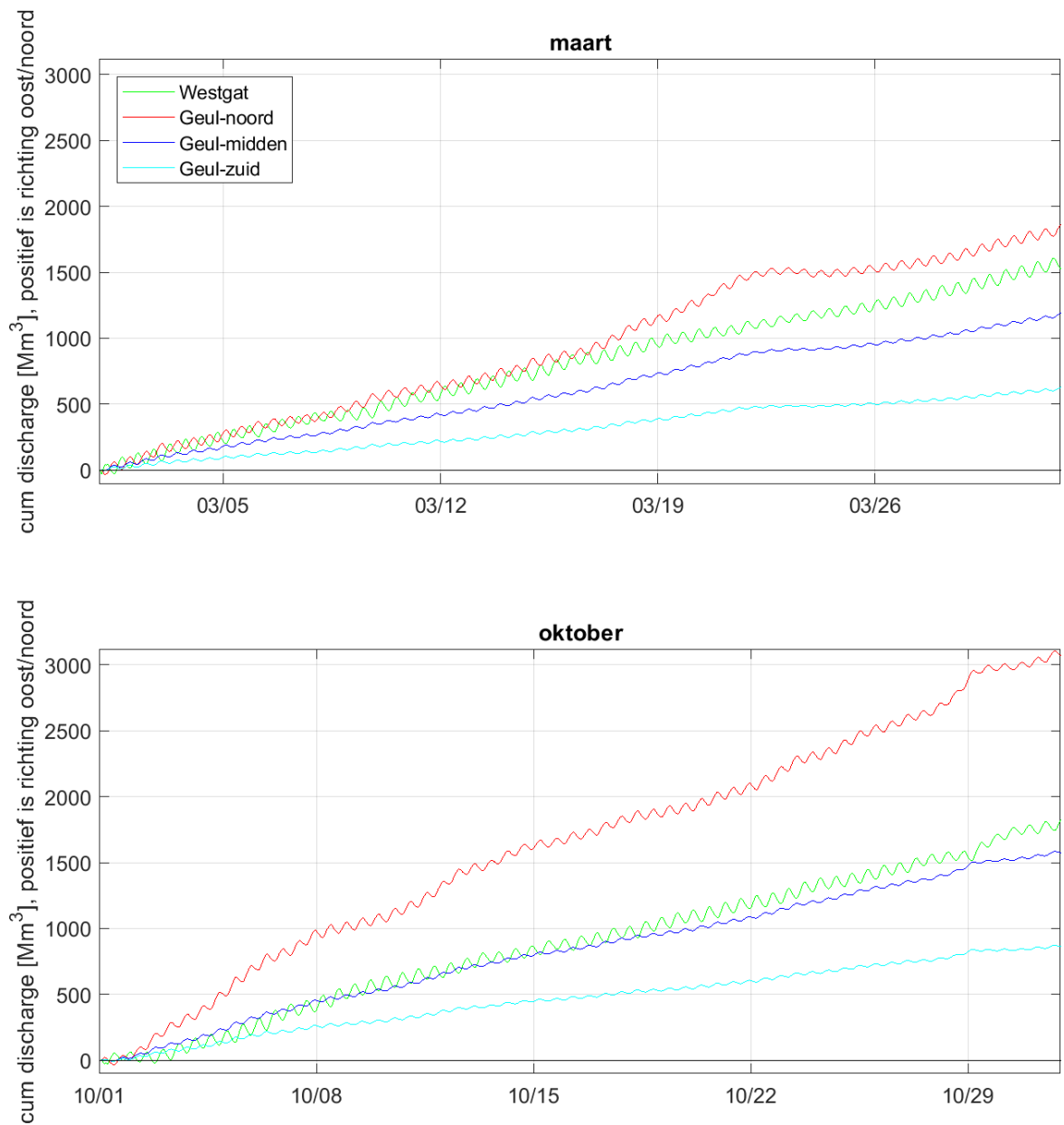
In de situatie zonder wind is nog steeds een verschil te zien tussen de maanden maart en oktober. Dit verschil kan twee oorzaken hebben: 1) in maart is er driemaal springtij en tweemaal doortij, terwijl in oktober tweemaal springtij en driemaal doortij optreedt en 2) naast getij is ook setup meegenomen in de randvoorwaarden, die zal verschillen in maart en oktober. Beide maanden laten echter duidelijk zien dat vooral het debiet over de wantijen veel kleiner is dan in de situatie met wind. De netto import door de Zoutkamperlaag is nu van dezelfde orde grootte als de export door het Pinkegat, wat dus over het wantij van het Rif in westelijke richting stroomt. Dit verschil wordt veroorzaakt door de snellere propagatie van het getij door de Zoutkamperlaag: het hoogwater is iets eerder bij het Pinkegat aanwezig, maar dringt daarna de Zoutkamperlaag veel sneller binnen waardoor er een verhang in westelijke richting ontstaat. Dit is ook te zien in de stroomsnelheden (vorige paragraaf), die sneller toenemen in de Zoutkamperlaag. De netto stroming maakt dus een 'klokwaartste' beweging, maar is slechts een paar procent van de bruto in- en uitstroom door beide systemen. In maart is door het Pinkegat de instroom ca. 93 miljoen m³ per getij en de uitstroom ca. 98 miljoen m³ per getij, door de Zoutkamperlaag is de instroom ca. 205 miljoen m³ per getij en de uitstroom ca. 200 miljoen m³ per getij.



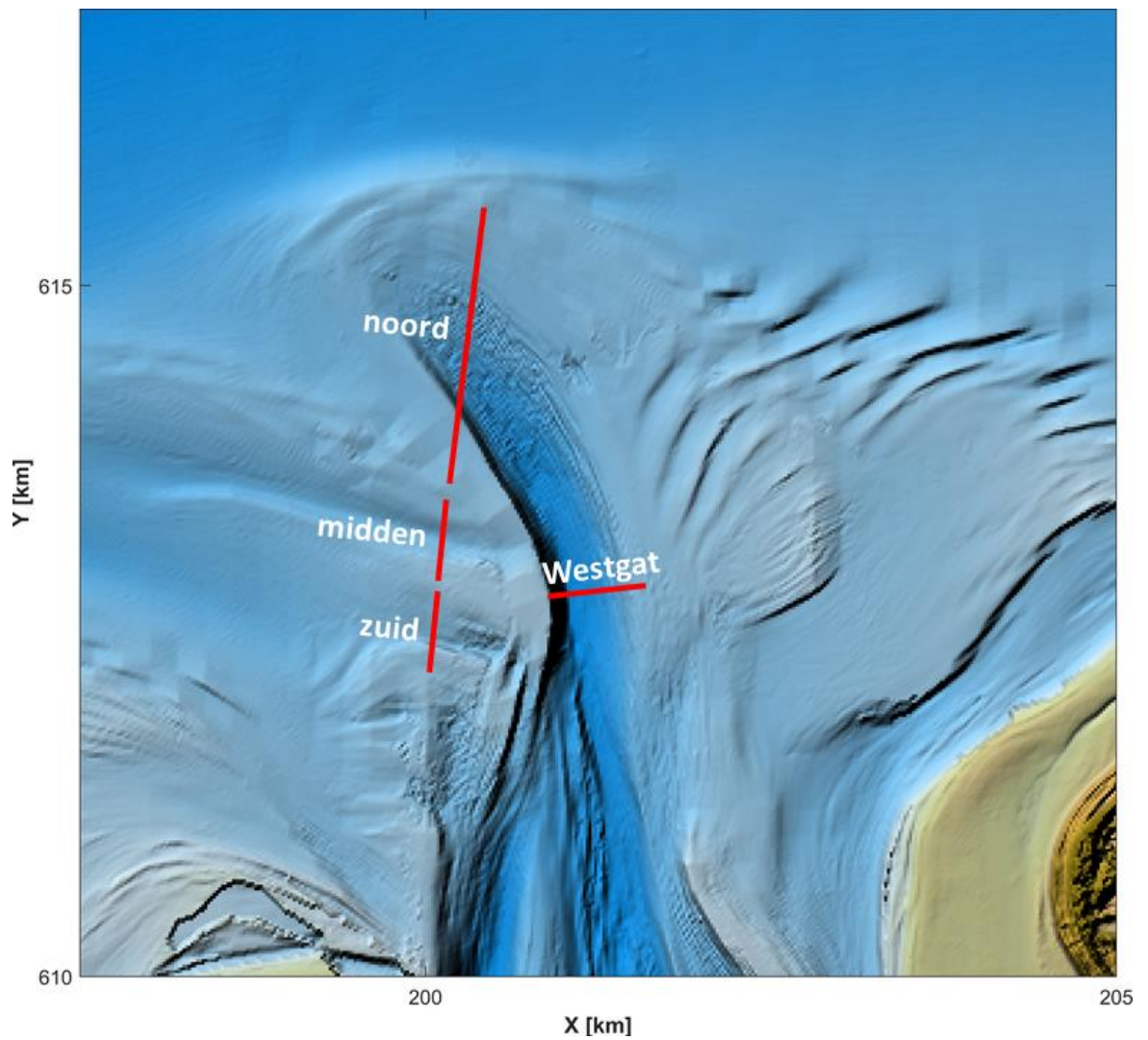
Figuur 4.18 Cumulatief debiet over de wantijen en door de keel, voor simulaties met en zonder wind (Wadsea model). Het debiet richting het bekken is positief in deze grafiek, hierdoor is stroming naar het oosten positief voor het wantij van Ameland maar negatief voor het wantij van Schiermonnikoog.



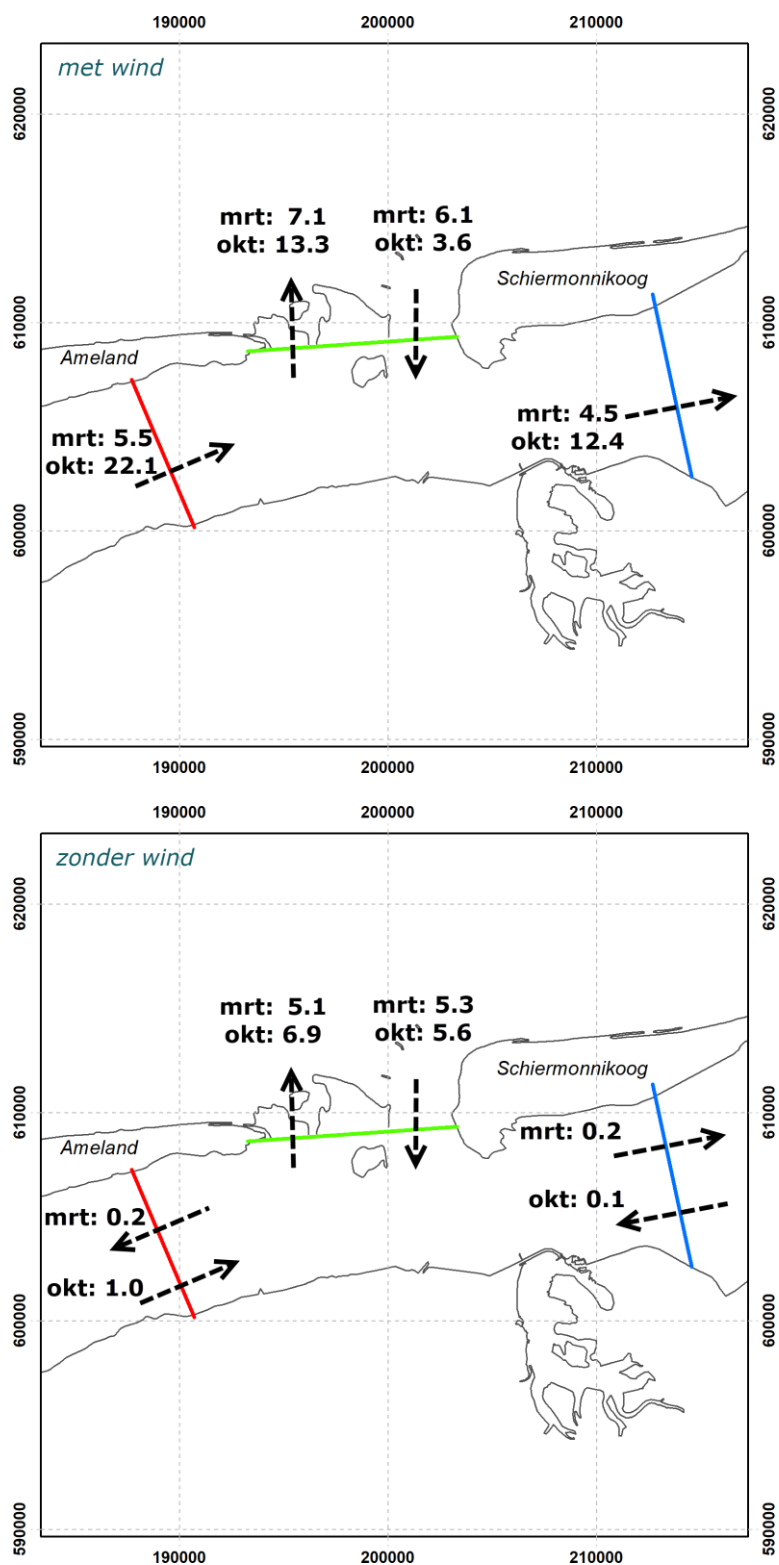
Figuur 4.19 Cumulatief debiet over de wantijen en door de keel, voor simulatie van maart en oktober (gedetailleerde model)



Figuur 4.20 Cumulatief debiet door de geulen op de buitendelta in maart (boven) en oktober (onder), zie Figuur 4.21 voor locatie van de geulen. Alle debieten zijn positief weergegeven, voor het Westgat is dit richting het noorden, voor de overige geulen richting het oosten



Figuur 4.21 Ligging doorsnedes door geulen waarvoor debieten zijn bepaald (Figuur 4.20)



Figuur 4.22 Getigemiddelde netto debiet (in miljoen m³ per getij) over het wantij bij Ameland, het Pinkegat, de Zoutkamperlaag en het wantij bij Schiermonnikoog gebaseerd op het gedetailleerde model inclusief wind (boven) en zonder wind (onder). De balans is niet geheel sluitend als gevolg van afronding.

5 Conclusies

In dit hoofdstuk worden de conclusies met betrekking tot de deelvragen in hoofdstuk 1.2.1 gegeven.

- *Hoe ziet het stromingspatroon er in het Friesche Zeegat uit?*

De modellen hebben de algehele waterbeweging en stromingsrichting in beeld gebracht, waarbij er netto import is via het deelsysteem van de Zoutkamperlaag en uitstroom door het deelsysteem van het Pinkegat. De geulen Zoutkamperlaag en Westgat zijn in de huidige morfologische configuratie echter wel eb-gedomineerd, terwijl in de morfologische situatie van 2005 de eb- en vloednelheden vergelijkbaar zijn. Dit verschil wordt veroorzaakt door de verschillen in oriëntatie: het huidige Westgat is noordwaarts gericht en ligt daarmee in het verlengde van de Zoutkamperlaag, waardoor de ebstroom in de geul geconcentreerd blijft (zie schematisch overzicht in Figuur 5.1). Hierdoor dringt de vloedstroom, die vanuit westelijke richting komt, niet via de geul het bekken in, maar komt die dwars op de geul aan over de kleinere eb- en vloedscharen en -schilden.

In 2005 stroomde de Zoutkamperlaag deels uit via het Plaatgat in oostelijke richting en deels via het Westgat in westelijke richting. Hierdoor zijn de eb-snelheden lager dan in de huidige situatie. Door de westelijke oriëntatie van het Westgat dringt de vloedstroom via de geul het bekken in, waardoor de snelheden in de geul tijdens vloed hoger liggen dan in de huidige situatie.

- *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?*

De huidige grootschalige morfologie en het effect daarvan op de stromingen is vermoedelijk verantwoordelijk voor de relatief stabiele ligging van het Westgat en de drempel daarvan in de afgelopen 1 tot 2 jaar. Hoe lang deze situatie gehandhaafd blijft hangt af van het ontstaan van een nieuwe westelijke uitstroom van de Zoutkamperlaag. De gangbare theorie is dat de huidige noordelijk georiënteerde geul op den duur een minder efficiënte uitstroom wordt doordat die wordt 'dichtgedrukt' door de plaat ten westen ervan. Recente analyses van het Zeegat van Ameland (project Kustgenese-2) laten echter zien dat het verleggen van geulen op de buitendelta kan worden geïnitieerd door een kleine 'instabiliteit' (de 'zuidelijke geul') die in de tijd langzaam groter wordt. Doordat er meer debiet via de nieuwe geul gaat stromen neemt het debiet en de stroomsnelheid in de oude geul af en kan die sedimenteren. Bij de Zoutkamperlaag is momenteel een dergelijke 'instabiliteit' zichtbaar net ten noorden van het Rif. Hoewel nog klein, is in de stromingspatronen al een duidelijke concentratie via dit beginnende geultje te zien, met name tijdens relatief rustige condities zonder sterke noord- of zuidwestenwind. Hoe (snel) deze 'instabiliteit' zich ontwikkelt en de verdieping in het Westgat zal beïnvloeden is nu niet duidelijk.

- *Wat zijn de stroomsnelheden door het Westgat, en welk effect hebben de verschillende windcondities daarop?*

De stroomsnelheden in het Westgat zijn het hoogste ter hoogte van het Rif en nemen af richting de Noordzee. De maximumsnelheden variëren gedurende de springtij-doodtij cyclus, met maximale ebsnelheden rondom 1 m/s tijdens springtij en rondom 0,7 m/s tijdens doortij, en maximale vloednelheden rondom 0,7 m/s voor springtij en rondom 0,4 m/s voor doortij. De maximale snelheden zijn tijdens eb 0,2-0,3 m/s hoger dan tijdens vloed, voor de huidige bathymetrie. In de situatie van 2005 liggen de maximale snelheden in de geul iets lager, en zijn de snelheden tijdens eb en vloed vergelijkbaar.

De verschillen in stroomsnelheid ter hoogte van de drempel tussen de berekeningen met en zonder wind zijn maximaal ruim 0,2 m/s, welke bereikt worden bij windsnelheden van ruim boven de 10 m/s. Bij windsnelheden tot ca. 5 m/s is het effect op de stroomsnelheid relatief klein.

- *Wat zijn de debieten over de wantijen en door de keel onder verschillende condities?*

De uitgevoerde modelberekeningen laten zien dat de grootschalige netto stromingen in het Friesche Zeegat sterk variëren gedurende een jaar. Hierbij is de windconditie een zeer belangrijke factor, die met name sterke invloed heeft op de netto stroming over de wantijen, en daarmee op de stroming door de keel. De netto stroming over beide wantijen neemt sterk toe bij zuidwestenwind. Het debiet over het wantij bij Ameland vergroot de netto export door het Pinkegat, en kan ook zorgen voor een netto oostwaarts debiet over het wantij onder het Rif.

Zonder wind vindt er netto import door het systeem Zoutkamperlaag plaats van ca. 5 miljoen m³ per getij en een even grote export door het systeem Pinkegat. Het debiet over de wantijen is dan relatief klein. Onder de windcondities in maart en oktober 2017 is het debiet over de wantijen toegenomen tot ca. 5 miljoen m³ in maart (beide wantijen) en 22 miljoen m³ (Ameland) en 12 miljoen m³ (Schiermonnikoog) in oktober. Met name in oktober is ook een grote verandering door de keel te zien: een toename van de export door het Pinkegat systeem en een afname van de import door het Zoutkamperlaag systeem.

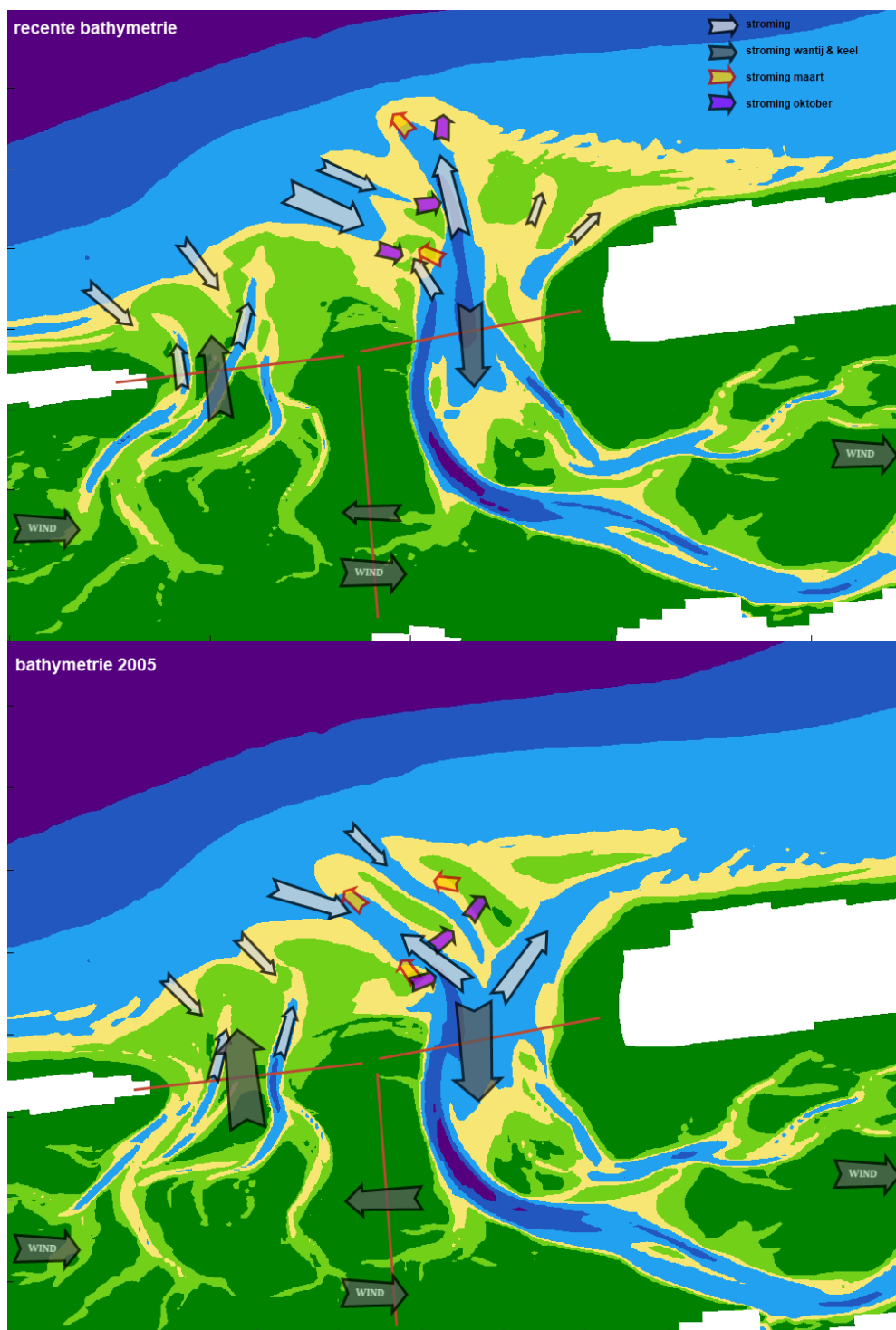
De grote invloed van wind op de snelheden en debieten is wel opmerkelijk. Op zich zou dit niet verassend moeten zijn gezien de resultaten van de studie van Duran-Matude (2014). De hier gepresenteerde modelresultaten geven een gelijk beeld, wat vertrouwen geeft in het model. Helemaal begrijpen waarom we deze grote invloed zien doen we echter niet. Een goede vergelijking met meetdata lijkt cruciaal om te toetsen of de modellen de stroming goed weergeven. De metingen gedaan in het kader van KustGenese2 en de detailmetingen van het Westgat kunnen ons hier meer inzicht in verschaffen.

Eigenlijk spelen hier 2 zaken. Ten eerste, vanuit onze algemene kennis weten we dat zeegaten, de vorm en volume van de platen en geulen, een functie zijn van getij en met name aan de buitenzijde ook golfenergie. Er zijn vele conceptuele modellen die zo de vorm en het gedrag van zeegaten kunnen verklaren en ook voorspellen. Wind speelt in deze conceptuele modellen eigenlijk geen rol.

Ten tweede, morfologische veranderingen worden vaak verklaard door residuele transporten, het verschil tussen de bruto eb- en vloedtransporten. Vaak gaan we er ook vanuit dat we vanuit het residuele stroombeeld een soortgelijk beeld kunnen verkrijgen. Onze analyses focussen dan ook vaak op het in kaart brengen van de residuele bijdragen. Het residueel stroombeeld of transport kan ontstaan door een asymmetrie in de getijbeweging of door externe invloeden zoals wind of rivierafvoer. In het oostelijk deel van de Waddenzee is residueel puur door de

getijgedreven asymmetrie zeer beperkt. Hier speelt wind een dominante rol voor het genereren van een residueel stroomveld en debiet. Deze nettostroming is echter zeer klein t.o.v. de bruto getijgedreven stromingen.

Het is zeer de vraag of het residuele stroombeeld in deze setting dan ook representatief is voor de grootschalige sedimenttransporten. Wat we op dit moment nog niet weten is hoe belangrijk de netto bijdrage van de wind is t.o.v. de bruto getijbeweging voor het sedimenttransport. Onze huidige kennis van sedimenttransportprocessen geeft hier een tegenstrijdig beeld en zijn nog ontoereikend om hier een gefundeerd antwoord op te geven.



Figuur 5.1 Schematisch overzicht van stroming en residueel debiet in het Friesche Zeegat, en de relevante sediment transporten voor de ontwikkeling van het Westgat in maart en oktober voor de recente bathymetrie (boven) en de 2005 bathymetrie (onder)

6 Referenties

De Graaf, R.F. (2009) SBW Wadden Sea, water level modelling. Deltares, rapport 1200114-005

Duran-Matute, M., Gerkema, T., De Boer, G. J., Nauw, J. J., & Gräwe, U. (2014). Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. *Ocean Science*, 10(4), 611-632

Elias, E.P.L., (2017). Stroming en sedimenttransport langs de Boschplaat op Terschelling. Deltares, rapport 11200878-000-ZKS-0005

Lesser, G.R., (2009). "An approach to medium-term coastal morphological modelling," Ph.D. Thesis, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij (LNV), Ministerie van Economische Zaken, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Ministerie van Defensie, Waddenprovincies, Waddengemeenten, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Directie Noord-Nederland (RWS, NN) (1996). Beheersplan Waddenzee: 1996-2001.

Mulder, H. & Lofvers, E., (2015). Morfologische beschouwing t.b.v. vaargeul Westgat. Notitie Rijkswaterstaat Noord & WVL

Oost, A.P., T. Vermaas en L.M. Vonhogen-Peeters (2015), Morfologische beschouwing ontwikkeling vaarweg buitendelta Zoutkamperlaag. Deltares, rapport 1220040-001-ZKS-0002

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 A.P. Oost (2016), Prognose baggerinspanning op korte en lange termijn in het Westgat. Deltares, rapport 1230043-001-ZKS-000