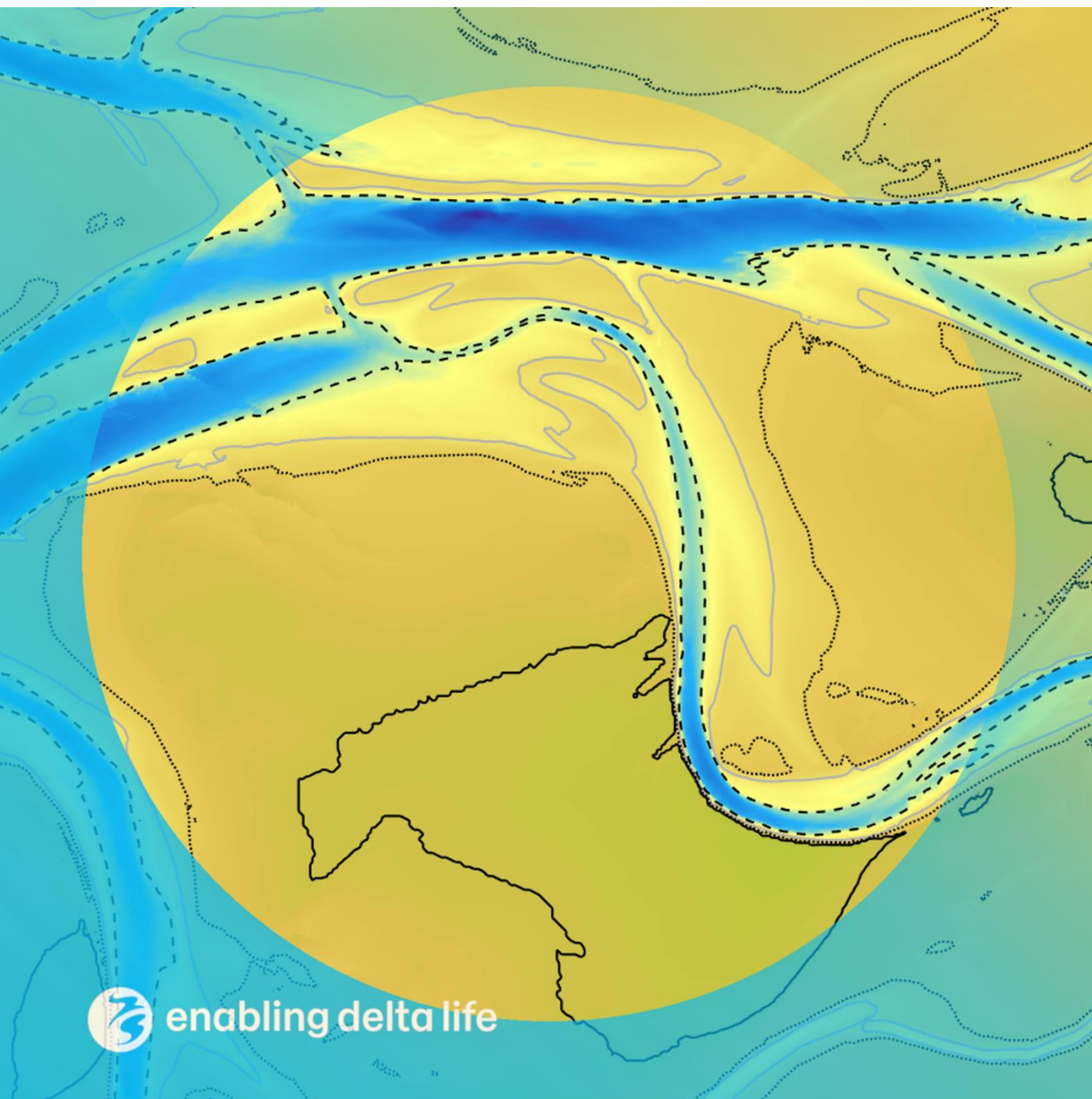


Knelpuntanalyse hoogwaterroute Holwerd-Ameland

Morfologische ontwikkeling en varianten voor minder baggerbezwaar en betere bevaarbaarheid



Knelpuntanalyse hoogwaterroute Holwerd-Ameland

Morfologische ontwikkeling en varianten voor minder baggerbezwaar en betere bevaarbaarheid

Auteur(s)

Roy van Weerdenburg

Julia Vroom

Claire Jeuken

Bart Grasmeijer

Partners

Jelmer Cleveringa (Arcadis)

Knelpuntanalyse hoogwaterroute Holwerd-Ameland

Morfologische ontwikkeling en varianten voor minder baggerbezwaar en betere bevaarbaarheid

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	J. de Vries, F. Brils
Referenties	WVH07 2023
Trefwoorden	Hoogwaterroute, Ameland, Holwerd, morfologie, vaargeul, eb- en vloedscharen, onderhoudsbaggerwerk

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	06-09-2023
Projectnummer	11209267-004
Document ID	11209267-004-ZKS-0004
Pagina's	71
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Roy van Weerdenburg	
	Julia Vroom	
	Claire Jeuken	
	Bart Grasmeijer	

Samenvatting

De vaargeul tussen Holwerd en Ameland heeft in toenemende mate onderhoud nodig om de bevaarbaarheid en daarmee de bereikbaarheid van Ameland te kunnen garanderen. In de afgelopen jaren is een knelpunt in de vaarroute ontstaan waar de vaargeul door een ondiep gebied met eb- en vloedscharen loopt. Tot in het najaar van 2022 liep de vaargeul hier door een zandbank, waarbij de vaarroute een vrij scherpe hoek maakte bij het uitmonden van de vaargeul in de geul Zuiderspruit. Dit deel van de vaargeul moest door onderhoudsbaggerwerk op diepte gehouden worden. De nabijgelegen ebschaar leek een logisch alternatief voor de toenmalige route, omdat natuurlijke ontwikkelingen er al voor zorgden dat de ebschaar steeds dieper werd. Nadat deze route in het najaar van 2022 op diepte werd gebracht is echter gebleken dat de sterke stroming in de vaargeul zorgt voor slechte bevaarbaarheid en een sterke migratie van de geul, met migratiesnelheden van soms wel 1 m/dag.

Dit rapport beschrijft de historische morfologische ontwikkeling, de huidige hydrodynamiek en de verwachte morfologische ontwikkeling van verschillende vaargeultracés om het huidige vaargeultracé te kunnen optimaliseren. Dit gebeurt op basis van een analyse van historische Vaklodingen en beheerlodingen, aanwezige literatuur, expert kennis en modelsimulaties van de waterbeweging met een bestaand numeriek stromingsmodel van de Waddenzee.

De grootschalige morfologische verandering van het Waddenzeebekken ten zuiden van Ameland wordt gekenmerkt door sedimentatie aan de landwaartse zijde tegen de Friese kust. Tegelijkertijd neemt het kombergingsvolume direct ten zuiden van Ameland toe door erosie van intergetijdengebied. Deze trend heeft er mogelijk toe geleid dat de Zuiderspruit nu meer west-oost dan noordwest-zuidoost georiënteerd is in vergelijking met een aantal decennia geleden. Ten zuiden van de Zuiderspruit is ruimte ontstaan voor een ondiep drempelgebied dat het huidige knelpunt in de vaarroute vormt. Door hoge stroomsnelheden in een meanderende geul bocht de geul uit en wordt de vaargeul langer. De hoge stroomsnelheden in het knelpunt in de huidige vaarroute worden deels veroorzaakt door een effectieve aansluiting van de vaargeul op het Scheepsgat.

Door bovenstaande grootschalige ontwikkelingen in de ligging van geulen zal de aansluiting van de vaargeul op de Zuiderspruit in de komende jaren een uitdaging blijven. Er moet namelijk een ondiepe bank en een heel dynamisch drempelgebied doorgestoken worden, terwijl de beoogde richting van de vaargeul (noord-zuid) loodrecht op de eb- en vloedstroming (west-oost) staat.

Verschillende varianten in de ligging van de vaargeul zijn geëvalueerd om een keuze te maken voor een vaargeultracé waarbij het baggerbezwaar niet toeneemt en de bevaarbaarheid verbetert. Als varianten op het huidige vaargeultracé door het knelpunt zijn twee noordelijke doorsteken (Noord Loodrecht en Noord Diagonaal) en een zuidelijke doorsteek (Zuid) bestudeerd. Op basis van modelberekeningen blijkt dat de stroomsnelheden in de vaargeul hoog blijven in elk van de varianten. Door het aantal (scherpe) bochten in de vaargeul te beperken wordt een stabielere ligging van de vaargeul verwacht. Dit is het geval bij de uitvoering van de noordelijke doorsteken, en vooral bij een doorsteek met een loodrechte aansluiting op de Zuiderspruit wordt het aantal bochten in de vaarroute beperkt. Een 'schuine' aansluiting van de vaargeul op de Zuiderspruit zorgt voor een betere bevaarbaarheid voor wat betreft de dwarsstroming op de vaarroute. De uiteindelijke keuze voor één van de varianten is daarmee een afweging tussen verschillende belangen door de beheerder.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Probleemomschrijving	7
1.2	Aanpak en doel	8
1.3	Leeswijzer	9
2	Morfologische ontwikkeling	10
2.1	Grootschalige ontwikkeling op de langere termijn	10
2.2	Lokale ontwikkeling op de kortere termijn	16
2.3	Synthese	24
3	Hydrodynamiek bij ingrepen in vaargeultracé	26
3.1	Introductie varianten	26
3.2	Hydrodynamiek in de huidige situatie	28
3.3	Algemene bevindingen voor alle varianten	32
3.4	Variant Noord Loodrecht	33
3.5	Variant Noord Diagonaal	34
3.6	Variant Zuid	35
3.7	Bochtafsnijding	37
3.8	Nieuwe verbinding met Molengat	39
3.9	Openhouden of dempen van de huidige vaarroute	40
4	Verwachte morfologische ontwikkeling	43
4.1	Grootschalige ontwikkeling van het bekken	43
4.2	Ontwikkeling van de vaargeul	43
4.3	Variant Noord Loodrecht	44
4.4	Variant Noord Diagonaal	44
4.5	Variant Zuid	45
5	Afweging van varianten	46
5.1	Criteria	46
5.2	Beoordeling van de varianten	46
6	Conclusies en aanbevelingen	49
6.1	Conclusies	49
6.2	Aanbevelingen	50

7	Referenties	52
A	Aanvullende figuren	53
A.1	Ontwikkeling van waterstanden (GHW, GLW en Getijslag)	53
A.2	Vaklodingen	54
A.3	Beheerlodingen	57
A.4	Modelbodems voor verschillende varianten	68
B	Ontwikkeling van het onderhoudsbaggerwerk	70

1 Inleiding

De vaargeul tussen Holwerd en Ameland heeft toenemend onderhoud nodig om de bevaarbaarheid en daarmee de bereikbaarheid van Ameland te kunnen garanderen. In het gedeelte van de vaargeul bij Holwerd wordt veel slib gebaggerd en is de vertroebeling hoog. Verder richting Ameland wordt meer zandig materiaal gebaggerd en neemt de dynamiek van geulen toe. De vaargeul migreert, eb- en vloedscharen ontstaan en er vindt veelvuldige uitbochting plaats. In 2019 is ingegrepen in het vaargeultracé door de onderhouden vaargeul te verleggen van een ebgeul naar een vloedschaar (Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020). Inmiddels is een nieuw knelpunt ontstaan, verder noordelijk op de vaarroute richting Ameland. Deze rapportage richt zich op de ontwikkeling van dat knelpunt en mogelijke oplossingen voor vaarwegoptimalisatie.

1.1 Probleemomschrijving

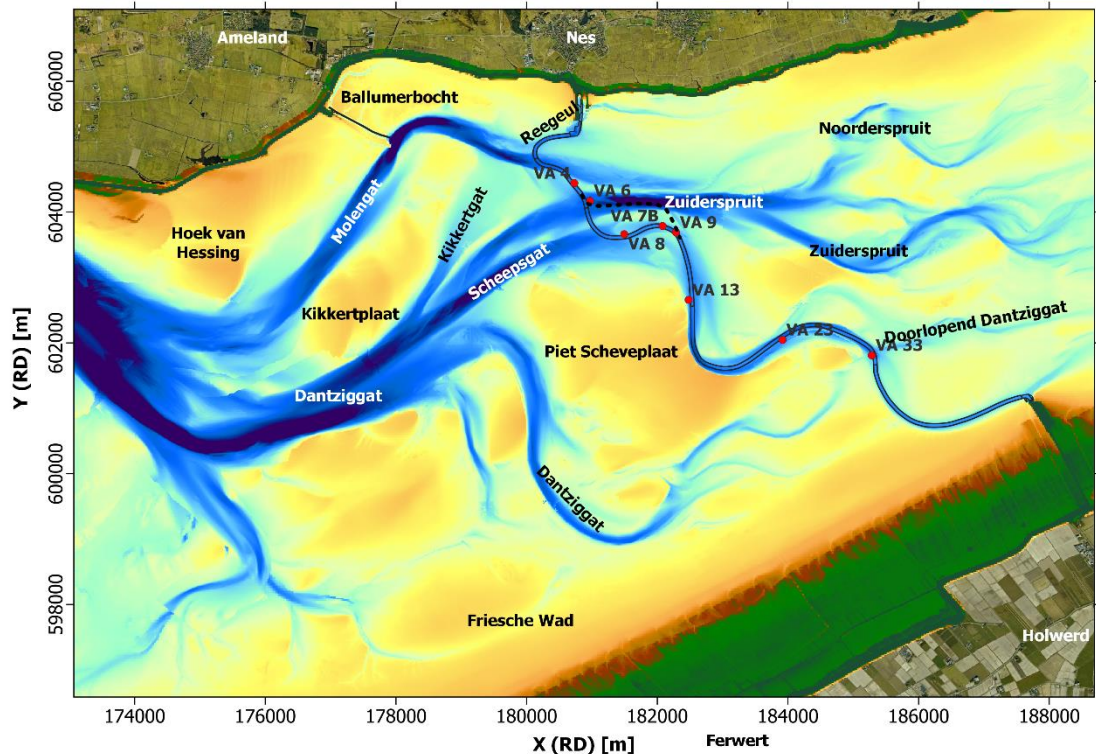
In de vaargeul tussen Holwerd en Ameland ligt ten zuiden van de geul Zuiderspruit een drempelgebied dat hinderlijk is voor de scheepvaart (Figuur 1.1). Tot vorig jaar maakte de vaarroute hier een vrij scherpe hoek, bij het uitmonden van de vaargeul in de Zuiderspruit. De nabijgelegen ebschaar leek een logisch alternatief voor de toenmalige route, omdat deze route een flauwere bocht maakt en de ebschaar natuurlijk was ontstaan, waardoor minder onderhoudsbaggerwerk verwacht werd. Vanaf ongeveer 2015/2016 is er veel overleg en discussie geweest over de uit te voeren ingreep. In september 2022 is de geulverlegging uiteindelijk gerealiseerd. De vaargeul heeft een breedte van 50 m en een diepte van -3,8 m NAP. De huidige vaarroute is weergegeven in Figuur 1.1. De oude doorsteek naar de Zuiderspruit is sterk gedegenereerd en ligt nu ten noordoosten van boei VA9. Het idee van de verlegging was om meer stroming in de geul te creëren, gepaard gaand met minder onderhoudsbaggerwerk. In de nieuwe geul staat inderdaad een sterke stroming, maar door de hoge stroomsnelheden is de geul ook erg sterk gaan uitbochten, met snelheden van soms wel 1 m/dag. Dit maakt een wekelijkse inspanning van lodingen en verlegging van de betonning noodzakelijk.

Vanwege dit uitbochten en de sterke morfologische veranderingen zijn de kapiteins van de veerdienst tussen Holwerd en Ameland onzeker over de aanwezige diepte in de binnenbocht (aanzanding/instorten taluds) en nemen zij sinds kort extra veiligheidsmarge door met laag water (<-1,4 m NAP) niet te varen. Hiermee verkleinen ze het risico om (met de aandrijving) aan de grond te lopen.

Door de hoge stroomsnelheid, de smalle doorgang en de scherpere bocht die is ontstaan door het uitbochten is de geul moeilijk bevaarbaar tussen boei VA7B en VA9. Ook in de bocht tussen VA6 en VA8 is de bevaarbaarheid een probleem. Hier is tijdens bepaalde fases van het getij sprake van een sterke dwarsstroming, die ervoor zorgt dat de opstuurhoeken, en daarmee het ruimtebeslag in de geul, groter worden.

In de oude situatie, voor de geulverlegging in 2022, was vanwege de langere passage door de Zuiderspruit een flink stuk van de vaarroute behoorlijk breed, en was hier plek voor de veerboten om elkaar te passeren. Dit is in de nieuwe situatie niet/nauwelijks het geval, waardoor de veerboten (vaker) op elkaar moeten wachten. In combinatie met de al krappe dienstregeling, leidt dit tot vertragingen.

Rondom boei VA6 en boei VA8 is toch onderhoudsbaggerwerk nodig om de vaargeul op diepte te houden, zodat het baggerbezwaar net als in de oude situatie behoorlijk groot is. Het is niet duidelijk hoe het baggerbezwaar zich ontwikkelt nu de verlegde geul al een paar maanden in gebruik is, omdat de benodigde data hiervoor (nog) niet beschikbaar is.



Figuur 1.1 Overzichtskartaal van de oostzijde van het bekken van het Amelander Zeegat met namen van geulen en plaatgebieden en enkele boeien aangegeven die in de tekst worden aangehaald. De oude vaarroute (voor de geulverlegging in 2022) tussen VA6 en VA9 is weergegeven met een zwarte stippellijn.

1.2 Aanpak en doel

Het doel van deze studie is om de bevaarbaarheid en verwachte morfologische ontwikkeling van verschillende optimalisaties van het vaargeultracé in kaart te brengen. De verwachte morfologische ontwikkeling (stabiliteit/migratie van de geul, baggerbezwaar) wordt ingeschat op basis van historische Vak- en beheerlodingen, aanwezige literatuur, modelberekeningen van de waterbeweging en expert kennis. Daarbij wordt ook onderzocht of er sprake is van (semi-)cycliciteit in het morfologische gedrag. Bij semi-cyclisch gedrag keren geulconfiguraties terug zonder vaste terugkeerperiode. De bevaarbaarheid wordt in kaart gebracht via berekende stroomsnelheden (grootte, richting) in verschillende fases van het getij en betreft geen uitgebreide studie van nautische aspecten.

De studie bevat drie onderdelen:

1. Analyse van de morfologische veranderingen op basis van vak- en beheerlodingen. Sinds ca. 2017 zijn beheerlodingen van het grotere gebied rondom de geul beschikbaar (1x per jaar) en beheerlodingen van alleen de vaargeul (ongeveer 4x per jaar). Ook zijn er wekelijks tot maandelijks lodingen gedaan door de aannemer. Daarnaast wordt in dit onderdeel het baggerbezwaar door de tijd beschouwd.
2. Inzet van het bestaande numerieke model voor de Waddenzee (Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2021) voor het simuleren van de waterbeweging. Dit wordt gedaan

voor de referentiesituatie (huidige vaargeultracé) en verschillende alternatieven. In de modelschematisatie is de bodem ter plaatse van het interessegebied geactualiseerd en zijn de varianten opgenomen.

3. Synthese van onderdeel 1 en 2 voor een inschatting van de toekomstige morfologische ontwikkeling voor verschillende scenario's.

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de grootschalige morfologische veranderingen beschreven op basis van bodemkaarten en vaargeulpeilingen. In Hoofdstuk 3 worden de modelopzet en resultaten van modelberekeningen van de waterbeweging voor verschillende varianten van het vaargeultracé besproken. Hoofdstuk 4 gaat in op de te verwachten morfologische ontwikkeling van de huidige situatie en de varianten, op basis van de resultaten in Hoofdstuk 2 en Hoofdstuk 3. In Hoofdstuk 5 volgt een afweging van de varianten op een aantal criteria m.b.t. de morfologische ontwikkeling en bevaarbaarheid. Conclusies uit deze studie en aanbevelingen voor vervolgonderzoek en monitoring zijn opgenomen in Hoofdstuk 6.

2 Morfologische ontwikkeling

In dit hoofdstuk worden achtereenvolgens de grootschalige morfologische ontwikkeling en de lokale ontwikkeling. Vanwege de beperkte databeschikbaarheid van baggervolumes, is deze informatie opgenomen in bijlage B. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een synthese van de morfologische ontwikkeling.

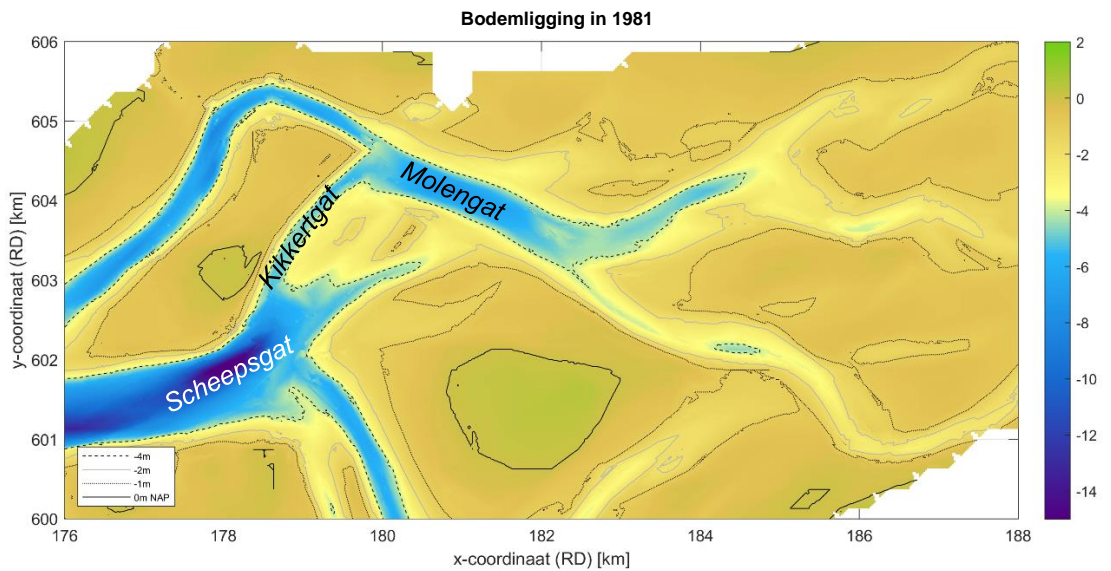
2.1 Grootschalige ontwikkeling op de langere termijn

De morfologische ontwikkeling in het bekken van Ameland wordt voor een belangrijk deel gestuurd door de getijstroming. Hoe de getijstroming verandert, is op te maken uit de ontwikkeling van waterstanden bij de twee waterstandsstations in het bekken, bij Holwerd en bij Nes. Over de afgelopen decennia stijgen zowel gemiddeld hoogwater (GHW) als gemiddeld laagwater (GLW). Deze stijging is bij Nes sterker dan bij Holwerd. Dit is terug te zien in het verloop van GHW, GLW en de getijslag in Figuur A.1 in Bijlage A.1. De stijging ligt bij Nes rond de 20 cm/eeuw. Dat is gelijk aan de zeespiegelstijging over de afgelopen eeuw. Omdat de laagwaters iets sterker stijgen dan de hoogwaters, neemt de getijslag licht af. Daarnaast valt op dat zowel bij GHW als GLW het verschil tussen Holwerd en Nes is toegenomen, met mogelijk een groter verhang in het bekken tot gevolg.

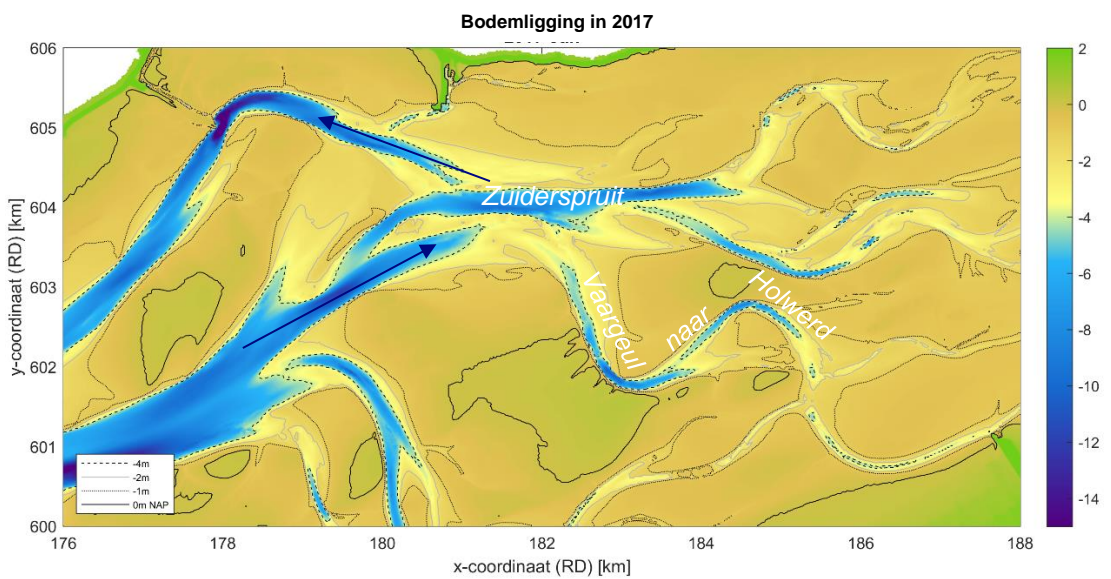
De kleine veranderingen van GHW en GLW bij Holwerd zijn opvallend. De andere waterstandsstations in de Waddenzee komen qua veranderingen meer overeen met Nes. De oorzaak voor het min of meer stabiel blijven van GHW en GLW bij Holwerd is nog niet goed begrepen. Bij Holwerd is de data minder betrouwbaar. Er is een periode waarvoor helemaal geen metingen beschikbaar zijn, en de jaren waarin wel een jaargemiddelde berekend is, bevatten soms grote gaten. Anderzijds kan de morfologische ontwikkeling, waarbij het intergetijdengebied is opgehoogd en de geul langer en smaller is geworden, ertoe hebben geleid dat de getijvoortplanting is veranderd.

Ook valt op dat de spreiding bij Holwerd groter is dan bij Nes, mogelijk wordt dat station sterker beïnvloed door wind en golven. De stijging van de waterstanden zal verderop in dit hoofdstuk gekoppeld worden aan de morfologische veranderingen.

Vergelijking van de bodemkaarten tussen 1981 (Figuur 2.1) en 2017 (Figuur 2.2) laat zien dat het Scheepsgat zich veel verder noordoostwaarts uitstrekt in 2017 dan in 1981. Deze ontwikkeling hangt samen met het verdwijnen van het Kikkertgat. Doordat ook het Molengat zich ver westwaarts heeft teruggetrokken, is er ruimte ontstaan voor een west-oostwaarts georiënteerde Zuiderspruit. Daarmee heeft de Zuiderspruit de aansluiting tussen het Molengat en de vaargeul naar Holwerd doorkruist. Ten zuiden van de Zuiderspruit is ruimte ontstaan voor een nieuw en dynamisch ondieptegebied met sterke geulmigratie. De vaargeul loopt door dit ondieptegebied, wat leidt tot een hoog baggerbezwaar.

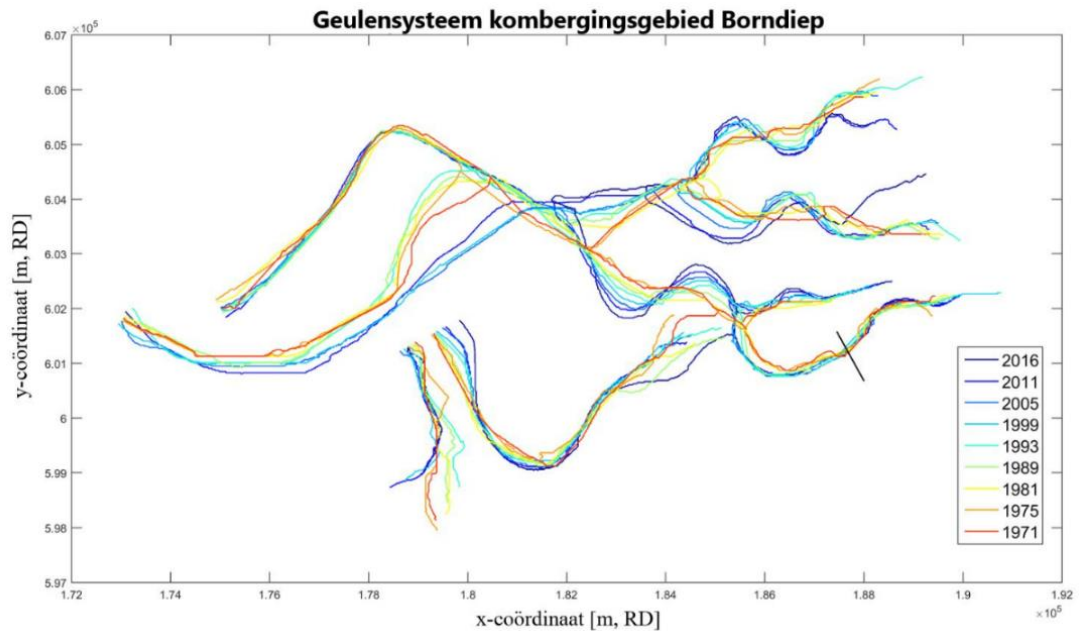


Figuur 2.1 Bodemligging (in m t.o.v. NAP) in Vaklodgingen van 1981



Figuur 2.2 Bodemligging (in m t.o.v. NAP) in Vaklodgingen van 2017

De afgelopen decennia is de vaargeul tussen Holwerd en Ameland steeds verder gaan uitbochten (Figuur 2.3), vooral tussen de Zuiderspruit en het Doorlopend Dantziggat (boei VA33). Deze trend waarbij geulen meer zijn gaan meanderen is ook te zien in andere geulen in het bekken, die niet door onderhoudsbaggerwerk op hun plaats worden gehouden, zoals de Noorderspruit en de Zuiderspruit. Het onderhoudsbaggerwerk is dus niet de oorzaak van de sterke meandering, en is ook niet de hoofdoorzaak dat deze in stand blijft (door op diepte houden van steeds verder uitbochtende ebschaar).

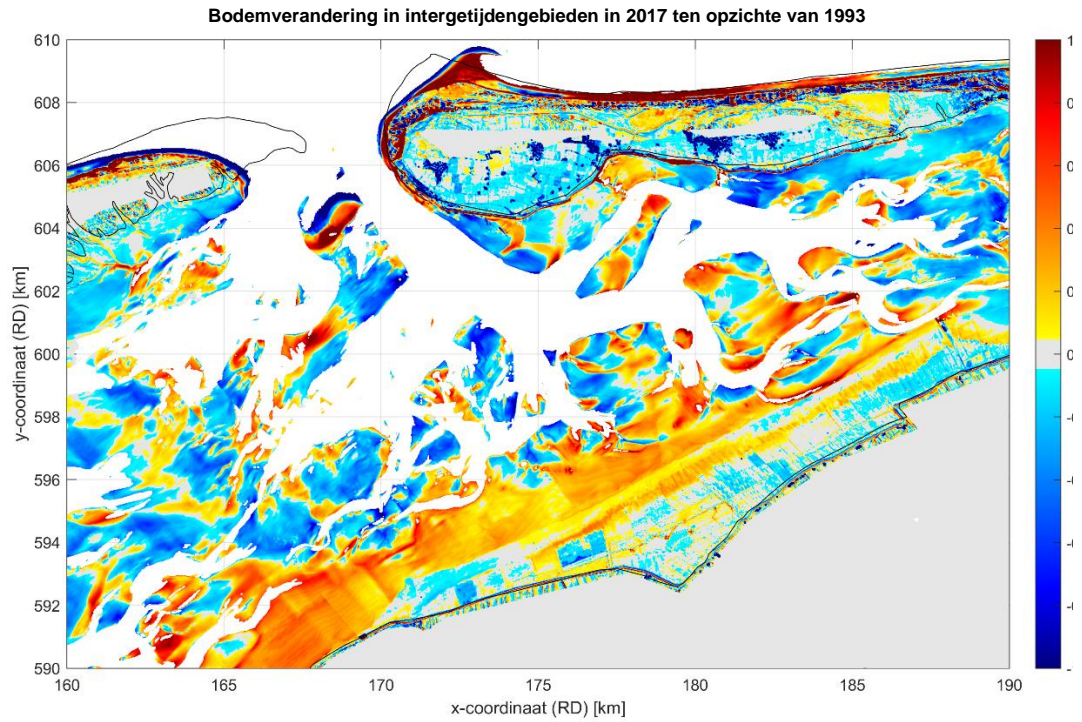


Figuur 2.3 Liggingen van geulen in het bekken ten zuiden van Ameland (Van Til, 2017)

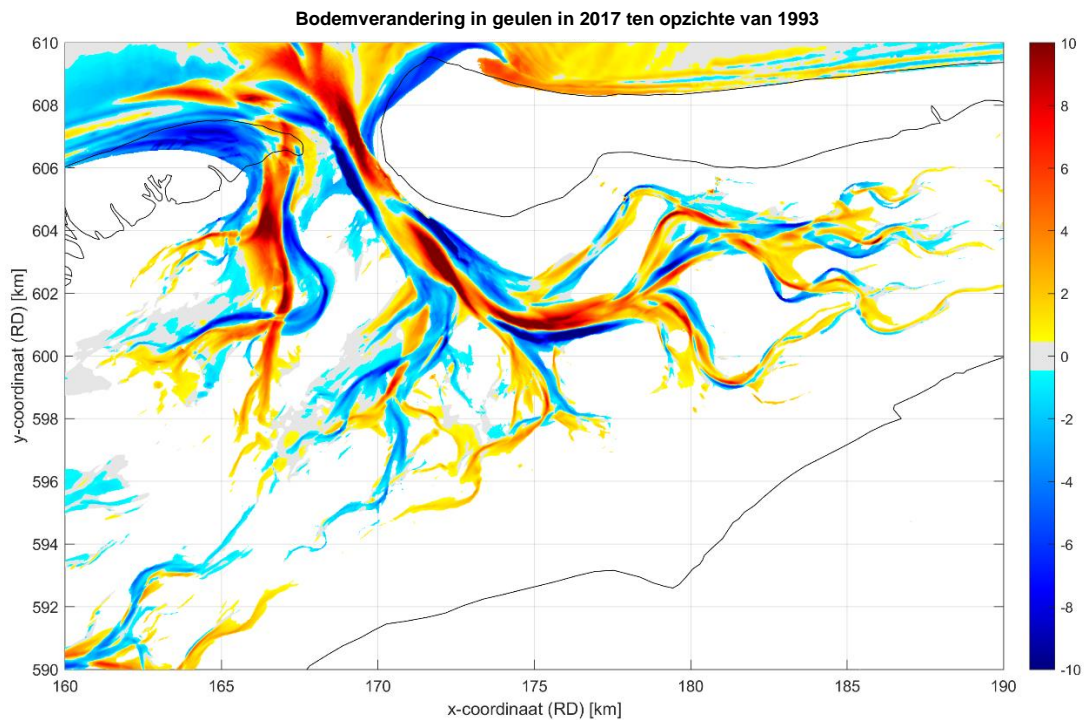
In Oost & Cleveringa (2017) wordt een gelijkenis gezien van het huidige geulenpatroon met het geulenpatroon uit de jaren '40. Destijds was de Zuiderspruit ook (d.w.z. net als nu) west-oost georiënteerd. Een belangrijk verschil is dat de afwatering van het zuidelijke deel van het bekken toen verliep via Ferwert. Er was dus geen verbinding tussen het huidige knelpunt en Holwerd. In de jaren '70 is die verbinding wel op de kaart te zien (Figuur 2.3) en is de Zuiderspruit ook meer zuidwest-noordoost georiënteerd. De huidige positie van de Zuiderspruit gaat dus mogelijk niet goed samen met een verbinding door het huidige knelpunt naar Holwerd.

De grootschalige ontwikkeling van de Waddenzee wordt gekenmerkt door een sterke sedimentatie aan landwaartse zijde. Ook in het bekken van Ameland treedt dit op, zie Figuur 2.4. Ten zuiden van de eilanden en rondom het wantij is ook erosie zichtbaar. Ter compensatie van de opgetreden zeespiegelstijging van ca. 20 cm/eeuw is een sedimentatie van ca. 4,8 cm nodig tussen 1993 (zie bodemligging in bijlage A.2) en 2017. Op veel plaatsen is de sedimentatie groter dan de opgetreden zeespiegelstijging.

De grootschalige sedimentatie leidt ertoe dat de evenwichtsdoorsnede van geulen kleiner wordt; er komt immers minder water op de platen te staan, wat elk getij moet worden aan- en afgevoerd. De afname van de evenwichtsdoorsnede heeft een groot effect gehad op de ontwikkeling van de vaargeul nabij Holwerd (Herman et al. 2016).



Figuur 2.4 Sedimentatie (geel-rood) en erosie (blauw) in [m] in het bekken van het Amelander Zeegat tussen 1993 en 2017 voor gebieden die in beide jaren een bodemligging hebben boven de -1,25 m NAP, zodat de morfologische veranderingen op het plaatgebieden in het oog springen en niet worden gedomineerd door zeulmigratie met veel sterkere hoogteveranderingen (zie andere verticale kleurenschaal in Figuur 2.5).



Figuur 2.5 Sedimentatie (geel-rood) en erosie (blauw) in [m] in het bekken van het Amelander Zeegat tussen 1993 en 2017 voor gebieden die in één van beide jaren een bodemligging hebben beneden de -1,25 m NAP. Let op dat de bodemveranderingen (kleurenschaal) van een andere orde grootte zijn dan op de platen (Figuur 2.4).

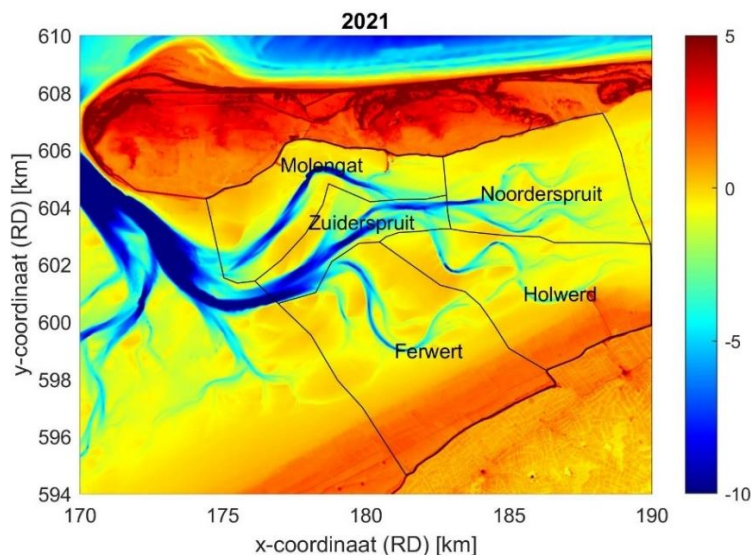
Ook de geulen vertonen sedimentatie en erosie, vooral als gevolg van geulmigratie (Figuur 2.5). Geulmigratie is te herkennen aan naast elkaar gelegen rode en blauwe banen. Ter plaatse en ten zuidoosten van het huidige knelpunt is sprake van sedimentatie, terwijl de noordzijde van de Zuiderspruit geërodeerd is. Deze ontwikkelingen worden in de volgende paragraaf in meer detail besproken.

Door op basis van de verschillende bodemkaarten het natte volume onder een bepaald vlak te bepalen wordt inzichtelijk in hoeverre de geulen en het subgetijdengebied (natte inhoud onder GLW) en kombergingsvolumes (de inhoud tussen GLW en GHW) kleiner of groter zijn geworden. Voor het bepalen van de volumes zijn de niveaus van GLW en GHW belangrijk. Deze zijn op twee verschillende manieren meegenomen in deze analyse:

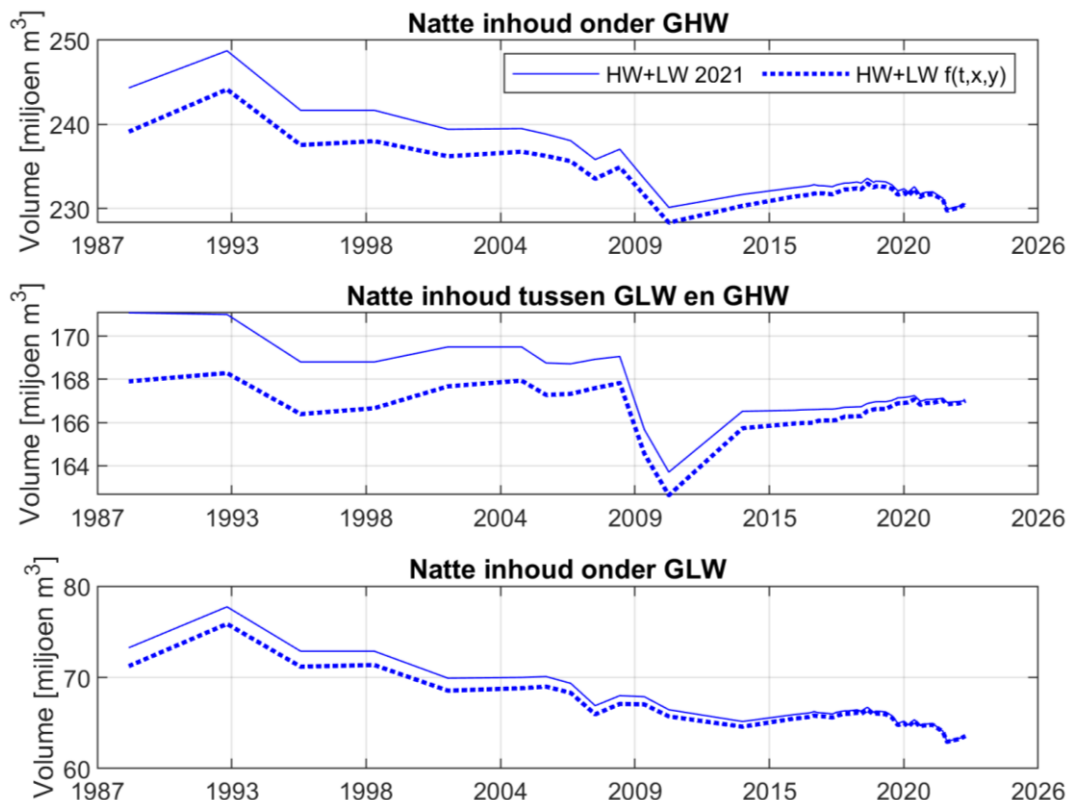
1. Constant in ruimte en tijd: voor alle deelpolygonen het gemiddelde GHW en gemiddelde GLW tussen Holwerd en Nes voor het jaar 2021 (GHW = 1,04 m NAP; GLW = -1,25 m NAP). Via deze methode wordt het effect van bodemveranderingen in kaart gebracht.
2. Variabel in ruimte en tijd: voor het Molengat en de Noorderspruit worden de tijdsvariërende GLW en GHW van Nes gebruikt, voor Zuiderspruit het gemiddelde tussen Holwerd en Nes en voor Ferwert en Holwerd de tijdsvariërende GHW en GLW niveaus van Holwerd. De verandering door de tijd is aangenomen lineair te zijn. Via deze methode wordt het gecombineerde effect van bodemveranderingen en waterstandsveranderingen in kaart gebracht.

Voor de gehele oostzijde van het bekken (het totaal van alle deelpolygonen, waarvan de ligging staat aangegeven in Figuur 2.6) is het subgetijdenvolume afgenomen sinds de jaren '90, zie Figuur 2.7. Het kombergingsvolume is nauwelijks afgenomen, indien rekening wordt gehouden met een lager GLW en GHW niveau verder terug in de tijd (methode 2).

Het is opvallend dat de kombergingsvolumes in 2010 en 2011 kleiner zijn dan in 2009 en 2014. In de data is te zien dat de bodemligging van het hele bekken hoger ligt in 2010 en 2011 en vanaf 2014 weer lager. Vanaf 2014 worden voor de platen de Vaklodingen van 2017 gebruikt. Het kan dus ook zijn dat deze Vaklodingen een te lage bodemligging op de platen geven. Mogelijk is dit een meeton nauwkeurigheid of het gevolg van seizoensdynamiek.



Figuur 2.6 Ligging van de polygonen Molengat, Noorderspruit, Zuiderspruit, Ferwert en Holwerd op de bodemligging van 2021 (in m t.o.v. NAP; grotendeels gebaseerd op de Vaklodingen van 2017).



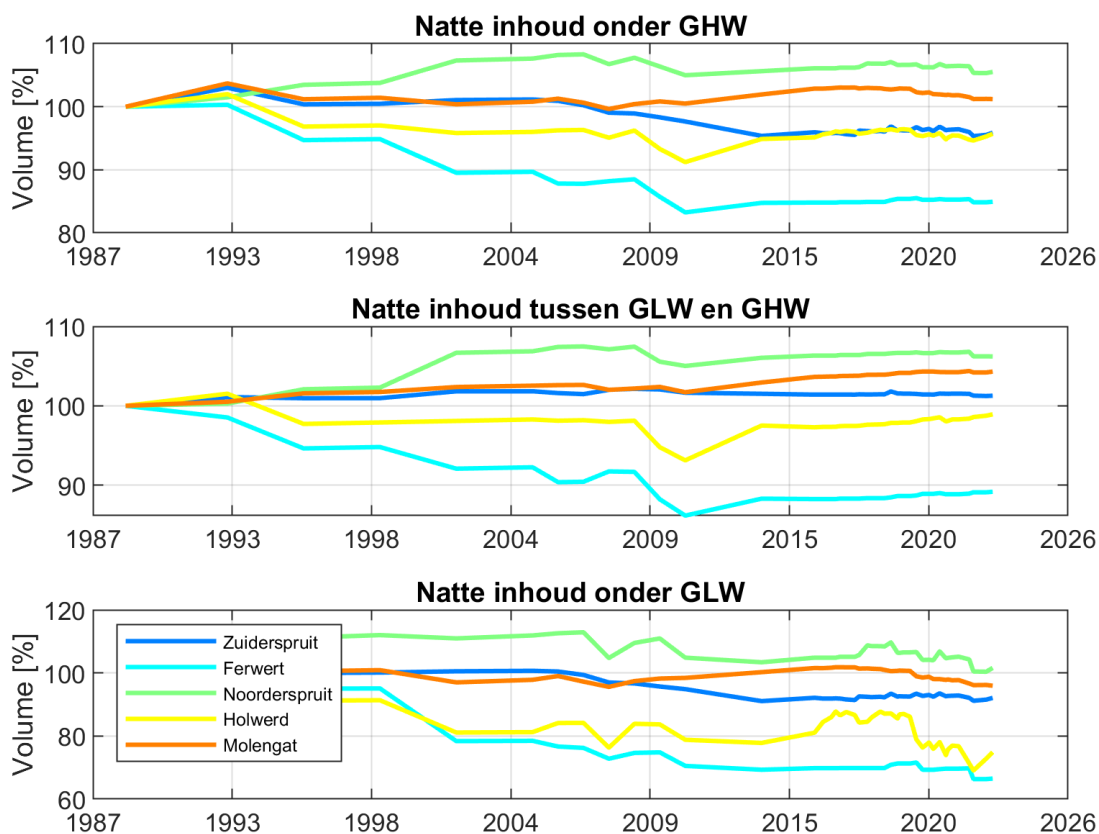
Figuur 2.7 Ontwikkeling van de natte inhoud onder GHW (boven), tussen GLW en GHW (kombergingsvolume; midden) en onder GLW (geul- en subgetijdenvolume; onder) door de tijd voor de oostzijde van het bekken. In doorgetrokken blauw een berekening met de HW en LW niveaus van 2021 toegepast op alle jaren, en in gestippeld blauw met lineair toenemend HW en LW niveau in de tijd en verschillende HW en LW per polygoon.

Voor de verschillende deelgebieden zijn de volumes weergegeven in Figuur 2.8, alleen volgens methode 2. Hieruit blijkt dat de natte inhoud van de deelpolygonen Ferwert en Holwerd het sterkst zijn afgenomen, zowel qua kombergingsvolume als qua subgetijdenvolume. Dit is overeenkomstig de sterke landwaartse sedimentatie in de Waddenbekkens. De ophoging van het intergetijdengebied leidt tot een verkleining van het kombergingsvolume, dat gepaard gaat met een kleinere evenwichtsdoorsnede van geulen.

Ook het geul- en subgetijdenvolume van Zuiderspruit is afgenomen (deze polygoon bevat bijna geen intergetijdengebied). Het Molengat vertoont kleine veranderingen.

De Noorderspruit is eerst toegenomen, en vervolgens min of meer stabiel in nat volume. Over de afgelopen dertig jaar is het kombergingsvolume netto toegenomen, overeenkomend met veel blauwe gebieden op de verschilkaart (Figuur 2.4). Het gebied rondom de Noorderspruit is dus relatief belangrijker geworden. Deze ontwikkeling is mogelijk bepalend geweest voor de meer west-oostwaartse oriëntatie van de Zuiderspruit, waardoor de verbinding tussen het Molengat en de vaargeul Holwerd wordt onderbroken (zoals hierboven beschreven).

Op kortere termijn (sinds 2017) is het opvallend dat de gebieden onder GLW in bijna alle polygonen een afname vertonen, terwijl de natte inhoud tussen GLW en GHW licht lijkt toe te nemen of stabiel blijft. Dit zou voor een deel toegeschreven kunnen worden aan de beperkte opnamefrequentie van de platen (eens per zes jaar in de Vaklodgingen cyclus) ten opzichte van die van de geul (elk kwartaal sinds 2016).

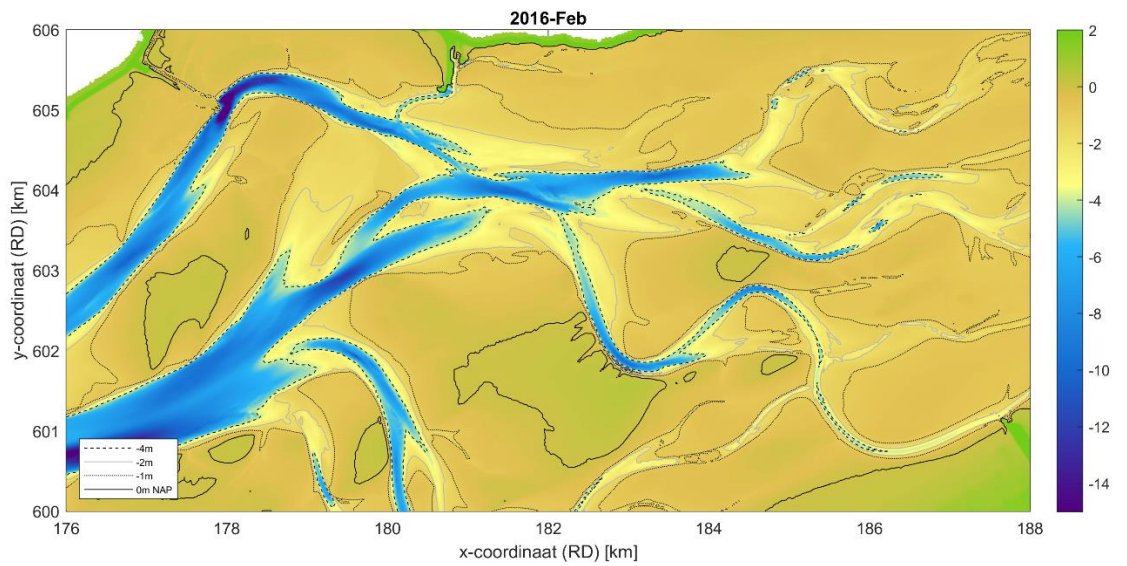


Figuur 2.8 Volumeontwikkeling [%] sinds 1989 voor de verschillende deelgebieden. Hierbij is gebruik gemaakt van in ruimte en tijd variërende waterstanden.

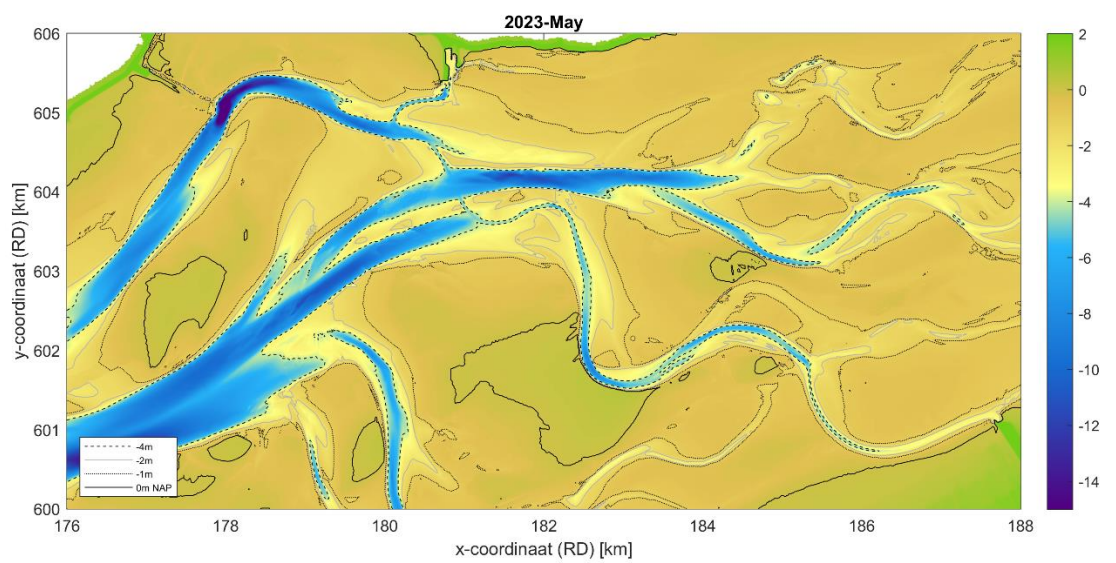
De relatie tussen volume tussen GLW en GHW en geulomvang is niet altijd lineair, omdat 1) niet alle getijstrooming via de geul verloopt (maar ook over de platen) en 2) sommige geulen ook bijdragen aan de afwatering van andere gebieden (bijv. Molengat en Zuiderspruit). Bovendien is het lastig onderscheid te maken tussen geulen en subgetijdengebied. In deze studie zijn de geulen en het subgetijdengebied samen beschouwd, door het watervolume onder de GLW te bepalen.

2.2 Lokale ontwikkeling op de kortere termijn

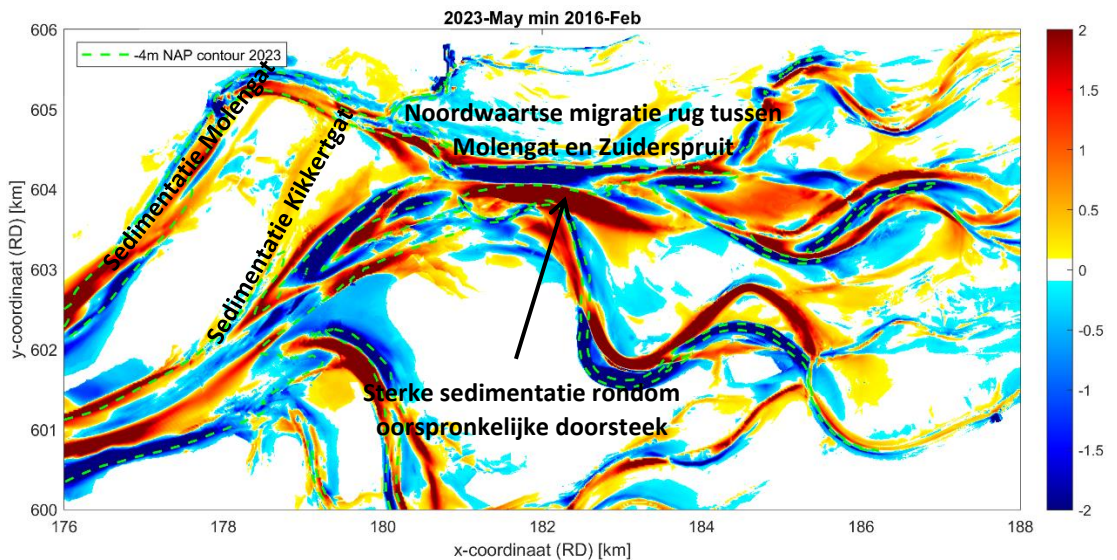
Op basis van lodingen van de vaargeul en zijn directe omgeving (ongeveer 4x per jaar) en jaarlijkse lodingen van een groot deel van het intergetijdengebied ten zuiden van Ameland kan de dynamiek op korte tijdschaal ook worden beschouwd. De zogenaamde 'beheerlodingen' voor de periode 2016-2023 zijn gecombineerd met de vlakdekkende Vaklodingen van het gehele bekken uit 2017. Op basis van deze data, zijn de morfologische ontwikkelingen op verschillende manieren gevisualiseerd (bodemkaarten, verschilkaarten, ontwikkeling dieptecontouren, dwarsdoorsnedes etc.). De belangrijkste morfologische ontwikkelingen worden beschreven met verwijzingen naar de meest duidelijke visualisaties.



Figuur 2.9 Vaklodingen van 2017 met beheerlodingen voor de geul uit februari 2016 (in m t.o.v. NAP).



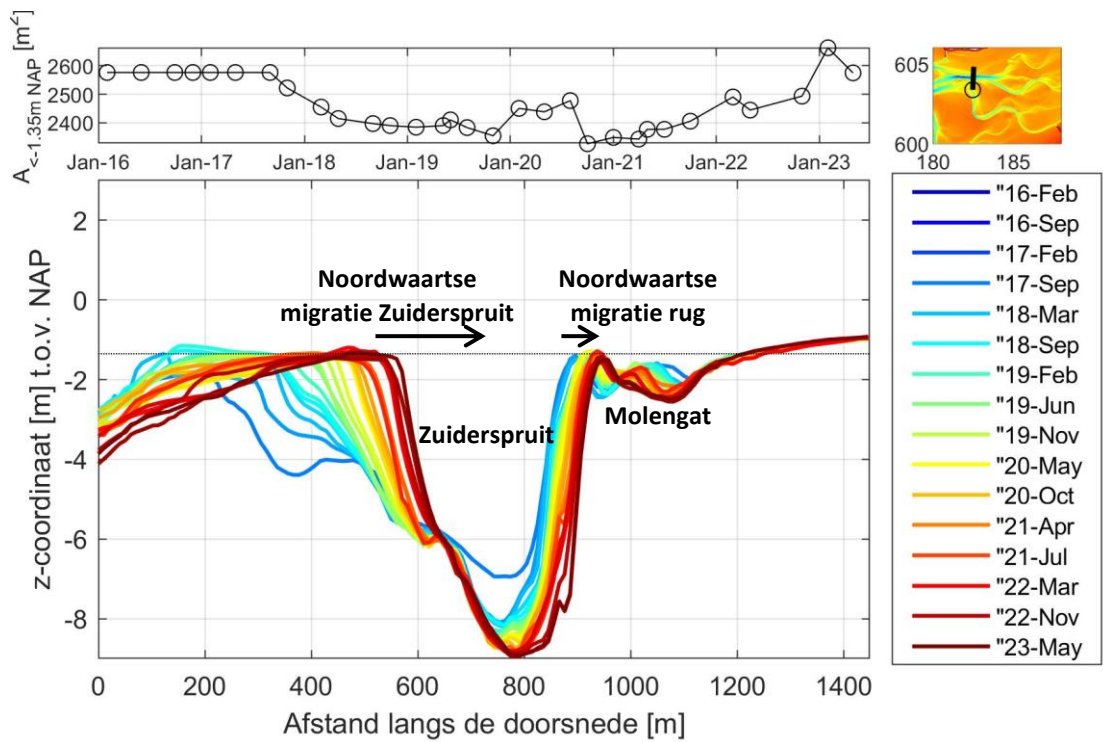
Figuur 2.10 Vaklodingen van 2017 met beheerlodingen van februari 2016 t/m mei 2023, met de nieuwste data bovenop (in m t.o.v. NAP).



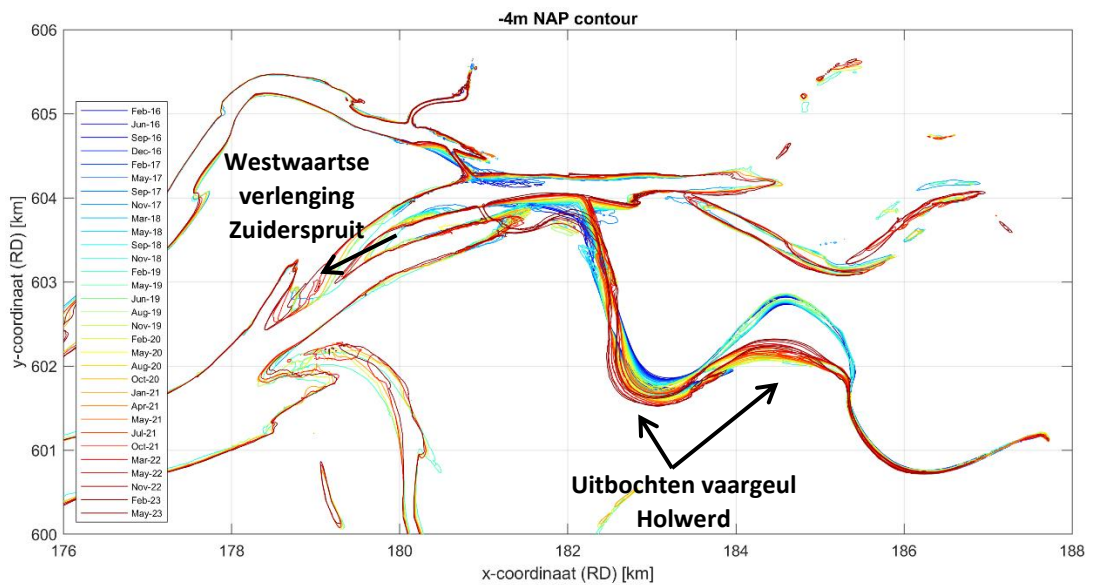
Figuur 2.11 Bodemveranderingen tussen februari 2016 en mei 2023 (in m; bodemligging in Figuur 2.10 ten opzichte van de bodemligging uit Figuur 2.9).

De belangrijkste morfologische ontwikkelingen in de omgeving van de vaargeul zijn:

- Sedimentatie in het Molengat sinds 2016, zichtbaar in Figuur 2.11. Deze ontwikkeling is consistent met de volumeafname van het subgetijdengebied (Figuur 2.8). Het volume tussen GLW en GHW neemt echter wel toe. Het Molengat watert ook de systemen ten oosten en zuiden van de geul (deels) af, waardoor de ontwikkeling van het geulvolume en het volume tussen GLW en GHW niet gekoppeld hoeven te zijn.
- Sedimentatie in het Kikkertgat zowel op de lange (Figuur 2.5) als op de korte termijn (Figuur 2.11).
- Noordwaartse migratie en westwaartse verlenging van de rug tussen het Molengat en de Zuiderspruit, mogelijk beïnvloed door de noordwaartse verplaatsing van de Zuiderspruit (beide zijn zichtbaar in Figuur 2.9, Figuur 2.10 en in Figuur 2.12).
- Het ontwijken van de Zuiderspruit en het Scheepsgat, gepaard gaan met
- westwaartse verlenging van de Zuiderspruit (Figuur 2.13) en drempelvorming aan de westwaartse zijde (vergelijk Figuur 2.9 en Figuur 2.10) en
- het versmallen en verdiepen van het Scheepsgat (vergelijk Figuur 2.9 en Figuur 2.10).
- Het uitbochten van de vaargeul naar Holwerd op verschillende plaatsen (Figuur 2.13). Ook de bocht die in 2019 is afgesneden is inmiddels alweer aan het uitbochten en er vormt zich alweer een nieuwe vloodschaar (Figuur 2.10). De vloodschaar is in mei 2022 al duidelijk te zien.



Figuur 2.12 Ontwikkeling van de natte doorsnede door de Zuiderspruit. De locatie van de doorsnede is aangegeven in het paneel rechtsboven; het nulpunt ligt in het zuiden.

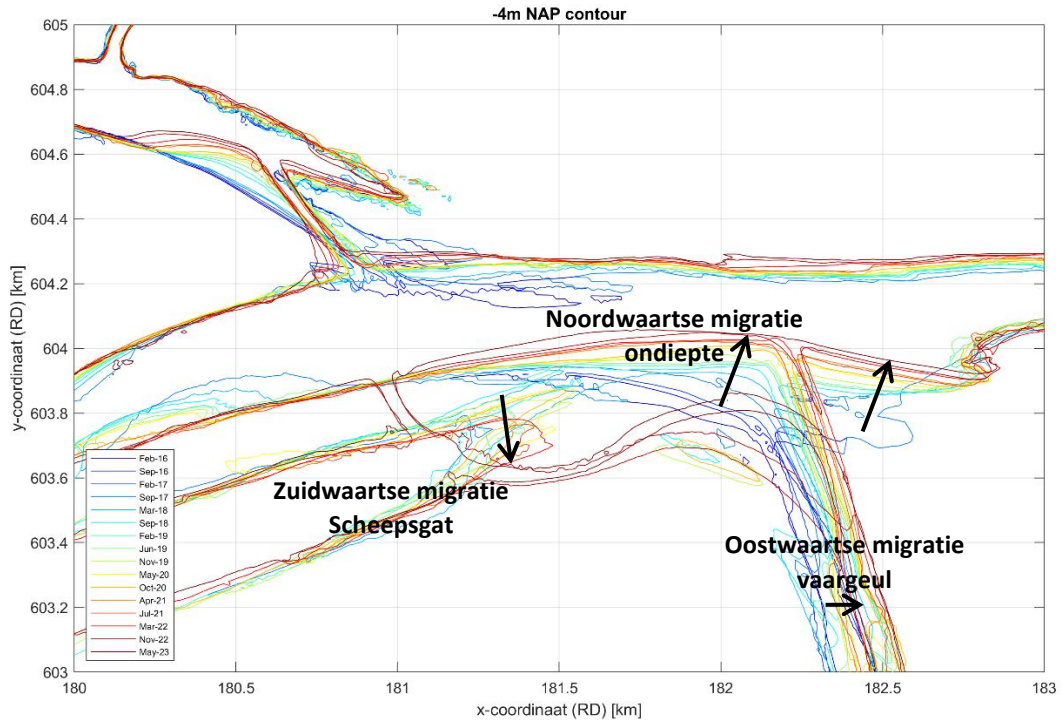


Figuur 2.13 Ontwikkeling van de -4 m NAP dieptelijne door de tijd. De westwaartse verlenging van de Zuiderspruit en het uitbochten van de vaargeul naar Holwerd, inclusief de bochtafsnijding uit 2019, zijn goed te zien.

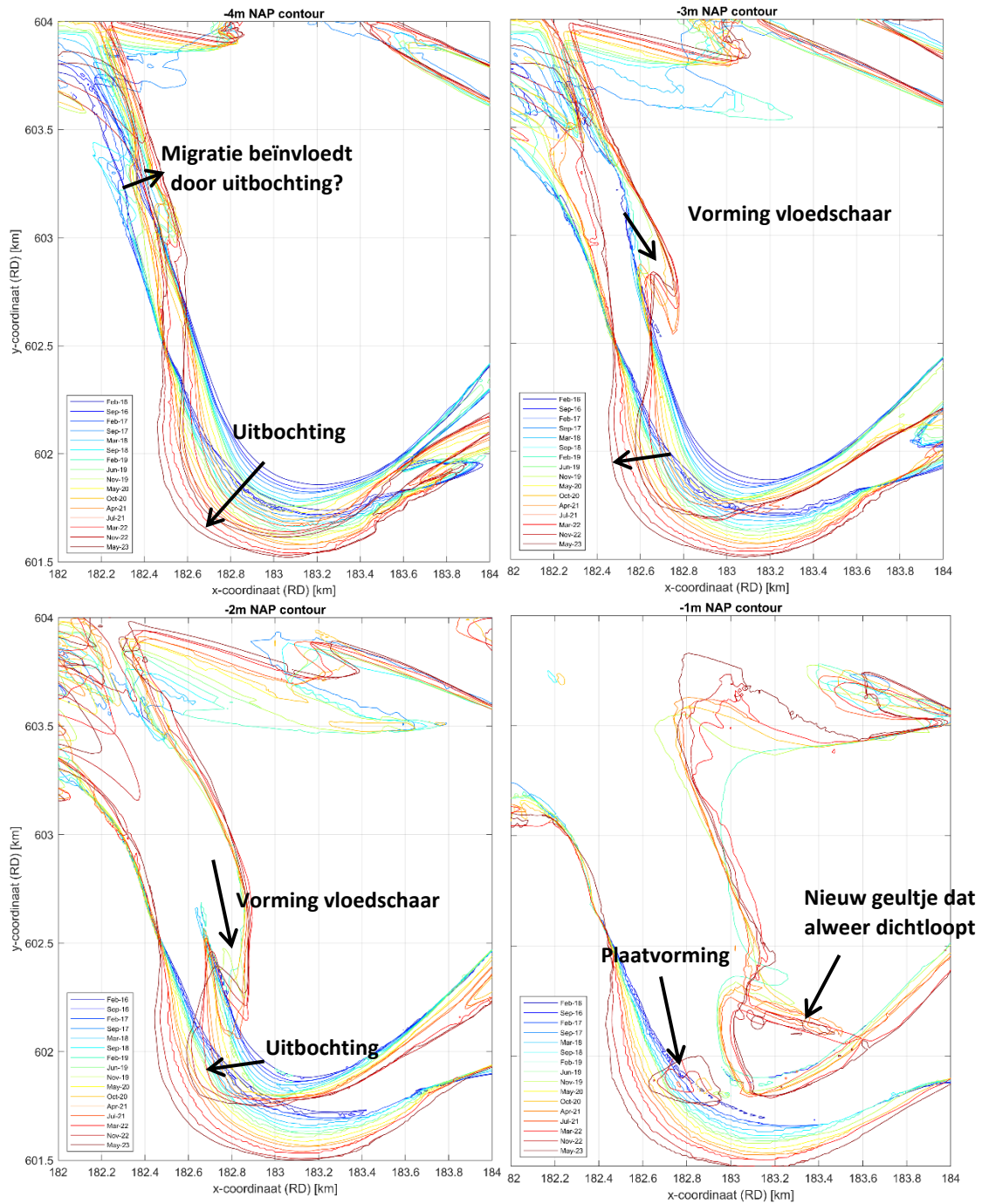
Ingezoomd op het knelpunt zijn de volgende veranderingen zichtbaar:

- Noordwaartse migratie van de zuidoever van de Zuiderspruit (Figuur 2.14), waardoor het oude tracé van de vaargeul (tot najaar 2022) over een steeds langere afstand door een ondiepte liep, gepaard gaand met hoog baggerbezwaar.
- Zuidwaartse migratie van het uiteinde van het Scheepsgat (Figuur 2.14), waardoor er meer ruimte ontstaat voor de ondiepte.

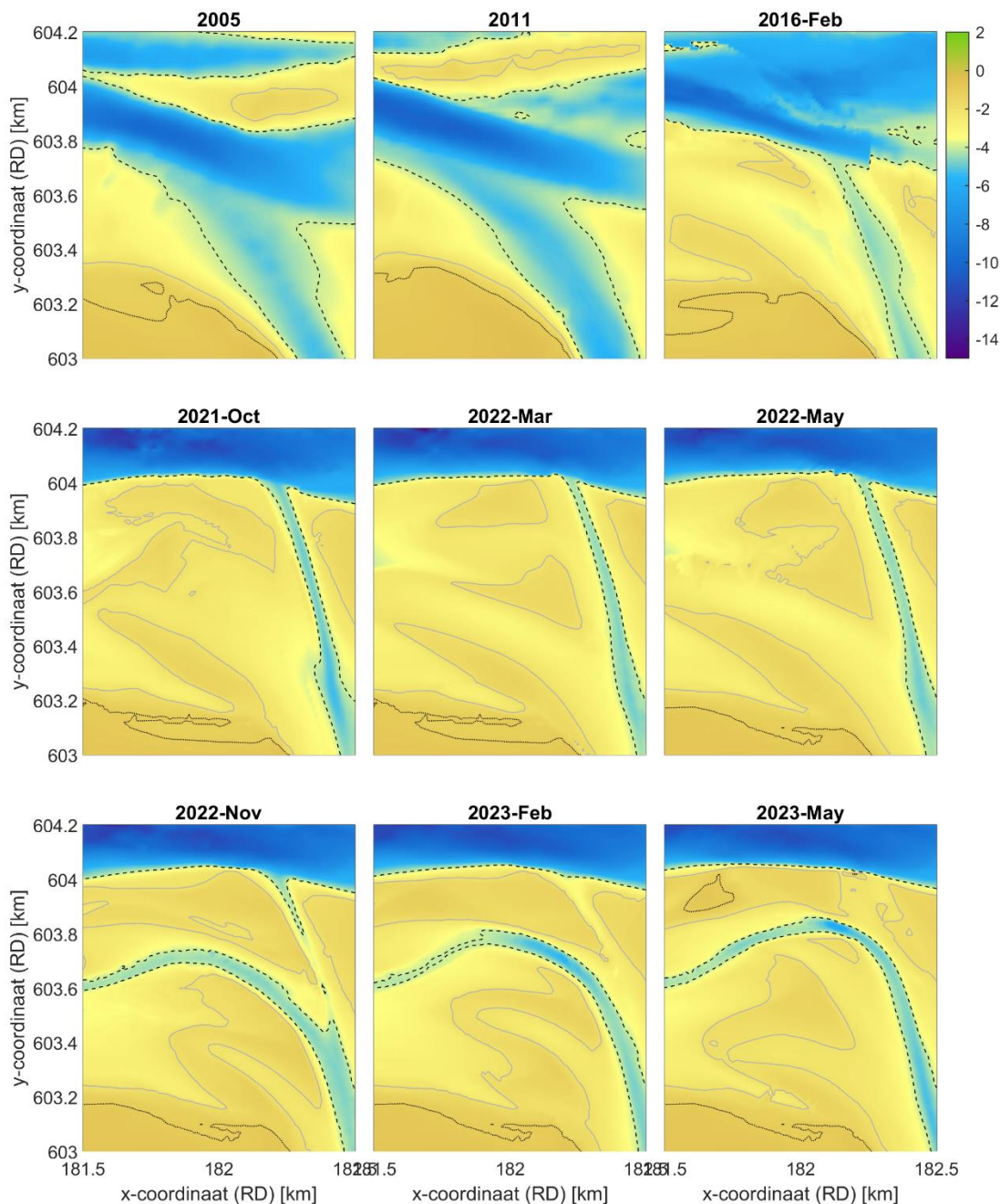
- Oostwaartse migratie van de vaargeul naar Holwerd (Figuur 2.14), waarschijnlijk als gevolg van het uitbochten van de geulbocht ten zuiden ervan (Figuur 2.15).
- De vloedschaar in de vaargeul naar Holwerd snijdt steeds meer in het plaatgebied, door westwaartse migratie van de uitbochtende vaargeul. Daardoor ontstaat ruimte voor een nieuw plaatgebied (Figuur 2.15).
- Uitbochtiging van de vaargeul die in 2022 is aangelegd (Figuur 2.16).
- Opvulling van de oude vaarroute (Figuur 2.16).
- Eb- en vloedschaarvorming met zeer hoge dynamiek in het gebied van de nieuwe vaargeul (Figuur 2.16).



Figuur 2.14 Ontwikkeling van de -4 m NAP dieptelijn door de tijd, ingezoomd op het interessegebied en uitgedund in de tijd t.o.v. Figuur 2.13.

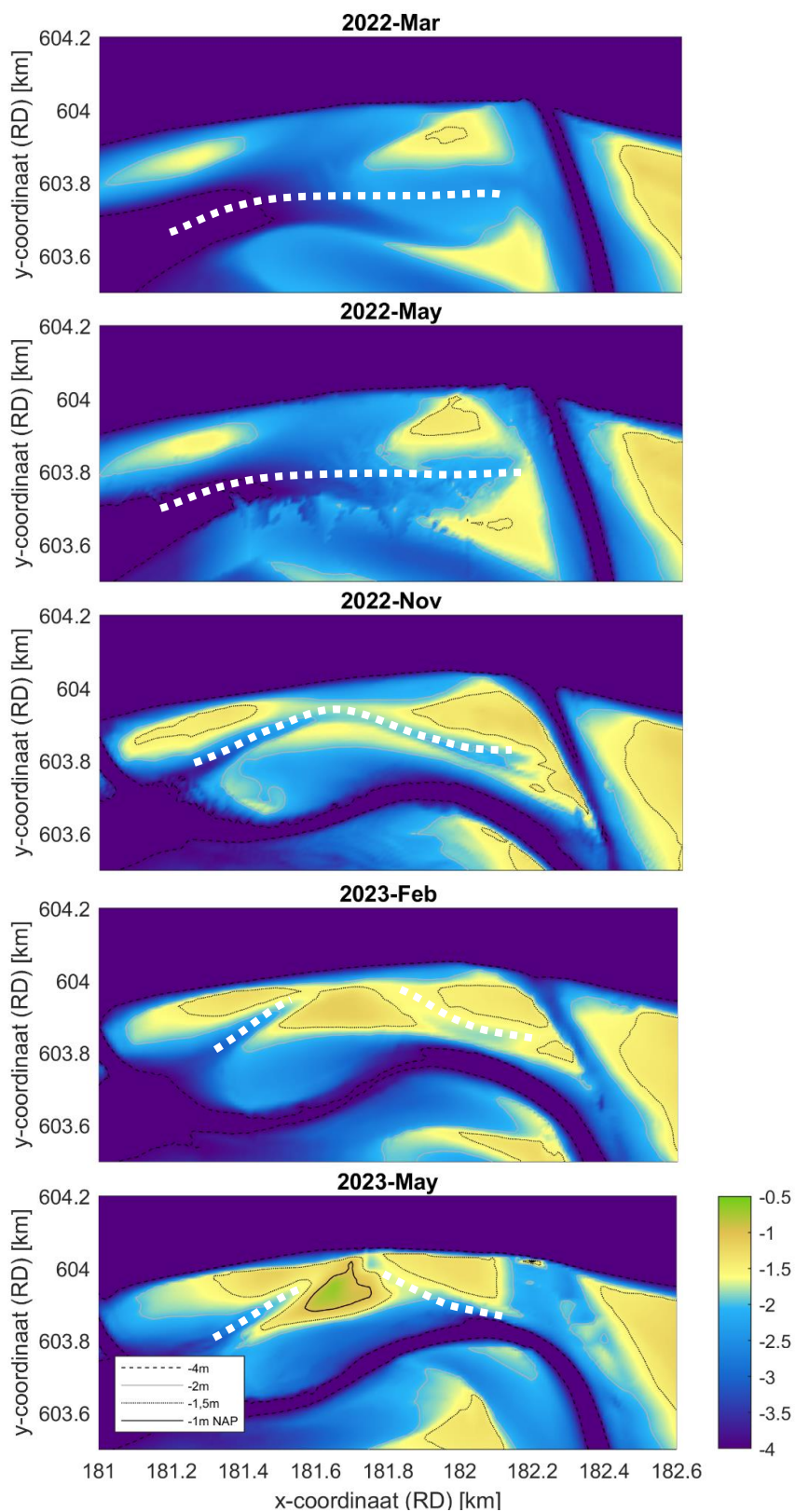


Figuur 2.15 Ontwikkeling van verschillende dieptecontouren door de tijd (2016-2023).



Figuur 2.16 Recente bodemkaarten van het knelpuntgebied, die het ontstaan van het ondieptegebied, de eb- en vloed-schaardynamiek en het uitbochten van de nieuwe geul goed laat zien. Diepte in m t.o.v. NAP.

Voor een aantal varianten op de huidige vaargeul die in het volgende hoofdstuk besproken worden is de ontwikkeling van de ondiepte tussen de Zuiderspruit en de huidige vaargeul van belang. Vanwege de grote dynamiek in het gebied worden in Figuur 2.17 enkele recente opnames van het gebied getoond, waarin de ontwikkeling van het laag intertidaal en hoog subtidaal goed te zien is. Figuur 2.17 laat zien hoe het gebied in de tijd hoger wordt. Ook is duidelijk hoe een oude vloed-schaar (aangegeven met de witte stippellijn) noordwaarts migreert en wordt dichtgedrukt. Aan de oostzijde, waar de vroegere vaargeul liep, ontstaat in de laatste maanden ruimte, vermoedelijk door het rechtdoor oversteken van de eb-stroom. Van de ondiepere gedeeltes in deze zone is het onduidelijk of deze echt zijn of artefacten als gevolg van meeton nauwkeurigheden zijn. Tegelijkertijd hoogt de westzijde van het gebied verder op (groen in het onderste paneel van Figuur 2.17).



Figuur 2.17 Ontwikkeling van het ondieptegebied ten noorden van de huidige vaargeul. De kaart van mei 2022 bevat fouten in de bodemdata, maar geeft wel aan dat de bodemligging tussen maart en mei 2022 redelijk stabiel was. Diepte in m t.o.v. NAP.

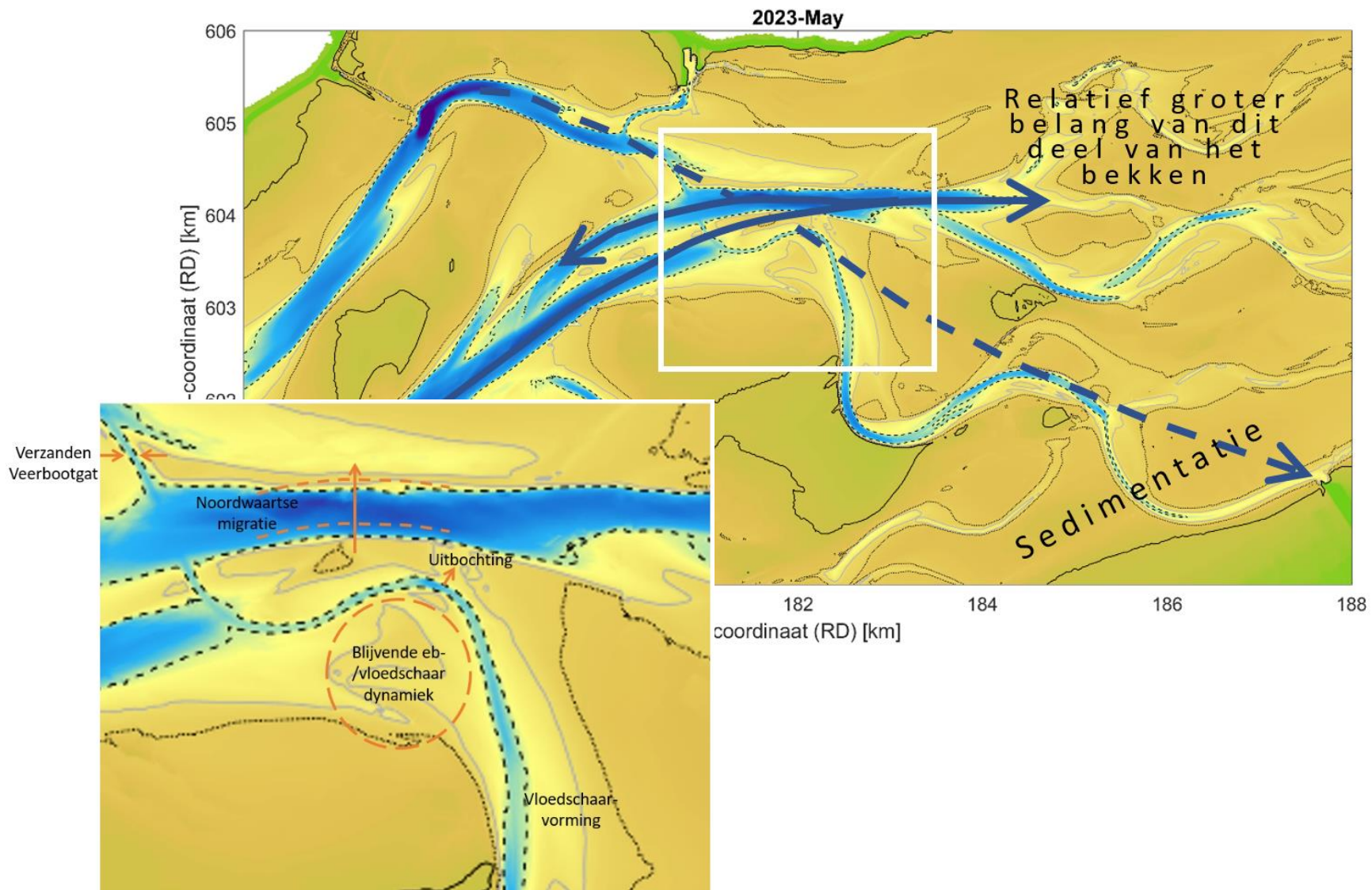
2.3 Synthese

De vaargeul heeft verschillende delen, die verschillend ontwikkelen. Het meest noordelijke deel, in de Reegeul en het Molengat, wordt in deze studie slechts beperkt beschouwd. Het gedeelte rond de Zuiderspruit is van belang voor het huidige knelpunt. Ten zuiden daarvan vinden we een lange, meanderende vaargeul naar Holwerd.

De sedimentatie aan landwaartse zijde van het bekken leidt tot verandering in de dominantie van geulen in het bekken, omdat het volstromen en afwateren van het noordoostelijke deel van het bekken relatief een groter aandeel heeft gekregen in het totaal. Deze grootschalige verandering stuurt deels de ontwikkeling van de geulen, met een west-oostwaarts georiënteerde Zuiderspruit. De vaarroute ligt op een vaste locatie en wordt hierdoor doorkruist. Hierdoor is er ruimte ontstaan voor een ondiep en dynamisch gebied met elkaar ontwijkende eb en vloedscharen, waarbij de migrerende ebscharen een quasi-cyclisch gedrag vertonen. Het ontstaan van deze eb- en vloedscharen is een indicatie dat het waterstandsverhang over het gebied groot is, waardoor stroomsnelheden hoog zijn.

Verderop in de vaargeul, richting Holwerd, is sprake van voortdurend uitbochtende geulen, waarbij nieuwe vloedscharen ontstaan. In 2019 is de onderhouden vaarroute verlegd van een ebgeul naar een vloedschaar. Inmiddels is die geul ook alweer aan het uitbochten en is een nieuwe vloedschaar ontstaan.

Bovenstaande morfologische ontwikkelingen zijn samengevat in Figuur 2.18.

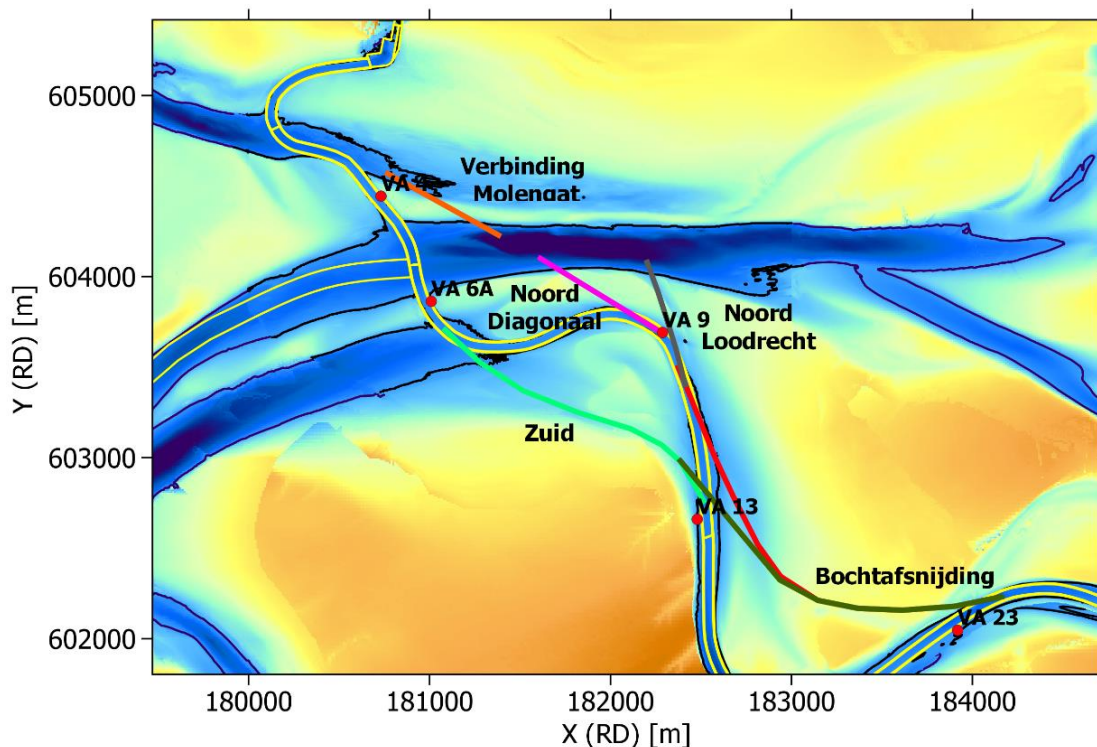


Figuur 2.18 Belangrijkste grootschalige morfologische veranderingen voor de ontwikkeling van de vaargeul rond het knelpunt.

3 Hydrodynamiek bij ingrepen in vaargeultracé

3.1 Introductie varianten

Op basis van de huidige bodemligging en de morfologische ontwikkelingen is een aantal varianten voor de ligging van de vaargeul gedefinieerd. Drie van deze varianten ('Noord Loodrecht', 'Noord Diagonaal' en 'Zuid') bieden een alternatieve vaarroute in de omgeving van het knelpunt tussen VA6 en VA13 (zie locatie boeien in Figuur 3.1). Twee aanvullende varianten ('Bochtafsnijding' en 'Molengat') bestaan uit een ingreep in een ander gedeelte van de vaarroute, met als voornaamste doel om de aanstroming richting de vaarroute in de omgeving van het knelpunt te verbeteren. De verbeterde aanstroming zal dan moeten leiden tot een stabielere ligging van de vaargeul en betere bevaarbaarheid.



Figuur 3.1 Varianten in de vaarroute rondom het knelpunt tussen VA6 en VA13: Noord Loodrecht (grijs), Noord Diagonaal (roze), Zuid (lichtgroen), Bochtafsnijding (rood en donkergroen, afhankelijk van of deze gecombineerd wordt met variant Zuid) en Nieuwe verbinding met Molengat (oranje). De huidige vaarroute is weergegeven als gele polygoon. De zwarte doorgetrokken lijn toont de -3,8 m NAP dieptecontour op basis van recente bodemdata.

De huidige vaarroute sluit ten westen van een ondiepte bij VA6A aan op de Zuiderspruit, waardoor de vaarroute deels in het verlengde van het Scheepsgat ligt. Tegelijkertijd zijn de passeermogelijkheden op dit stuk van de vaarroute beperkt. In de varianten Noord Loodrecht (grijs in Figuur 3.1) en Noord Diagonaal (roze in Figuur 3.1) wordt de ondiepte tussen het Scheepsgat en de Zuiderspruit verder naar het oosten doorgestoken. De scherpe bocht in de vaargeul bij VA9 wordt hierdoor (deels) vermeden. Tegelijkertijd ontstaan met deze routes passeermogelijkheden op het deel van de vaarroute dat in de Zuiderspruit komt te liggen. Het verschil tussen de varianten Noord Loodrecht en Noord Diagonaal is de oriëntatie en locatie van de aansluiting op de Zuiderspruit.

Variante Zuid (lichtgroen in Figuur 3.1) is een doorsteek ten zuiden van de huidige vaargeul. De aansluiting op de Zuiderspruit ligt hierbij nog steeds bij de huidige locatie van VA6A. Deze variant ligt langs de relatief stabiele plaatrand van de Piet Scheve plaat, ten zuiden van het dynamische gebied met eb- en vloedcharen, en sluit bij VA13 aan op de huidige vaargeul.

Twee ingrepen die wellicht bijdragen aan een betere oriëntatie van de aanstroming richting het knelpunt zijn een bochtafsnijding tussen VA13 en VA23 (donkergroen/rood in Figuur 3.1) en een nieuwe verbinding tussen de Zuiderspruit en het Molengat (oranje in Figuur 3.1). De bochtafsnijding zorgt voor een kortere vaarroute en daardoor een groter waterstandsverhang in de vaargeul. Dit kan het ontstaan en de ontwikkeling van eb- en vloedcharen mogelijk onderdrukken. De bochtafsnijding kan uitgevoerd worden in combinatie met één van de eerder genoemde doorstekingen. Afhankelijk daarvan zal de aansluiting op de vaargeul iets anders georiënteerd zijn (donkergroen of rood in Figuur 3.1). De nieuwe verbinding met het Molengat ligt in het verlengde van en is bedoeld als aanvulling op variant Noord Diagonaal en in mindere mate een aanvulling op variant Noord Loodrecht. Mogelijk zorgt deze ingreep voor een meer open verbinding tussen de vaargeul en het Molengat, zodat het deel van de vaargeul door de ondiepte tussen het Scheepsgat en de Zuiderspruit meer stroom gaat trekken.

Modellschematisatie en bodemdata

Voor de hydrodynamische modelberekeningen wordt gebruik gemaakt van een 3D Delft3D-FM modellschematisatie die is ontwikkeld voor eerdere studies rond de vaargeul Holwerd-Ameland (Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020) op basis van een modellschematisatie van de gehele Nederlandse Waddenzee (Vroom et al., 2020). Deze modellschematisatie bevat de hele Nederlandse Waddenzee, inclusief de zeegaten en buitendelta's en de Noordzeekust van de Waddeneilanden. Ten zuiden van Ameland is de horizontale resolutie van het rekenrooster verhoogd tot ongeveer 25 m x 25 m. De verticale resolutie van dit model is 10 σ -lagen.

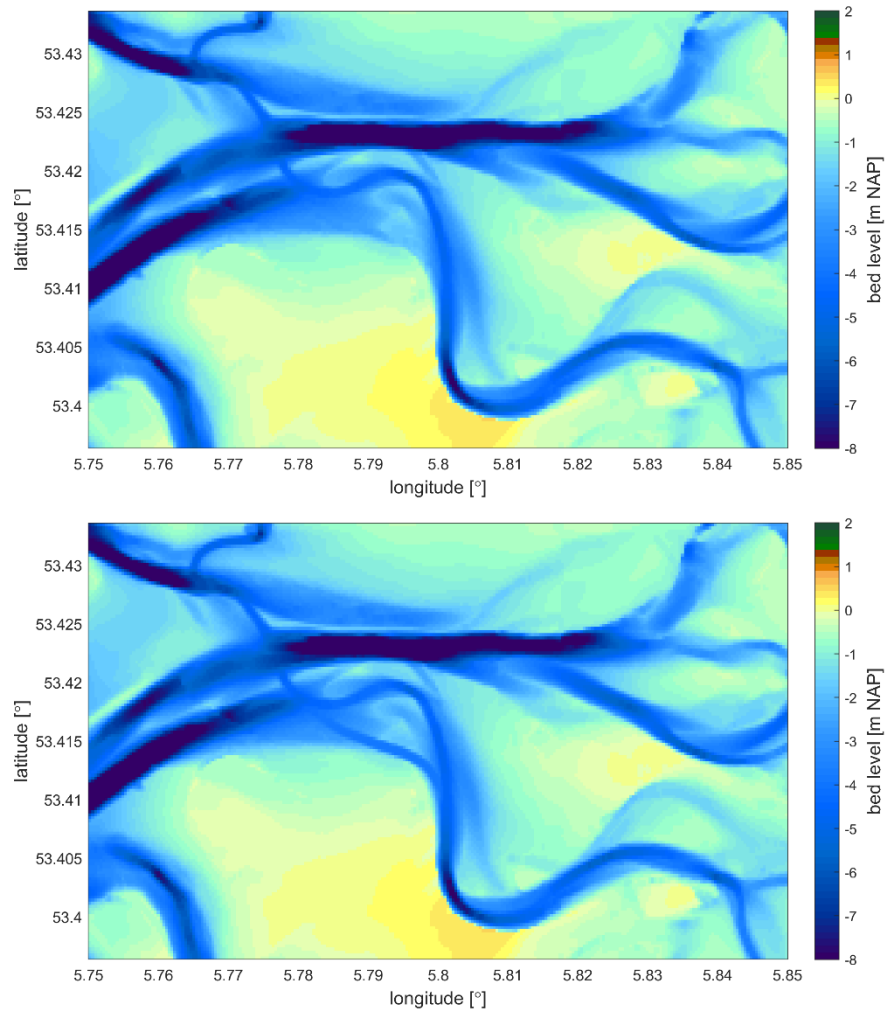
Als simulatieperiode wordt de periode van 1 januari tot 1 april 2019 gebruikt. Deze periode omvat variaties in de waterbeweging door de spring-doodtij cyclus en door meteorologische forcering. Hydrodynamische randvoorwaarden zijn afgeleid uit modelresultaten van het Delft3D-FM Dutch Continental Shelf Model (DCSM, modelopzet beschreven door Zijl et al., 2018). De meteorologische forcering is gebaseerd op data uit ERA5.

Voor de modelbodem ten zuiden van Ameland wordt gebruikt gemaakt van de Vaklodingen die in 2017 zijn ingewonnen en beheerlodingen die sindsdien zijn ingewonnen. Onderstaande datasets zijn daarbij gestapeld, waarbij oude data vervangen wordt wanneer nieuwe data beschikbaar is:

- Vaklodingen 2017 (20 m resolutie);
- Beheerlodingen mei 2022 (10 m resolutie; subtidaal en een groot deel van het intertidaal gebied van het Scheepsgat tot het wantij);
- Beheerlodingen Q1 2023 (vaargeul Holwerd-Ameland (1 m resolutie) en de omgeving van het knelpunt (5 m resolutie));
- Beheerlodingen april 2023 (2 m resolutie; omgeving van het knelpunt).

De resulterende bodemligging in het model voor de huidige situatie is weergegeven in het bovenste paneel van Figuur 3.2. De verschillende ingrepen zijn in de modelbodem verwerkt door de bodemdata binnen een polygoon van 50 m breed te verdiepen tot -3,8 m NAP. Aan de zijkanten van de vaargeul is een breedte van 20 m gebruikt als geultalud. Ter illustratie is de modelbodem voor één van de varianten (Zuid) weergegeven in het onderste paneel van Figuur 3.2. Voor de andere varianten is de modelbodem opgenomen in Bijlage A.4. In de modelberekeningen voor de verschillende varianten blijft de huidige vaarroute aanwezig. Omdat er geen morfologische veranderingen worden uitgerekend blijft de bodemligging

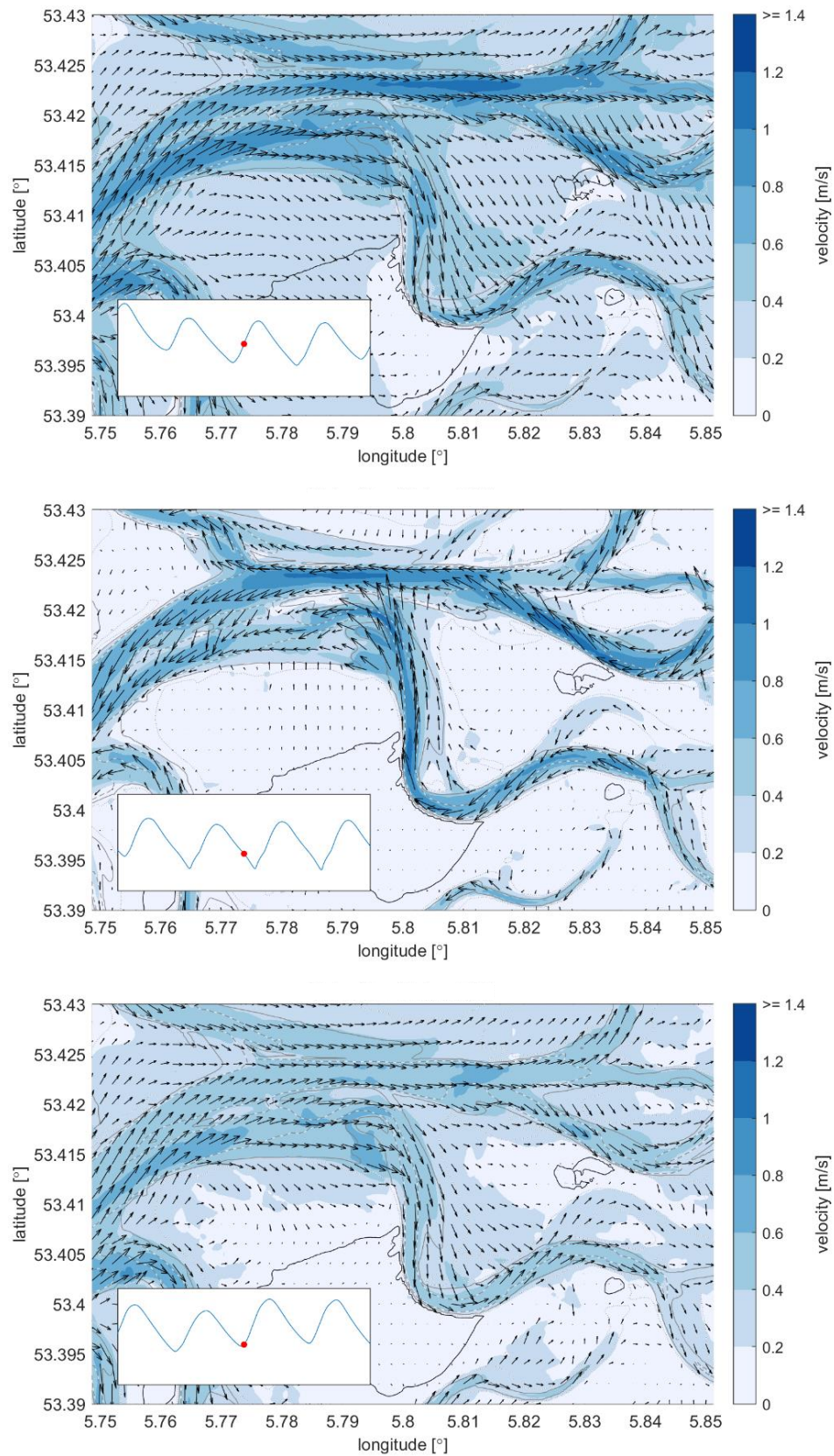
gedurende de modelsimulatie hetzelfde. De gevolgen van het openhouden of dempen van de huidige vaarroute bij het uitvoeren van een ingreep wordt besproken in Paragraaf 3.9.



Figuur 3.2 Bodemligging in modelberekeningen voor de huidige situatie (boven) en voor variant Zuid (onder).

3.2 Hydrodynamiek in de huidige situatie

De stroomvelden bij maximale vloedstroming, bij maximale ebstroming en bij laagwater in Figuur 3.3 geven een beeld van het volstromen en de afwatering van het gebied en van de variatie in stroomsnelheden gedurende het getij. Het deel van het kombergingsgebied rond het zuidoostelijke deel van de vaarroute Holwerd-Ameland wordt tijdens vloed voor een groot deel gevuld vanuit het Scheepsgat. Bij eb zijn het Scheepsgat en de Zuiderspruit van vergelijkbaar belang voor de afwatering. Bij maximale vloedstroming is de waterstand gewoonlijk hoger dan bij maximale ebstroming. Dit zorgt ervoor dat de ebstroming meer geconcentreerd is in de vaargeul, terwijl de vloedstroming ook gebruik maakt van ondieptes langs de vaargeul. Maximale stroomsnelheden bij eb zijn daardoor hoger dan maximale stroomsnelheden bij vloed. In het drempelgebied ten zuiden van de vaargeul is duidelijk te zien hoe de vloedstroming over het gebied heen loopt en hoe de ebscharen gebruikt worden bij maximale ebstroming, zodat snelheden oplopen tot boven ~1 m/s.

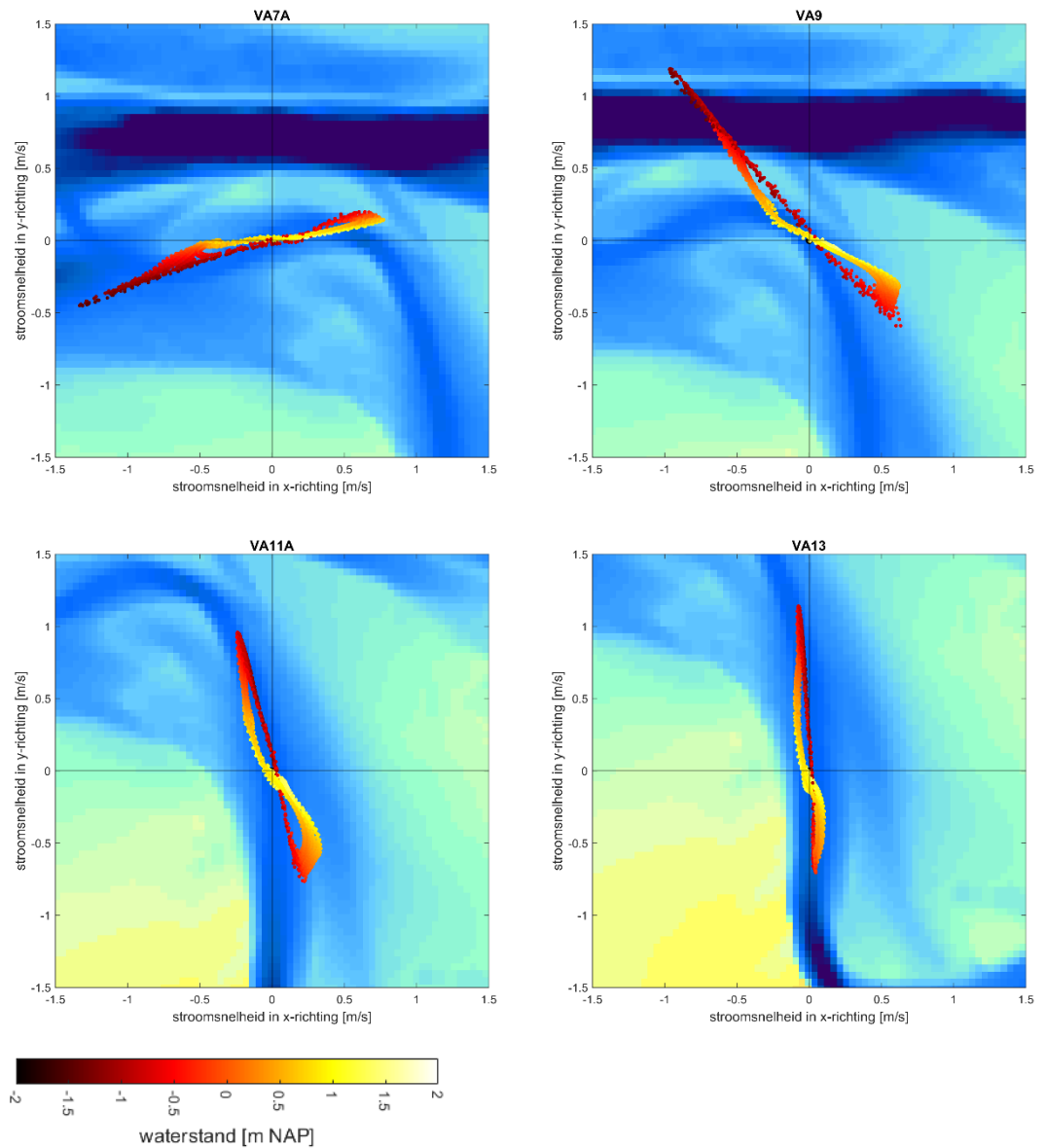


Figuur 3.3 Berekende stroomsnelheden rond de vaargeul Holwerd-Ameland bij maximale vloedstroming (boven), bij maximale ebstroming (midden) en bij laagwater (onder). Vectoren tonen de grootte en richting van de dieptegemiddelde stroomsnelheid. Kleuren tonen de magnitude van de dieptegemiddelde stroomsnelheid.

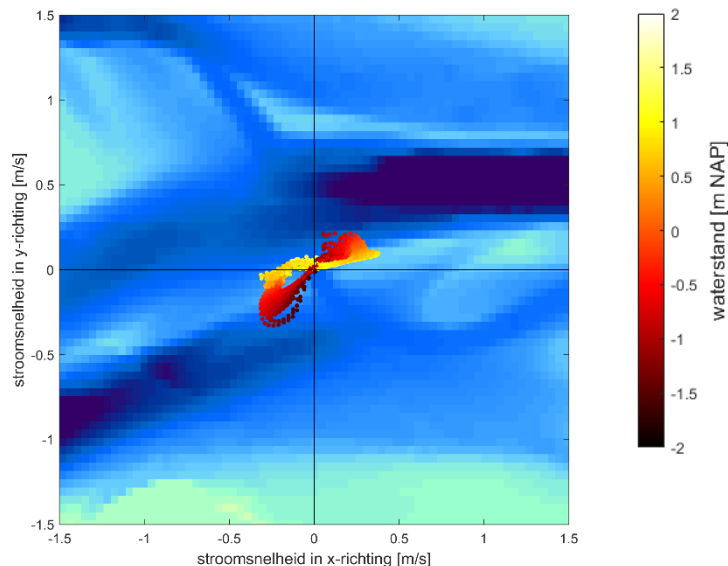
In Figuur 3.6 zijn de gemiddelde volumes weergegeven die bij eb en bij vloed door de vaargeul stromen tussen VA7 en VA15. Tussen VA7 en VA9 is het vloedvolume groter dan het ebvolume. Dit is het gevolg van een efficiënte oriëntatie op het Scheepsgat bij vloed, terwijl het getij bij eb een bijna haakse bocht moet maken bij VA9. Tussen VA9 en VA11A is het getijvolume groter dan tussen VA7 en VA9, omdat de breedte van de geul toeneemt. Tussen VA9 en VA11 is het ebvolume groter dan het vloedvolume, omdat de getijstroming tijdens eb meer geconcentreerd is in de geul, terwijl bij vloed meer van het volume over de platen en door vloedscharen stroomt.

De grootte en oriëntatie van stroomsnelheden in een aantal punten in de vaargeul is geïllustreerd in Figuur 3.4 en Figuur 3.5. Deze zijn van belang voor zowel de bevaarbaarheid als het baggerbezwaar. Op de verschillende punten is de piekstroomsnelheid tijdens vloed ca. 0,75 tot 0,9 m/s. De pieksnelheden bij eb zijn hoger, en variëren tussen de 1 en 1,6 m/s. In de fase van het getij tussen maximale ebstroming en maximale vloedstroming, rond laagwater, is de dieptegemiddelde snelheid uitgelijnd met de oriëntatie van de geul. Rond hoogwater staat de stroming soms onder een hoek op de vaargeul. De grootte van die hoek is naast de fase in het getij ook afhankelijk van de aansluiting van eb- en vloedscharen op de vaargeul.

Ter hoogte van de aansluiting van de vaargeul op de Zuiderspruit bij VA6A zijn de stroomsnelheden in de vaargeul niet groter dan ~0,4 m/s (Figuur 3.5), waardoor sediment niet of nauwelijks uitgespoeld zal worden. Daarnaast staat de getijstroming dwars op de geul, waardoor veel sediment over de platen kan worden aangevoerd naar de diepere geul. Zowel bij maximale eb- als bij maximale vloedstroming staat de stroming haaks op de geul.



Figuur 3.4 Berekende stroomsnelheden op observatiepunten in de huidige vaargeul gedurende een periode van twee weken. De snelheid in de x-richting is weergegeven op de x-as en de snelheid in de y-richting is weergegeven op de y-as. Daarmee geeft het punt zowel de stroomsnelheid weer, als de richting van de stroming. De kleur geeft de waterstand aan waarbij de stroomsnelheid is opgetreden.



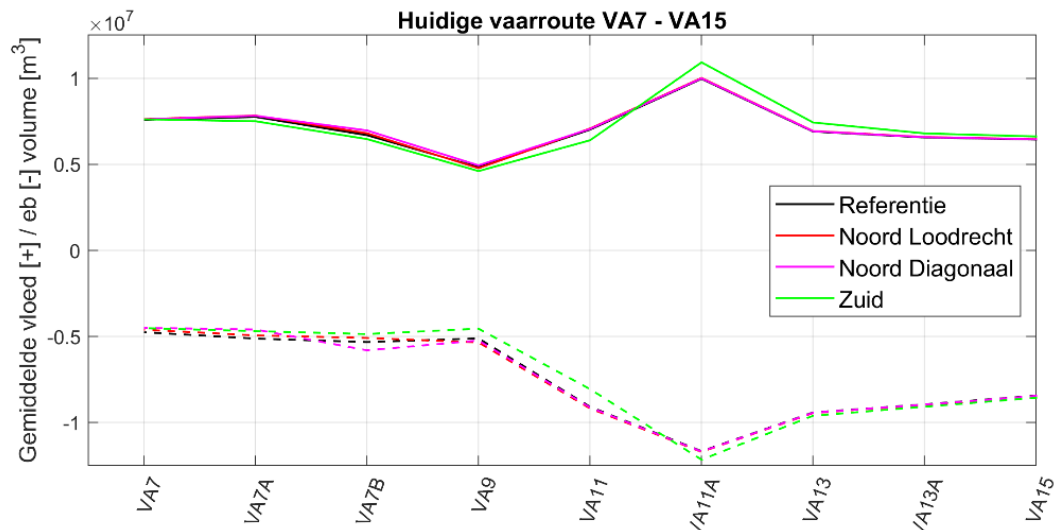
Figuur 3.5 Berekende stroomsnelheden in een observatiepunt bij VA6A. De kleur geeft de waterstand aan waarbij de stroomsnelheid is opgetreden: rood = laagwater, geel = hoogwater (zie legenda van Figuur 3.4).

3.3 Algemene bevindingen voor alle varianten

De verschillende ingrepen laten deels overeenkomstige effecten op de waterbeweging zien. Die algemene bevindingen worden in deze paragraaf besproken. In de volgende paragrafen wordt per variant verder toegelicht wat de effecten zijn van de ingreep op de hydrodynamica in de huidige vaarroute en welke debieten en stroomsnelheden in een nieuwe route verwacht mogen worden.

Uit modelberekeningen voor de drie hoofdvarianten (d.w.z. Noord Loodrecht, Noord Diagonaal en Zuid) blijkt dat deze maar een klein effect hebben op het gemiddelde debiet door de huidige vaarroute, waardoor de huidige vaarroute de dominante geul blijft voor het vullen en afwateren van het achterliggende kombergingsgebied (NB de huidige vaarroute heeft in het model na de ingreep dezelfde dimensies als in de referentieberekening zonder ingrepen). Daarnaast hebben de ingrepen alleen een lokaal effect op de stroming in de vaargeul. Dat is geïllustreerd aan de hand van de gemiddelde eb- en vloeddebieten door de geul tussen VA7 en VA15 in Figuur 3.6.

- De twee noordelijke doorsteken hebben bij vloed nauwelijks effect op het debiet door de huidige vaarroute bij VA7 en VA7A. Bij eb zorgen de varianten ervoor dat het debiet door de huidige vaarroute bij VA7 en VA7A iets afneemt. Na het aantakken van de noordelijke doorsteken op de huidige route (d.w.z. voorbij VA9) veranderen de debieten door de vaargeul niet.
- Variant Zuid zorgt ervoor dat zowel bij eb als bij vloed een deel van het debiet door de nieuwe geul stroomt, zodat het debiet door de huidige vaarroute tussen VA7 en VA11 iets afneemt. Die afname is echter minimaal ten opzichte van het totale debiet dat door de geul stroomt. Ten zuiden van de ingreep (d.w.z. vanaf VA13) veranderen de debieten door de vaargeul niet.



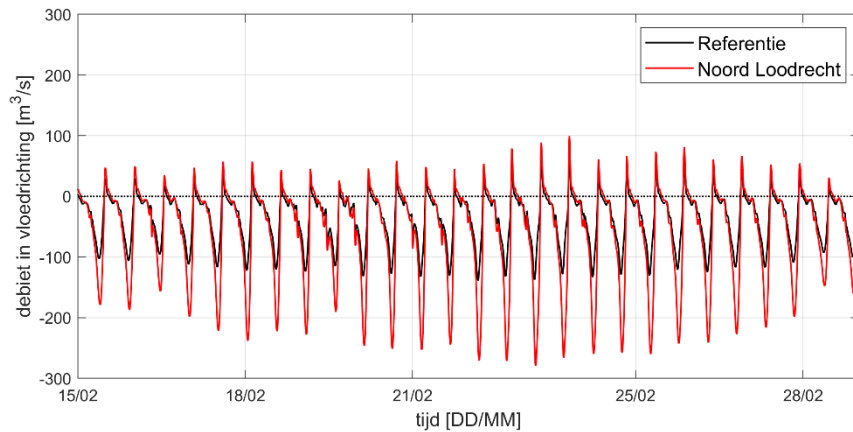
Figuur 3.6 Berekende gemiddelde getijvolumes die bij vloed en eb door de huidige vaargeul stromen ter hoogte van boeien VA7 – VA15 voor de huidige situatie (Referentie) en bij de varianten Noord Loodrecht, Noord Diagonaal en Zuid.

3.4 Variant Noord Loodrecht

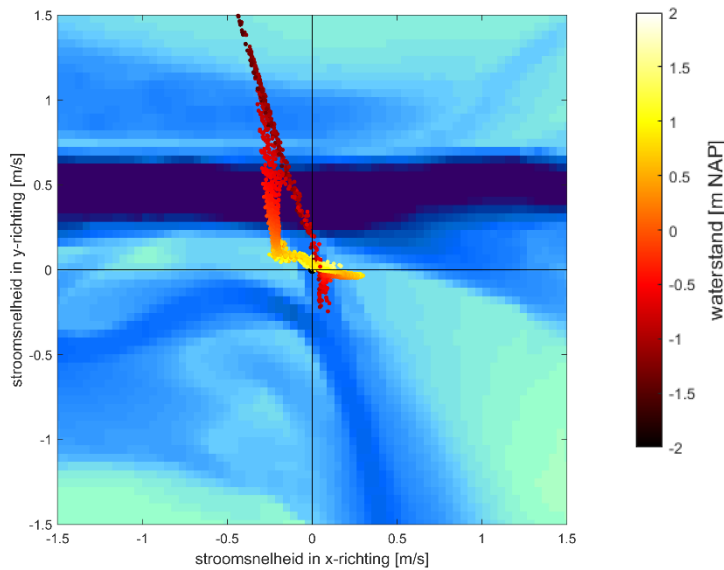
Bij de variant Noord Loodrecht gaat de nieuwe doorsteek een klein debiet trekken bij eb, zoals weergegeven in de tijdseries in Figuur 3.7. Bij vloed heeft deze doorsteek nauwelijks effect op het stromingspatroon, omdat de doorsteek haaks op de vloedrichting ligt. De dieptegemiddelde snelheden in de doorsteek Noord Loodrecht zijn weergegeven in Figuur 3.8. Bij maximale ebstroming loopt de dieptegemiddelde snelheid op tot boven $\sim 1,5$ m/s. Gedurende een groot gedeelte van de vloedfase staat de stroming haaks op de doorsteek, omdat de vloedstroming dan van west naar oost over de ondiepe bank loopt. Alleen aan het begin van de vloed, wanneer de waterstand nog relatief laag is, is de stroming in de geul naar het zuiden gericht, in de lengterichting van de geul (weergegeven in Figuur 3.8).

Ten zuidoosten van de doorsteek heeft de variant Noord Loodrecht geen effect op de debieten en stroomsnelheden in de vaargeul (zie Figuur 3.6). In het deel van de huidige vaargeul ten westen van de doorsteek (d.w.z. bij VA7-VA7B) nemen de pieksnelheden bij eb met maximaal $0,2$ m/s af ten gevolge van de doorsteek Noord Loodrecht. De maximale stroomsnelheden in de geul blijven echter ruim boven $1,0$ m/s. Bij vloed verandert er nauwelijks iets aan de stroming in de vaargeul (niet weergegeven).

In de huidige vaargeul is zonder de doorsteek al onderhoudsbaggerwerk nodig om de vaargeul op diepte te houden. De vergelijking tussen de stroomsnelheden in de vaargeul en de doorsteek tijdens vloed (resp. $0,75$ - $0,9$ m/s en $0,3$ m/s) en eb (resp. 1 - $1,6$ m/s en $>1,5$ m/s) geeft een indicatie dat de huidige vaargeul verder zal sedimenteren wanneer die niet meer onderhouden wordt, ten gunste van het debiet door de doorsteek. Echter, tijdens vloed is de doorsteek slechter georiënteerd dan de huidige vaarroute, omdat sediment waarschijnlijk vanaf de platen in de geul wordt geveegd. De stroomsnelheden in de huidige vaargeul zijn tijdens vloed groter dan in de doorsteek. De snelheid waarmee de oude geul na het openen van de huidige vaarroute in het najaar van 2022 is gesedimenteerd geeft daarnaast ook aan dat de doorsteek Noord Loodrecht na aanleg flink onderhouden zal moeten worden.



Figuur 3.7 Tijdsreeks van het debiet door de doorsteek Noord Loodrecht.



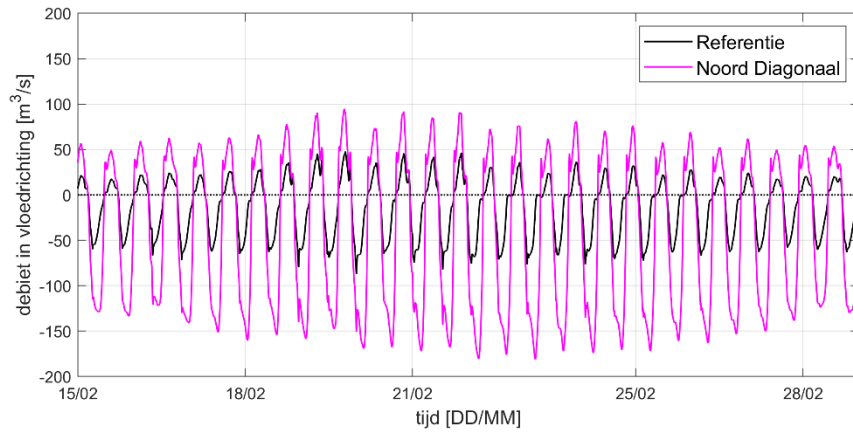
Figuur 3.8 Berekende stroomsnelheden in een observatiepunt in de doorsteek Noord Loodrecht. De kleur geeft de waterstand aan waarbij de stroomsnelheid is opgetreden: rood = laagwater, geel = hoogwater.

3.5 Variant Noord Diagonaal

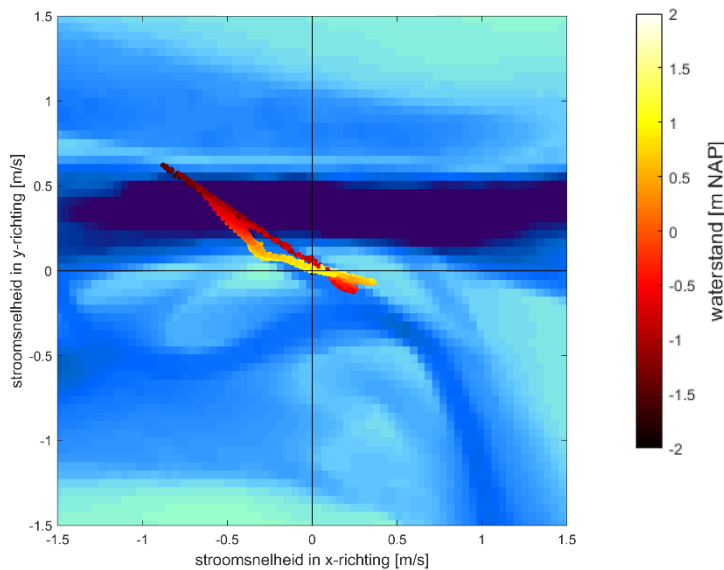
Tot op zekere hoogte zijn de effecten van varianten Noord Diagonaal en Noord Loodrecht vergelijkbaar. Door de schuine oriëntatie van de doorsteek ten opzichte van de Zuiderspruit stroomt er in variant Noord Diagonaal ook een klein debiet door de geul bij vloed, in tegenstelling tot variant Noord Loodrecht. Dat is weergegeven in de tijdsreeks van het debiet door de doorsteek Noord Diagonaal in Figuur 3.9. Nog steeds zijn debieten door de doorsteek bij vloed een stuk kleiner dan bij eb.

Stroomsnelheden in de doorsteek Noord Diagonaal zijn weergegeven in Figuur 3.10. Pieksnelheden bij eb lopen op tot ongeveer 1 m/s. Dit is een stuk kleiner dan de pieksnelheden in de doorsteek Noord Loodrecht. Bij de afwatering van het achterliggende kombergingsgebied stroomt een deel van het debiet vanuit het zuiden namelijk rechtdoor over de ondiepte en de oude geul richting de Zuiderspruit, zodat het debiet dat de vaargeul volgt kleiner is.

De vloedstroming loopt van west naar oost over de doorsteek Noord Diagonaal, schuin ten opzichte van de oriëntatie van de geul. Stroomsnelheden bij vloed lopen op tot ongeveer 0,4 m/s. De schuine oriëntatie van de doorsteek zorgt er dus voor dat stroomsnelheden in de richting van de geul bij vloed iets groter zijn dan in variant Noord Loodrecht. De richting van de stroomsnelheden ten opzichte van de oriëntatie van de doorsteek zijn voor de bevaarbaarheid gunstiger dan in variant Noord Loodrecht en leidt mogelijk ook tot minder sedimentaanvoer vanaf de ondiepte. De lagere stroomsnelheden tijdens eb in vergelijking met variant Noord Loodrecht zijn echter ongunstig voor het baggerbezwaar.



Figuur 3.9 Tijdsreeks van het debiet door de doorsteek Noord Diagonaal.



Figuur 3.10 Berekende stroomsnelheden in de doorsteek Noord Loodrecht. De kleur geeft de waterstand aan waarbij de stroomsnelheid is opgetreden: rood = laagwater, geel = hoogwater.

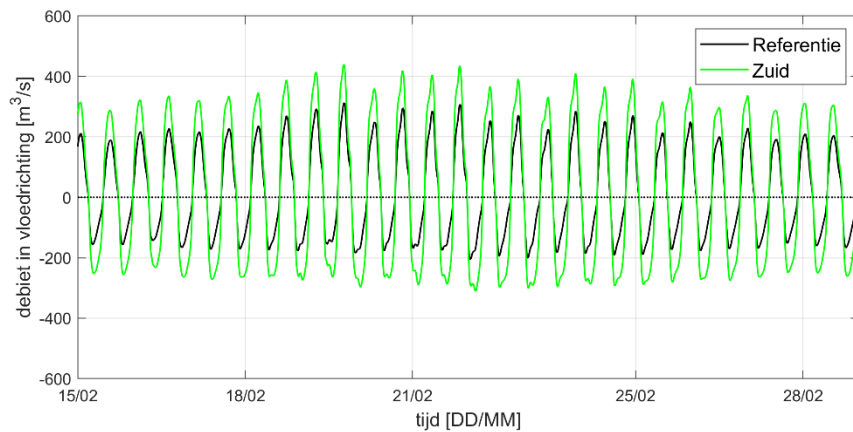
3.6 Variant Zuid

Op de plek van de doorsteek in variant Zuid liggen al eb- en vloedscharen, zodat een deel van het debiet naar en van het achterliggende kombergingsgebied ook in de huidige situatie al langs de Piet Scheve plaat stroomt. Bij vloed stroomt er een piekdebit door de zuidelijke doorsteek dat vergelijkbaar van grootte is (300-400 m³/s, groene lijn in Figuur 3.11) als het

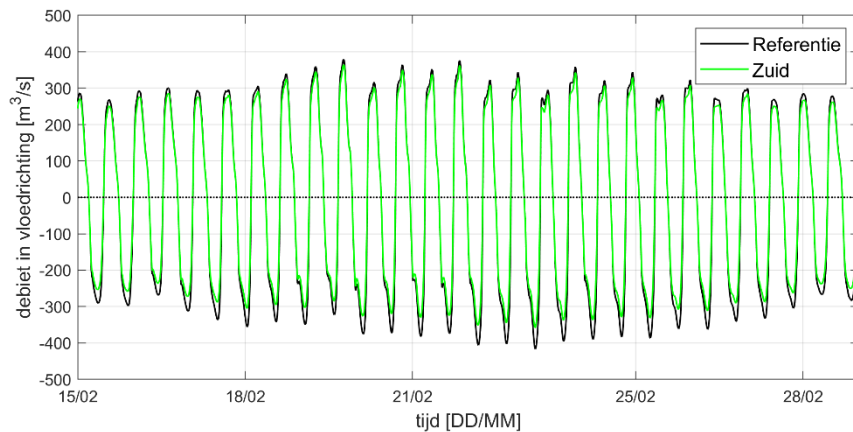
piekdebiet dat bij vloed door de huidige vaargeul blijft stromen (250-380 m³/s, groene lijn in Figuur 3.12). Bij vloed is dus sprake van twee gelijkwaardige geulen. Bij eb blijft de huidige vaarroute de belangrijkste geul (250-400 m³/s), ondanks dat de zuidelijke doorsteek ook bij eb meer debiet (250-300 m³/s) trekt dan in de referentie.

In Figuur 3.12 valt op dat het piekdebiet door de zuidelijke doorsteek nauwelijks ten koste gaat van het debiet door de huidige vaarroute, in lijn met eerdere algemene bevindingen. In variant Zuid gaat de stroming door het gebied met eb- en vloedscharen zich dus concentreren in de doorsteek, maar is de invloed op de stroming in de huidige vaarroute klein.

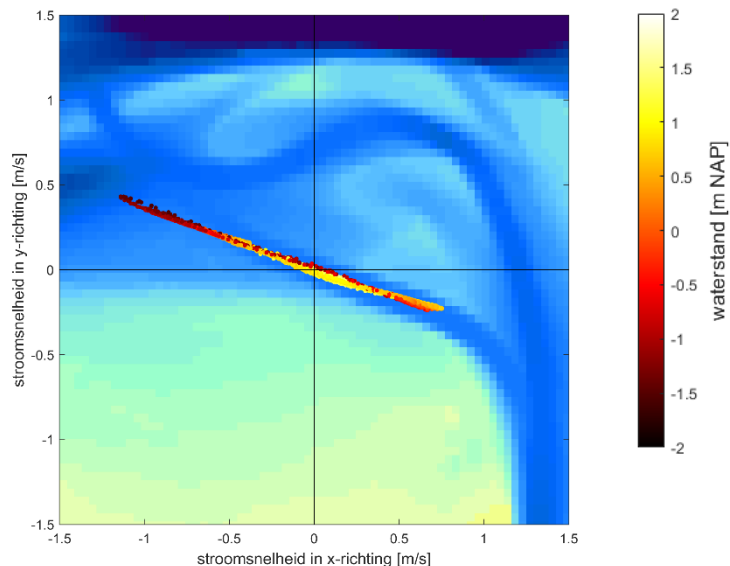
Stroomsnelheden in de zuidelijke doorsteek zijn gedurende de gehele getijcyclus uitgelijnd met de oriëntatie van de geul (zie Figuur 3.13), langs de Piet Scheve plaat. De grootte van stroomsnelheden is met een piekvloedsnelheid van ~0,7 m/s en een piekebsnelheid van ~1,2 m/s vergelijkbaar met de stroomsnelheden in de huidige vaarroute (zie Figuur 3.4).



Figuur 3.11 Tijdseries van het debiet door de doorsteek Zuid.



Figuur 3.12 Tijdseries van het debiet door de huidige vaargeul bij VA9.



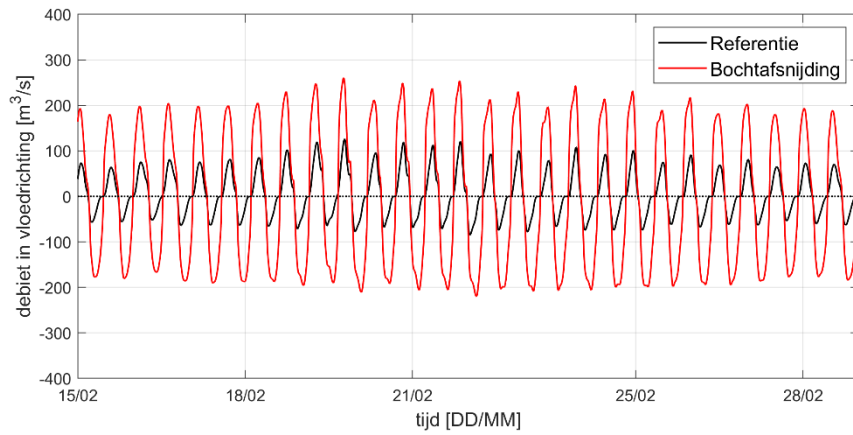
Figuur 3.13 Berekende stroomsnelheden in de doorsteek Zuid. De kleur geeft de waterstand aan waarbij de stroomsnelheid is opgetreden: rood = laagwater, geel = hoogwater.

3.7 Bochtafsnijding

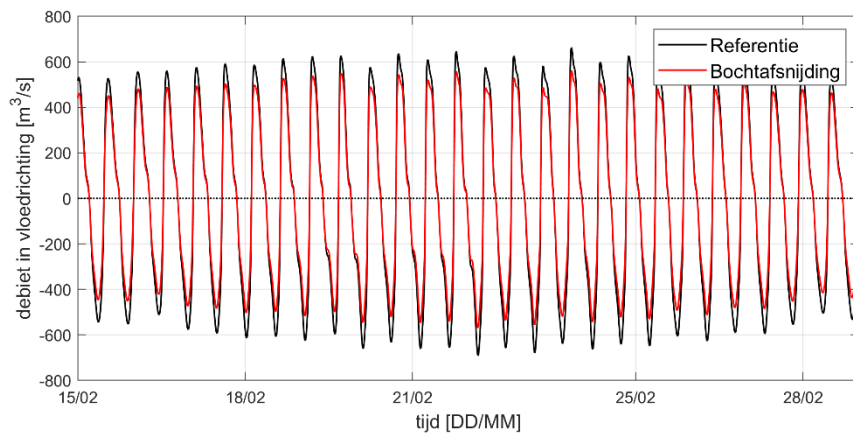
Anders dan de eerder besproken varianten zijn de varianten Bochtafsnijding en Nieuwe verbinding met Molengat (Paragraaf 3.8) geen ingrepen nabij het huidige knelpunt tussen VA6 en VA13, maar ingrepen die de aanstroming richting het knelpunt kunnen verbeteren, eventueel in combinatie met één van de andere ingrepen.

In het geval van de bochtafsnijding nemen de getijvolumes door de huidige vaargeul (d.w.z. de geul die door het verplaatsen van de vaarroute wordt verlaten) tussen VA13A en VA21 met ongeveer 10-20% af (Figuur 3.15). Piekdebieten door de bochtafsnijding (vloed: 200-250 m³/s; eb: 170-200 m³/s, rode lijn in Figuur 3.14) zijn 2 tot 3 keer kleiner dan debieten door de huidige vaarroute (vloed: 500-650 m³/s; eb: 550-700 m³/s, zwarte lijn in Figuur 3.15). Stroomsnelheden in de twee geulen zijn echter vergelijkbaar van grootte, zodat het verschil in debiet voornamelijk bepaald wordt door een verschil in doorstroomoppervlakte tussen de twee geulen. Net ten oosten en net ten westen van de bochtafsnijding neemt het gemiddelde getijvolume toe ten koste van de stroming over de platen (Figuur 3.16), omdat de weerstand in de geul afneemt.

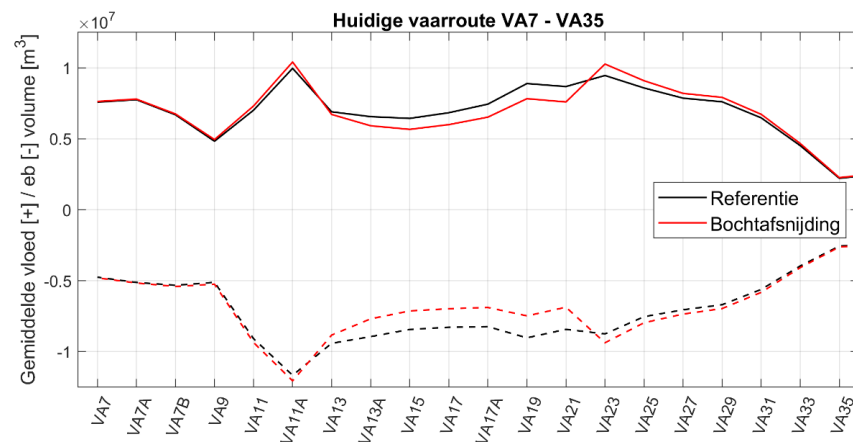
De bochtafsnijding is een vergelijkbare ingreep als de bochtafsnijding die in 2019 is uitgevoerd tussen VA23 en VA33 (Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2021): toen werd een vloodschaar van vergelijkbare grootte doorgestoken. Om te zorgen dat er een groter debiet door de nieuwe geul zou gaan stromen is de oude geul destijds gedempt door middel van het storten van baggerspecie. Het dempen van de bestaande geul zou ook bij de huidige ingreep kunnen helpen om het debiet door de bochtafsnijding te vergroten.



Figuur 3.14 Tijdsreeks van het debiet door de bochtafsnijding.



Figuur 3.15 Tijdsreeks van het debiet door de huidige vaargeul bij VA17.



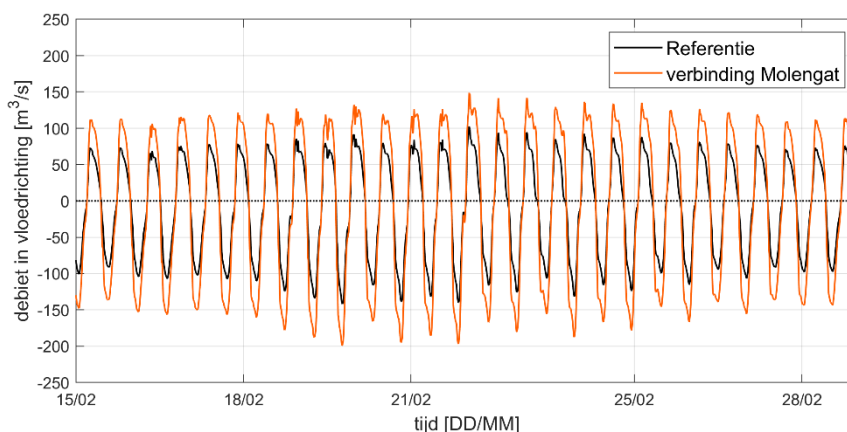
Figuur 3.16 Berekende gemiddelde getijvolumes die bij vloed en eb door de huidige vaargeul stromen ter hoogte van boeien VA7 – VA35 voor de huidige situatie (Referentie) en bij de variant Bochtafsnijding.

Een combinatie van de bochtafsnijding en een ingreep rond het knelpunt bij VA6-VA13 versterkt elkaar niet. Dat wil zeggen dat de bochtafsnijding niet zorgt voor een andere verdeling van debieten over de huidige vaarroute en de zuidelijke of noordelijke doorsteken die in de vorige paragrafen zijn besproken. Tegelijkertijd zorgen de zuidelijke of noordelijke doorsteken er niet voor dat de debietverdeling ter plaatse van de bochtafsnijding verandert. Dit is bepaald aan de hand van modelsimulaties met combinaties van ingrepen waarvan de resultaten verder niet worden getoond.

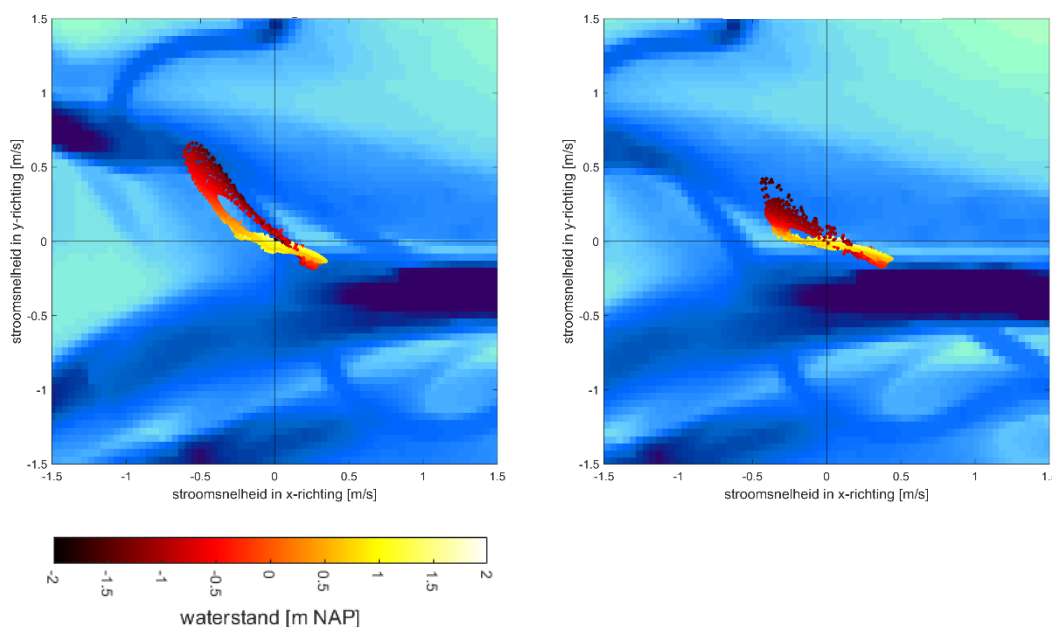
3.8 Nieuwe verbinding met Molengat

Een nieuwe verbinding met het Molengat gaat een deel van het debiet tussen het Molengat en de Zuiderspruit afvoeren (Figuur 3.17), terwijl dat nauwelijks ten koste gaat van het debiet door het Veerbootgat in de huidige vaarroute. De nieuwe verbinding zorgt er dus vooral voor dat het debiet dat voorheen over de platen stroomde nu geconcentreerd is in de geul. Debieten door de nieuwe verbindingsgeul en door het Veerbootgat in de huidige vaarroute zijn na deze ingreep vergelijkbaar van grootte. Hetzelfde geldt voor de stroomsnelheden in de geulen (zie Figuur 3.18). In het Veerbootgat zijn de ebsnelheden groter (tot ongeveer 0,8 m/s) en in de nieuwe verbindingsgeul zijn de vloodsnelheden groter (tot ongeveer 0,5 m/s).

Net als voor de bochtafsnijding geldt dat een nieuwe verbindingsgeul tussen het Molengat en de Zuiderspruit niet zorgt voor een andere verdeling van debieten over de huidige vaarroute en een eventuele doorsteek ter plaatse van het knelpunt tussen VA6 en VA13. Een nieuwe verbindingsgeul met het Molengat kan dus overwogen worden als alternatief voor het Veerbootgat indien voor bevaarbaarheid of vaargeulonderhoud rond VA4 een alternatieve vaarroute gewenst is, maar gaat niet helpen voor het huidige knelpunt tussen VA6 en VA13.



Figuur 3.17 Tijdsreeks van het debiet door de verbindingsgeul tussen het Molengat en de Zuiderspruit.



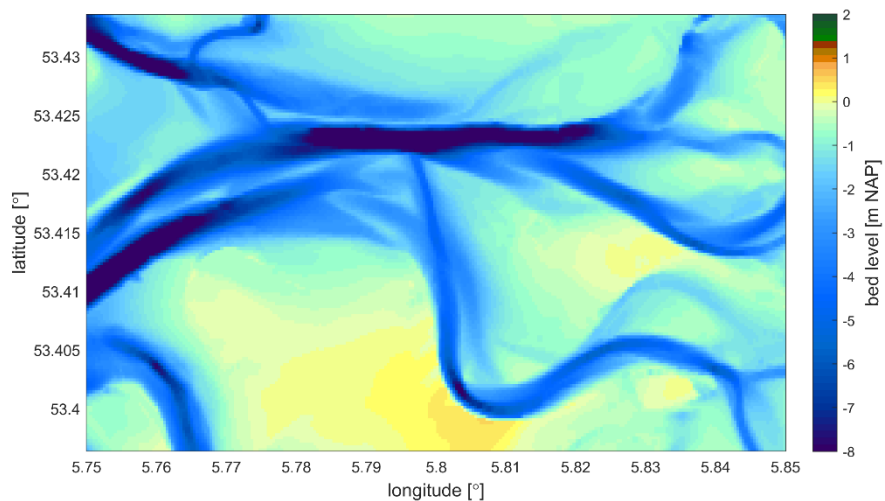
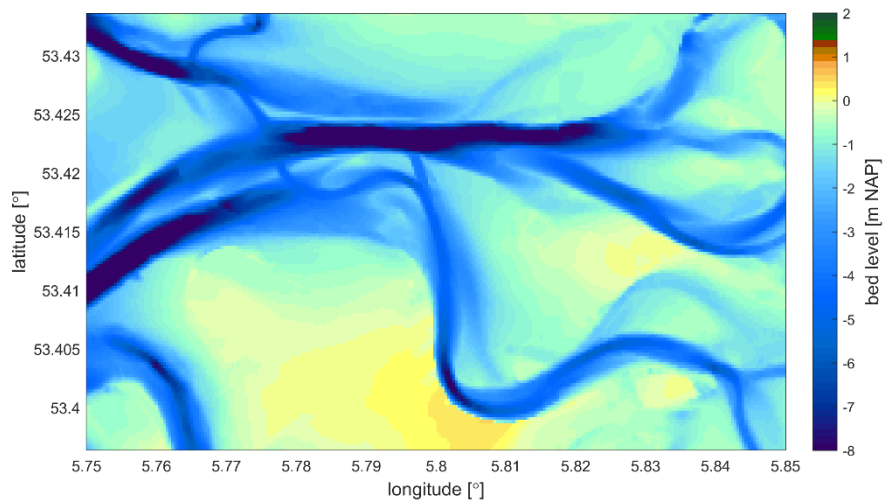
Figuur 3.18 Berekende stroomsnelheden in het Veerbootgat (links) en in de nieuwe verbindingsgeul tussen het Molengat en de Zuiderspruit (rechts) na het aanleggen van die nieuwe verbinding. De kleur geeft de waterstand aan waarbij de stroomsnelheid is opgetreden: rood = laagwater, geel = hoogwater.

3.9 Openhouden of dempen van de huidige vaarroute

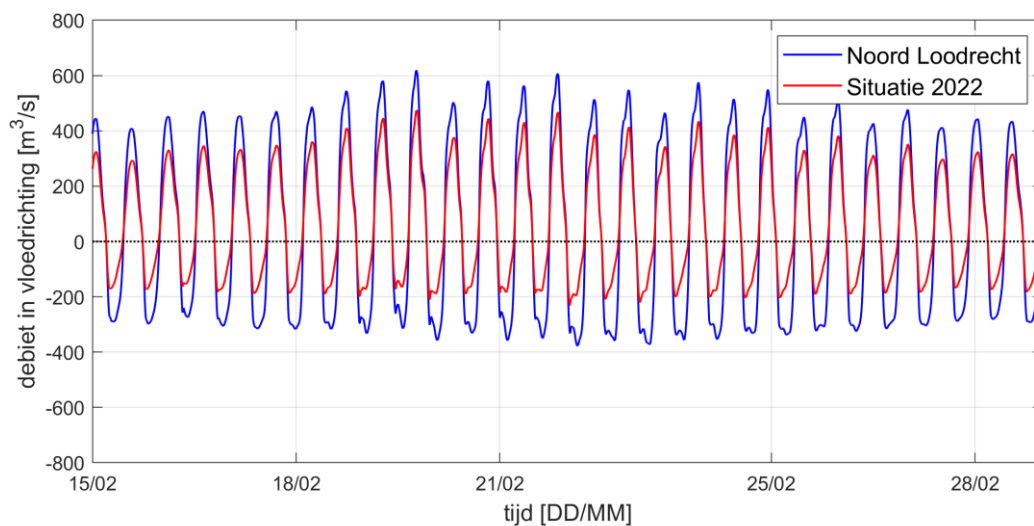
Bij de ingrepen in dit hoofdstuk is de huidige vaarroute steeds intact gebleven in het model. Dit zorgt er doorgaans voor dat de huidige vaarroute de dominante geul blijft bij het (volstromen en) afwateren van het achterliggende kombergingsgebied. In deze paragraaf worden twee modelberekeningen met verschillende bodems gebruikt om het effect van aanzanding in (of het dempen) van de huidige vaarroute op de debietverdeling te beoordelen.

Voor de situatie waarbij de huidige vaarroute opengehouden wordt, is de bodemligging voor variant Noord Loodrecht gebruikt. Voor de modelberekening waarbij de huidige vaarroute gedempt wordt, is de bodemligging gebruikt zoals het geval was vóór het uitvoeren van de geulverlegging in het najaar van 2022. Toen lag de doorsteek namelijk op een vergelijkbare plek als in variant Noord Loodrecht. Beiden zijn te zien in Figuur 3.19. Het uitvoeren van de geulverlegging heeft ervoor gezorgd dat de vaargeul een open verbinding heeft met het Scheepsgat, terwijl dit gebied hiervoor ondieper was met een aantal eb- en vloedscharen.

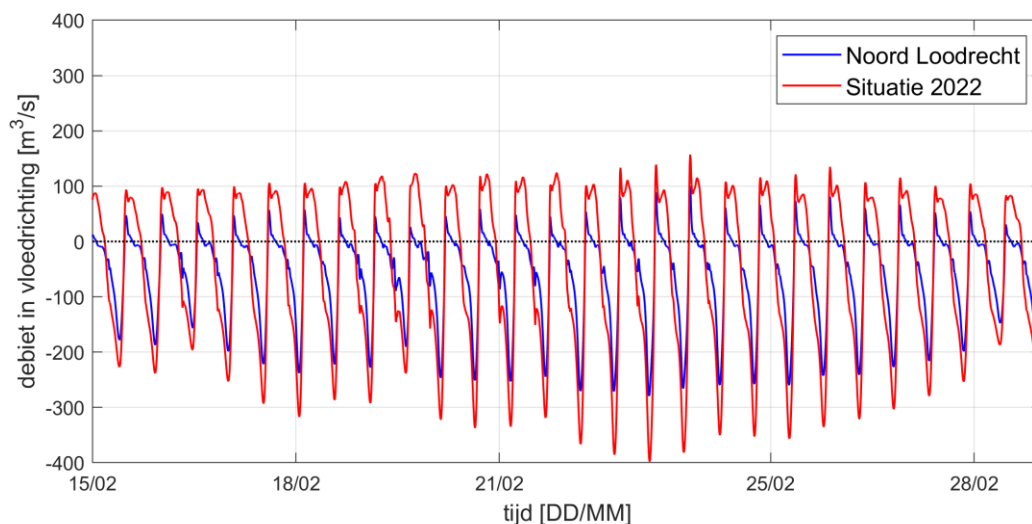
Door de open verbinding met het Scheepsgat in de vorm van de huidige vaargeul blijft het debiet dat door de huidige vaarroute stroomt (blauwe lijn in Figuur 3.20) zowel bij eb als bij vloed groter dan het debiet door de doorsteek Noord Loodrecht (blauwe lijn in Figuur 3.21). Alleen aan het einde van de eb, rond laagwater, voeren de twee geulen een vergelijkbaar debiet af (ongeveer 200-300 m³/s). Zonder de open verbinding met het Scheepsgat wordt de noordelijke doorsteek een stuk belangrijker (Figuur 3.21). Bij vloed stroomt dan een veel groter debiet door de doorsteek (tot ongeveer 100 m³/s), ondanks dat het grootste deel van het vloeddebiet nog steeds door de vloedscharen stroomt (tot ongeveer 400 m³/s). Bij eb worden de piekdebieten door de doorsteek (tot ongeveer 400 m³/s) groter dan door de eb- en vloedscharen.



Figuur 3.19 Bodemligging in modelberekeningen voor variant Noord Loodrecht (boven) en voor de situatie vóór het uitvoeren van de geulverlegging in november 2022 (Situatie 2022; onder).



Figuur 3.20 Tijdsreeks van het debiet door de huidige vaargeul bij VA7A met (Noord Loodrecht) en zonder (Situatie 2022) een open verbinding naar het Scheepsgat.



Figuur 3.21 Tijdseries van het debiet door de noordelijke doorsteek met (Noord Loodrecht) en zonder (Situatie 2022) een open verbinding naar het Scheepsgat.

Het openhouden van de huidige vaargeul zorgt er dus voor dat deze geul dominant blijft ten opzichte van een nieuwe doorsteek. Door aanzanding en/of het plaatsen van baggerspecie in de huidige vaarroute nadat een nieuwe doorsteek in gebruik is genomen kan dit gaan veranderen, zodat de nieuwe doorsteek belangrijker wordt. De stroomsnelheden in de vaargeul zijn sterk afhankelijk van het doorstroomoppervlak in de geulen. Een bredere geul zorgt bijvoorbeeld voor lagere stroomsnelheden.

4 Verwachte morfologische ontwikkeling

Op basis van de morfologische trends en inzichten uit de hydrodynamische modelberekeningen is de verwachte morfologische ontwikkeling in dit hoofdstuk uitgewerkt voor het kombergingsgebied, de huidige vaargeul en specifiek het knelpunt met de varianten Noord Loodrecht, Noord Diagonaal en Zuid.

4.1 Grootschalige ontwikkeling van het bekken

De grootschalige ontwikkeling van de Waddenzee en het bekken van Ameland vormen de randvoorwaarden voor de ontwikkeling van het knelpunt. De belangrijkste grootschalige ontwikkeling betreft de sedimentatie vanaf de landwaartse zijde, die ook de komende decennia naar verwachting nog groter zal zijn dan zeespiegelstijging. Dit betekent dat de komberging aan de zuidzijde van het bekken verder zal afnemen. Ook wordt verdere sedimentatie in het subgetijdengebied verwacht, een trend die de afgelopen decennia ook uit de bodemopnames blijkt. Het is onwaarschijnlijk dat zich een nieuwe, rechtere vaargeul zal gaan ontwikkelen tussen Nes en Holwerd (zoals in de jaren '70 wel aanwezig was, Figuur 2.3). Het huidige knelpunt blijft waarschijnlijk een hoogdynamisch ondieptegebied met verschillende geulen en scharen, dat voor de bevaarbaarheid een knelpunt zal blijven, met bijbehorend baggerbezwaar. Het alternatief voor een vaargeul door dat dynamische gebied is een doorsteek die de wadplaten doorsnijdt.

4.2 Ontwikkeling van de vaargeul

Als gevolg van grootschalige ontwikkelingen in het bekken wordt verwacht dat de Zuiderspruit verder gaat uitbochten en zich daardoor noordwaarts zal verplaatsen. De bank die nu tussen de Zuiderspruit en de vaargeul naar Holwerd ligt wordt daardoor een steeds grotere obstakel in de vaarroute, zowel als de vaarroute om de bank heen loopt en als een doorsteek wordt aangelegd. De vaargeul naar Holwerd wordt door de noordwaartse migratie van de Zuiderspruit in feite verder losgekoppeld van de Zuiderspruit.

De doorsteek bij VA6 staat loodrecht op de getijstroming, waardoor stroomsnelheden in de geul klein zijn. Tegelijkertijd wordt veel sediment in dit stuk geul afgezet, mede doordat de geul ligt ingeklemd tussen plaatgebieden waarop golven veel sediment in suspensie kunnen brengen. Hierdoor zal het benodigde onderhoudsbaggerwerk in dit stuk van de vaargeul groot blijven, ondanks dat de doorsteek relatief kort is. Bovendien verwachten we een verlenging van de doorsteek door het verder ontwijken van de Zuiderspruit en het Scheepsgat in de toekomst.

Door de grote stroomsnelheden in de bocht bij VA9 zal de geul verder uitbochten. De ebscharen die zich ten zuiden van de vaargeul ontwikkelen zouden de functie van deze geul op termijn over kunnen gaan nemen, maar onderhoudsbaggerwerk zorgt ervoor dat die natuurlijke cycliciteit wordt tegengewerkt. De natuurlijke diepte van een nieuwe ebgeul zal waarschijnlijk onvoldoende zijn ten opzichte van de huidige dimensies van de vaargeul. Ook bij het meebewegen met de natuurlijke cycliciteit zal de vaargeul dus onderhouden moeten worden, en daarnaast zullen de boeien ook vaak verlegd moeten worden.

Het uitbochten van de vaargeul op het vaargeultracé van VA6 tot Holwerd zal doorzetten. Deze trend is al zeker 50 jaar gaande en wordt mede in stand gehouden door het

onderhoudsbaggerwerk, zodat de natuurlijke cycliciteit van het ontstaan, ontwikkelen en verdwijnen van eb- en vloedscharen wordt onderdrukt.

- De bochtafsnijding, die in 2019 in de vorm van het doorsteken van een vloedgeul tussen VA23 en VA33 is uitgevoerd, is door de hoge stroomsnelheden in de geul aan het uitbochten in de richting van de originele ebgeul. Er heeft zich al een nieuwe vloedschaar gevormd, maar deze is nog heel klein.
- Bij de scherpe bocht in de vaargeul bij VA17 is inmiddels al een vloedschaar ontstaan die de uitbochtende vaargeul afsnijdt. Verwacht wordt dat deze ontwikkelingen de komende jaren voortzetten, al ligt de vaargeul bij VA17 inmiddels tegen een hoge plaat aan, zodat de snelheid van uitbochten kan afnemen. Ook de vloedschaar is al verder naar het zuidwesten gedraaid, waardoor deze een klein gedeelte van de vaargeul afsnijdt.
- Het meest zuidoostelijk gelegen gedeelte van de vaargeul (d.w.z. bij Holwerd) wordt door onderhoudsbaggerwerk op zijn plek gehouden. De geul licht ingeklemd tussen twee hoge platen en zal daardoor niet snel migreren.

Dichter bij Ameland, waar de vaargeul een ondiepte tussen het Molengat en de Zuiderspruit doorkruist, wordt verwacht dat het baggerbezwaar zal toenemen. Uit de bodemdata blijkt het terugtrekken van het Molengat en sedimentatie en uitbouw van de ondiepte. De noordwaartse migratie van de Zuiderspruit kan enige verlichting bieden in de vorm van een korter tracé door de ondiepte tussen de Zuiderspruit en het Molengat, en compenseert de sedimentatie aan de noordzijde van de ondiepte enigszins.

4.3 Variant Noord Loodrecht

Variant Noord Loodrecht lijkt veel op de ligging van de vaargeul vóór de geulverlegging in het najaar van 2022. Destijds trad relatief veel aanzanding op in de doorsteek, met name doordat de vloedstroming veel sediment in de geul afzet. Sinds de oude doorsteek niet meer wordt onderhouden is de geul naar het oosten gemigreerd. Dit is ook wat verwacht wordt voor de morfologische ontwikkeling van variant Noord Loodrecht. Door onderhoudsbaggerwerk kan de doorsteek op de originele locatie gehouden worden, maar met name vanuit het westen zal veel sediment de geul in getransporteerd worden.

De huidige vaargeul zal enigszins aanzanden wanneer die niet meer wordt onderhouden, omdat de geul nu dieper is dan zijn natuurlijke diepte. Het dynamische gebied met eb- en vloedscharen zal deels open worden gehouden doordat het in het verlengde van het Scheepsgat ligt. Verwacht wordt dat jongere scharen zich verder gaan ontwikkelen tot een nieuwe ebgeul op het moment dat de vaargeul niet langer onderhouden wordt. De doorsteek bij VA6 zal relatief snel vollopen.

4.4 Variant Noord Diagonaal

Variant Noord Diagonaal zal zich deels vergelijkbaar ontwikkelen als variant Noord Loodrecht. Aanvoer van zand vanuit het westen zal ervoor zorgen dat aanzanding in de doorsteek optreedt en dat de geul mogelijk oostwaarts gaat migreren. In vergelijking met de doorsteek Noord Loodrecht is de verwachte vloedstroming in de doorsteek Noord Diagonaal iets groter en is de stroomsnelheid bij eb kleiner. Tegelijkertijd is de lengte van de vaargeul tussen ondiepe wadplaten langer voor de doorsteek Noord Diagonaal. Het is lastig te zeggen welke van deze verschillen de doorslag zal geven voor wat betreft de ontwikkeling van het baggerbezwaar. We verwachten dat het uiteindelijke baggerbezwaar voor variant Noord Diagonaal niet veel zal verschillen van het baggerbezwaar voor variant Noord Loodrecht.

In variant Noord Diagonaal blijft de bocht bij VA9 een buitenbocht in het vaargeultracé waar hoge stroomsnelheden optreden. De uitschuring van die buitenbocht zal daardoor voortzetten, zodat de doorsteek mogelijk tegen de klok in gaat roteren.

4.5 Variant Zuid

Variant Zuid ligt na aanleg vlak langs de Piet Scheve plaat, maar zal relatief snel noordwaarts gaan migreren, net als de eb- en vloedcharen en -geulen die nu al in het drempelgebied aanwezig zijn. Het lijkt onhoudbaar om de geul door middel van onderhoudsbaggerwerk op zijn originele positie te houden, zodat meebewegen van de vaarroute met de migratie van de geul de beste optie is voor deze variant. Op termijn kan de geul dan migreren tot waar de vaargeul nu ligt.

Variant Zuid maakt nog steeds gebruik van de doorsteek bij VA6, waar na de ingreep onderhoudsbaggerwerk nodig blijft om de doorsteek op diepte te houden.

5 Afweging van varianten

In dit hoofdstuk worden de verschillende varianten voor de vaarroute vooral kwalitatief beoordeeld op basis van een aantal criteria die in Paragraaf 5.1 worden geïntroduceerd.

5.1 Criteria

De criteria die worden gebruikt bij de afweging van de verschillende varianten zijn:

Aanlegvolume	Het volume aan sediment dat moet worden verwijderd om de nieuwe route aan te leggen. Hierbij is uitgegaan van een aanlegbreedte van 50 m en een aanlegdiepte van -3,8 m NAP. In het bepalen van de volumes is geen rekening gehouden met het aanleggen van taluds langs de vaargeul.
Onderhoudsvolume	Een inschatting van de mate waarin onderhoudsbaggerwerk nodig is om de variant op diepte te houden, afhankelijk van de oriëntatie op de getijstrooming, de stroomsnelheid en de lengte van het tracé.
Vaargeullengte	De totale lengte van de vaargeul. Bij toenemende lengte neemt de vaartijd toe. Ook het baggerbezwaar kan toenemen bij een langere vaargeul, maar dat is afgedekt door het criterium <i>Onderhoudsvolume</i> .
Stabiliteit van de geuligging	Inschatting van de stabiliteit van de ligging van de geul, ofwel de snelheid waarmee de vaargeul in de betreffende variant gaat migreren.
Stroomsnelheden in de vaargeul	De stroomsnelheden in de vaargeul worden beoordeeld op twee plekken op de vaarroute, namelijk in de sterk migrerende bocht bij VA9 en in de nieuwe vaarroute. De stroomsnelheden zijn belangrijk voor de bevaarbaarheid van de geul. Daarnaast zijn de stroomsnelheden in de geul bepalend voor het <i>Onderhoudsvolume</i> en de <i>Migratiesnelheid</i> .
Breedte van het vaargeultracé	Naast de minimale breedte van het vaargeultracé is de extra beschikbare breedte in de vaargeul van belang, onder andere voor veerboten om elkaar te passeren. In de smalle vaargeul is daar weinig ruimte voor. De Zuiderspruit is breder en biedt voldoende ruimte om te passeren. Daarnaast hebben de kapiteins van de veerboot in afstemming met Rijkswaterstaat aangegeven voorkeur te hebben voor een kort vaargeultracé tussen ondiepe banken.
Risico dwarsstroming	De oriëntatie van de vaargeul ten opzichte van de eb- en vloedstroming kan zorgen voor een dwarsstroming in de vaargeul die hinderlijk is voor de scheepsvaart. De modelberekeningen geven goed inzicht in de mate waarin een dwarsstroming optreedt. Varianten scoren negatief als er een sterke dwarsstroming optreedt in de vaargeul.

5.2 Beoordeling van de varianten

De beoordeling van de varianten op eerder genoemde criteria is opgenomen in Tabel 5.1. Hierbij is eerst de referentie beoordeeld. De referentie scoort slecht (--) op de meeste criteria, behalve op het aanlegvolume (de geul is er immers al, dus het aanlegvolume is hier niet relevant). Alleen als een variant nog slechter scoorde dan de referentie, is de beoordeling

van de referentie naar boven bijgesteld. Dat is het geval voor het onderhoudsvolume. Onder de tabel staat per criterium een korte toelichting op de score.

Uit Tabel 5.1 wordt duidelijk dat de varianten Noord Loodrecht en Noord Diagonaal op veel criteria beter scoren dan de referentie. Variant Zuid wordt op de meeste criteria slechter beoordeeld dan de noordelijke doorsteken. Bij variant Noord Loodrecht is het aanlegvolume kleiner, de stabiliteit van de geul naar verwachting groter en de breedte van het tracé ook over een groter gedeelte breder dan bij Noord Diagonaal. Echter, de vaargeul is langer en het risico op dwarsstroming is groter in variant Noord Loodrecht dan bij Noord Diagonaal. De afzonderlijke criteria kunnen door de beheerder verschillend worden gewogen, en dat bepaald welke variant de beste keuze is.

Tabel 5.1 Beoordeling van de varianten in de vaarroute op de criteria die zijn geïntroduceerd in Paragraaf 5.1.

Criterion	Referentie	Noord Loodrecht	Noord Diagonaal	Zuid
Aanlegvolume	++ 0 m ³	+ 29.000 m ³	0 42.000 m ³	- 91.000 m ³
Onderhoudsvolume	-	-	-	--
Vaargeullengte	--	0 (-100 m)	+ (-250 m)	+ (-450 m)
Stabiliteit van de geuligging	--	++	+	--
Stroomsnelheden in de vaargeul - bij VA9 - in de doorsteek	- ~ 1,5 m/s n.v.t.	- ~ 1,5 m/s < 1,5 m/s	- ~ 1,5 m/s < 1,1 m/s	- ~ 1,3 m/s < 1,5 m/s
Breedte van het vaargeultracé	--	++	+	--
Risico dwarsstroming	--	--	0	--

Aanlegvolume

Het aanlegvolume is berekend voor de verschillende varianten op basis van de beheerlodgingen van april 2023. Voor het onderhouden van de huidige vaargeul (referentie) is er geen aanlegvolume. De zuidelijke doorsteek in variant Zuid is duidelijk het langst en heeft daarmee het grootste aanlegvolume. Het aanlegvolume in variant Noord Diagonaal is ongeveer 1,5 keer zo groot als het aanlegvolume in variant Noord Loodrecht.

Onderhoudsvolume

Voor de huidige situatie en variant Noord Loodrecht zijn de verwachte onderhoudsbaggervolumes vergelijkbaar. De variant Noord Loodrecht lijkt namelijk op de ligging van de vaargeul vóór het najaar van 2022, en sindsdien zijn de baggervolumes niet significant veranderd. De variant Noord Diagonaal bestaat uit een langere doorsteek, maar

heeft naar verwachting een onderhoudsvolume van dezelfde orde grootte. De zuidelijke doorsteek in Variant Zuid zal sterk gaan migreren doordat het in het dynamische gebied met eb- en vloed scharen ligt. Deze dynamiek zal zorgen voor een noordwaarts migrerende geul en een toename van het onderhoudsbaggerwerk om de vaargeul op diepte te houden.

Vaargeullengte

De huidige vaarroute is langer dan de vaarroute in de drie varianten. Variant Noord Diagonaal snijdt een hoek af ten opzichte van variant Noord Loodrecht en is ongeveer even lang als de vaarroute in variant Zuid.

Stabiliteit van de geuligging

Door hoge stroomsnelheden in een bochtige vaargeul is de migratiesnelheid van de geul groot. De stroomsnelheden in de vaargeul zijn hoog voor alle varianten. De verwachte migratie is het grootst voor de meest bochtige varianten, namelijk voor de huidige vaarroute en variant Zuid. In variant Noord Diagonaal kan de bocht bij VA9 nog steeds verder uitbochten. In variant Noord Loodrecht zijn geen scherpe bochten meer in dit deel van de vaargeul aanwezig.

Stroomsnelheden in de vaargeul

Stroomsnelheden in de vaargeul bij VA9 blijven hoog in alle varianten. Alleen in variant Zuid nemen de stroomsnelheden bij VA9 iets af. In zowel de noordelijke doorsteeken als de zuidelijke doorsteek zijn de stroomsnelheden bij maximale ebstroming ook erg hoog.

Breedte van het vaargeultracé

In variant Noord Loodrecht is de afstand van het vaargeultracé tussen ondiepe banken minimaal. Daarnaast loopt de vaarroute in deze variant voor een relatief grote afstand door de Zuiderspruit, waar voldoende passeermogelijkheden zijn. In variant Noord Diagonaal is de afstand tussen de ondiepe banken groter en de afstand door de Zuiderspruit kleiner. In de huidige vaarroute en in variant Zuid is de vaarroute relatief smal over een grote afstand en zijn de passeermogelijkheden niet toereikend.

Risico dwarsstroming

De huidige vaarrouten en de varianten Noord Loodrecht en Zuid hebben alle drie een bijna loodrechte aansluiting op de Zuiderspruit. Hierdoor ontstaat bij eb en bij vloed een sterke dwarsstroming bij het in/uitvaren van de vaargeul. Bij variant Noord Diagonaal staat de aansluiting met de Zuiderspruit onder een hoek, zodat de dwarsstroming waarschijnlijk minder sterk is.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De huidige vaarroute tussen Holwerd en Ameland passeert een knelpunt waar een hinderlijke situatie voor de scheepvaart is ontstaan, met snelle geulmigratie en hoge stroomsnelheden. In deze studie is op basis van een morfologische analyse en hydrodynamische modelberekeningen een inschatting gemaakt van het baggerbezwaar en de stroomsnelheden voor verschillende varianten voor de ligging van de vaargeul.

Het bekken van Ameland wordt, net als andere bekkens in de Waddenzee, gekarakteriseerd door sedimentatie aan de landwaartse zijde van het bekken. Deze sedimentatie leidt tot een verkleining van het kombergingsvolume en de daarmee samenhangende evenwichtsdoorsnede van geulen. Tegelijkertijd treedt direct ten zuiden van Ameland erosie op. Dit gaat gepaard met een toename van het kombergingsvolume. Daarnaast neemt ook het subgetijdengebied (waaronder de geulen) in volume af. De toename van het kombergingsvolume in het noorden van het bekken en de afname van het kombergingsvolume in het zuiden van het bekken hebben er mogelijk toe geleid dat de Zuiderspruit nu meer west-oost georiënteerd is dan een aantal decennia geleden, toen de Zuiderspruit meer noordwest-zuidoost georiënteerd was. Omdat de Zuiderspruit ook noordwaarts migreert en smaller wordt, is er aan de zuidzijde van de geul ruimte ontstaan voor een drempelgebied. Dit gebied met morfologisch zeer actieve eb- en vloedscharen vormt het huidige knelpunt in de vaarroute tussen Holwerd en Ameland.

Het ondiepe drempelgebied zal een uitdaging blijven voor de bevaarbaarheid van de route tussen Holwerd en Ameland. Zelfs als er een morfologisch stabiel tracé kan worden gevonden zal onderhoudsbaggerwerk nodig zijn, vooral op plaatsen waar de getijstrooming dwars op de vaargeul staat. Sediment wordt daar namelijk vanaf de ondiepere plaatgebieden naar de geul getransporteerd.

Het vaargeultracé zoals dat in het najaar van 2022 is aangelegd is effectief georiënteerd op het Scheepsgat, waardoor de vaargeul aantakt op de vloedstroom. Desalniettemin vormen de lastige bevaarbaarheid en de snelle migratie van de geul de noodzaak om op korte termijn een nieuw tracé te realiseren. Een belangrijke les voor toekomstige ingrepen in de vaargeul is dat niet alleen moet worden gekeken hoe een geul veel stroom kan trekken, maar ook of deze morfologisch stabiel is en hoe deze georiënteerd is op de stroming (vanwege sedimentatie én bevaarbaarheid).

Als varianten op het huidige vaargeultracé door het knelpunt zijn twee noordelijke doorsteken en een zuidelijke doorsteek bekeken. In elk van de varianten blijven de stroomsnelheden in de vaargeul relatief hoog. Verwacht wordt echter dat de ligging van de vaargeul stabielere is als het aantal (scherpe) bochten in de vaargeul beperkt wordt. Daardoor hebben de noordelijke doorsteken de voorkeur boven de zuidelijke doorsteek. Een doorsteek die loodrecht op de Zuiderspruit aansluit heeft de voorkeur voor wat betreft het aanlegvolume en de stabiliteit van de geuligging. Een doorsteek die schuin op de Zuiderspruit aansluit heeft de voorkeur voor wat betreft de totale lengte van de vaargeul en het risico op een hinderlijke dwarsstroming bij de aansluiting op de Zuiderspruit. De uiteindelijke keuze voor één van de varianten is daarmee een afweging tussen verschillende belangen door de beheerder.

6.2 Aanbevelingen

Uitvoering en monitoring van een ingreep in het vaargeultracé

Het huidige knelpunt in het vaargeultracé is dusdanig dynamisch dat geulen en eb- en vloedscharen binnen enkele maanden significant verschuiven. Aan het begin van deze studie zijn de varianten bepaald op basis van de meest recente loding die toen beschikbaar was. Echter, tijdens deze studie kwam een nieuwe loding beschikbaar op basis waarvan de ligging van de varianten al geoptimaliseerd kan worden. Daarom wordt aanbevolen om kort voor de uitvoering van een ingreep in het vaargeultracé een loding uit te voeren en op basis daarvan het definitieve ontwerp van de ingreep vast te stellen.

De regelmatige beheerlodingen in en rond de vaargeul zijn ontzettend waardevol gebleken als aanvulling op de minder frequente Vaklodingen van het hele kombergingsgebied. Om het morfologische gedrag van het drempelgebied beter te gaan begrijpen wordt aanbevolen om zowel de oude als een eventuele nieuwe geul te blijven volgen met de uitvoering van frequente beheerlodingen. De ontwikkeling van de oude geul is namelijk erg belangrijk voor de stromingscondities in een nieuwe vaargeul (zie Paragraaf 3.9). In de modelberekeningen die nu zijn uitgevoerd voor de verschillende varianten is de huidige vaarroute open gebleven.

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek, monitoring en modelontwikkeling

De ontwikkeling van de GHW en GLW niveaus bij Holwerd wijkt af van de ontwikkeling op andere meetstations in de Waddenzee. Het is niet duidelijk wat daar de oorzaak van is; dit dient verder onderzocht te worden. De afwijkende trend kan samenhangen met de morfologische ontwikkelingen in dit gebied, en daarom is het voor de toekomstige morfologische ontwikkelingen belangrijk om deze trend te begrijpen.

Ondanks veel vertrouwen in het huidige modelinstrumentarium voor de waterbeweging in de Waddenzee zou het goed zijn om de resultaten te kunnen toetsen aan veldgegevens. Doordat de vaargeul zo smal en dynamisch is wordt het lastig om voor langere periodes frames uit te zetten of om met meetschepen 13-uurs metingen van debieten door de vaargeul uit te voeren. Bekijk welke mogelijkheden hiervoor zijn.

De baggervolumes dienen in meer detail gerapporteerd te worden om bij te dragen aan het begrijpen van de morfologische ontwikkeling van de vaargeul. Vooral de exacte locatie waar onderhoud wordt uitgevoerd is belangrijk. Ook aanvullende informatie zoals het ingaan van een nieuwe contractperiode, het type materieel dat wordt ingezet en de sedimentsamenstelling van de baggerspecie zijn relevant. Anekdotische informatie van schippers en baggeraars is zeer waardevol om het morfologisch gedrag op korte tijdschalen te kunnen begrijpen, zeker wanneer weinig meetgegevens voor handen zijn. Overweeg deze informatie op een structurele manier te verzamelen en vast te leggen.

De bepaling van de watervolumes in de verschillende deelgebieden, in combinatie met de variërende GHW en GLW niveaus zijn erg inzichtelijk om de grootschalige ontwikkelingen verder te duiden. Naast sedimentatie-erosiekaarten zijn door de tijd verschuivende dieptecontouren en dwarsdoorsnedes inzichtelijk om de morfologische ontwikkelingen in beeld te brengen. Deze visualisatietechnieken kunnen ook gebruikt worden in andere studies en in de kombergingsrapporten en/of Digitale Systeemrapportage.

Op de langere termijn zou de ontwikkeling van een morfologisch model van de Waddenzee uitkomst kunnen bieden om het baggerbezwaar van de vaargeul en het morfologische gedrag van ingrepen voor verschillende varianten beter te kunnen onderzoeken. Een dergelijk model is nu nog niet voorhanden, en vraagt een investering in verdere software- en modelontwikkeling. Bij deze ontwikkeling is het onder andere van belang goed inzicht te

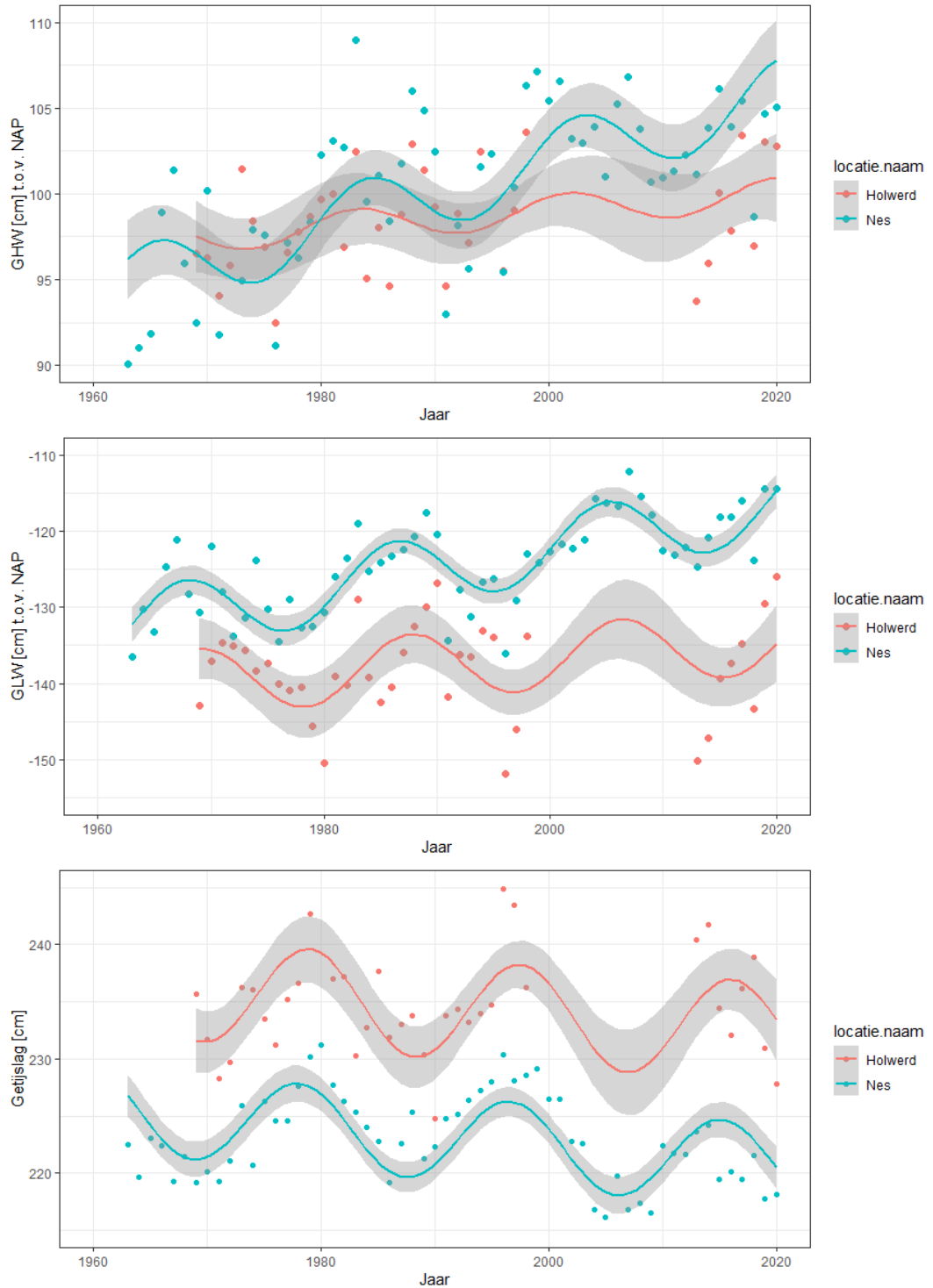
hebben in plaat-geulinteractie, de bijdragen van golven en stroming aan de bodemschuifspanningen en daarmee sedimenttransporten en de interactie van zand en slib.

7 Referenties

- Grasmeijer, B. & Van Weerdenburg, R. (2020). *Evaluatie Bochtafsnijding Vaarweg Ameland*. Deltares rapport 11205229-006-ZKS-0002.
- Herman, P.M.J., Villars, N., Winterwerp, H., Van Kessel, T., Wang, Z., Briere, C., Van Rijn, L. & Cleveringa, J. (2016). *Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland*. Deltares rapport 1130378-005-ZKS-0001.
- Oost, A. & Cleveringa, J. (2017). *Morfologie Kombergingsgebied Borndiep. KPP 2017 BO03 Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden*. Deltares rapport 11200521-000-ZKS-0004.
- Van Til, S. (2017). *Tidal meanders in the Ameland Basin – A study to the underlying processes in the evolution of tidal meanders*. MSc. Thesis Delft University of Technology.
- Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Smits, B. & Herman, P. (2020). *Modellering slibdynamiek voor de Waddenzee: Kalibratie voor KRW Slib*. Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0001.
- Zijl, F., Veenstra, J. & Groenenboom, J. (2018). *The 3D Dutch Continental Shelf Model – Flexible Mesh (3D DCSM-FM): Setup and validation*. Deltares rapport 1220339-000-ZKS-0042.

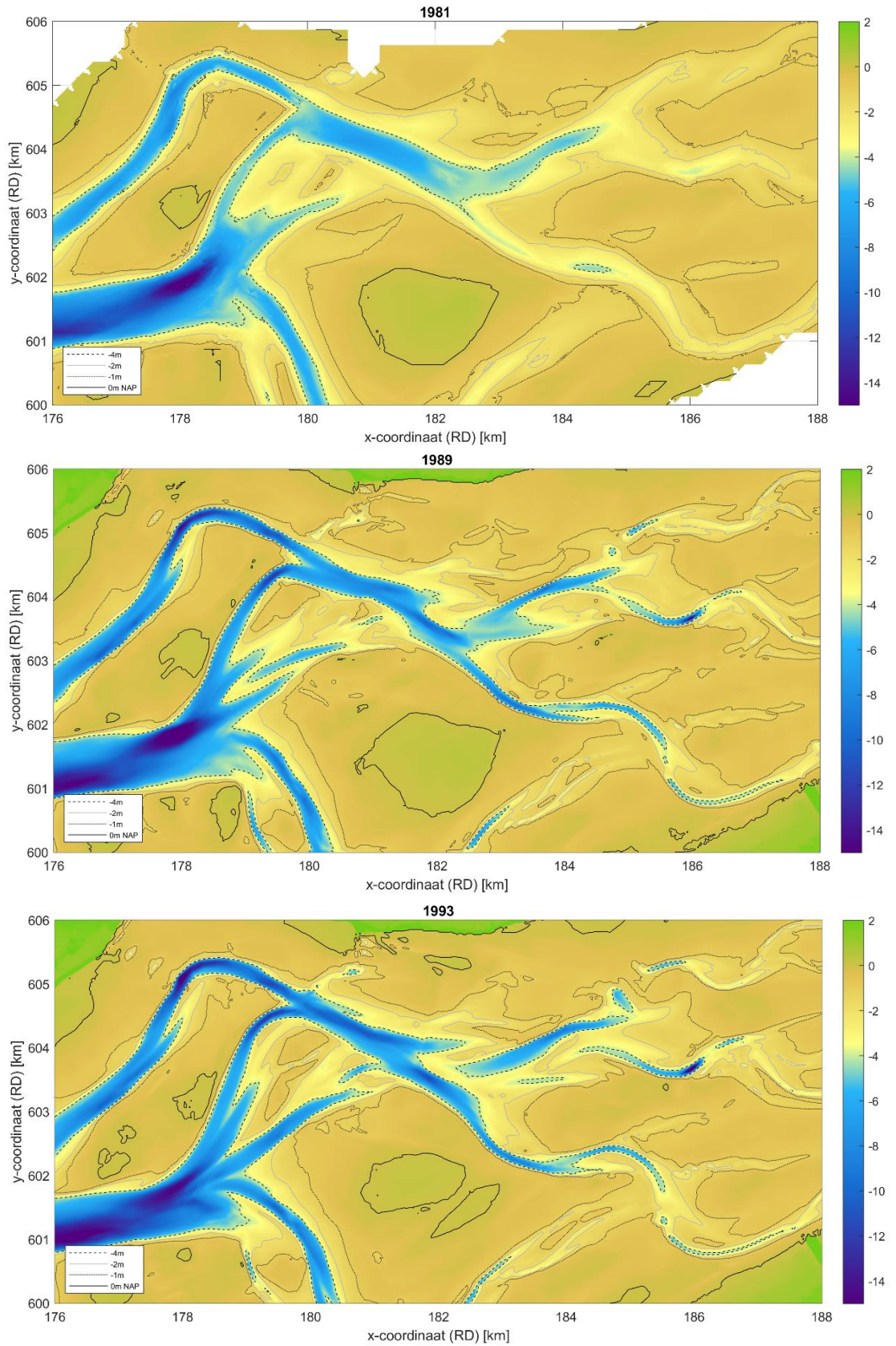
A Aanvullende figuren

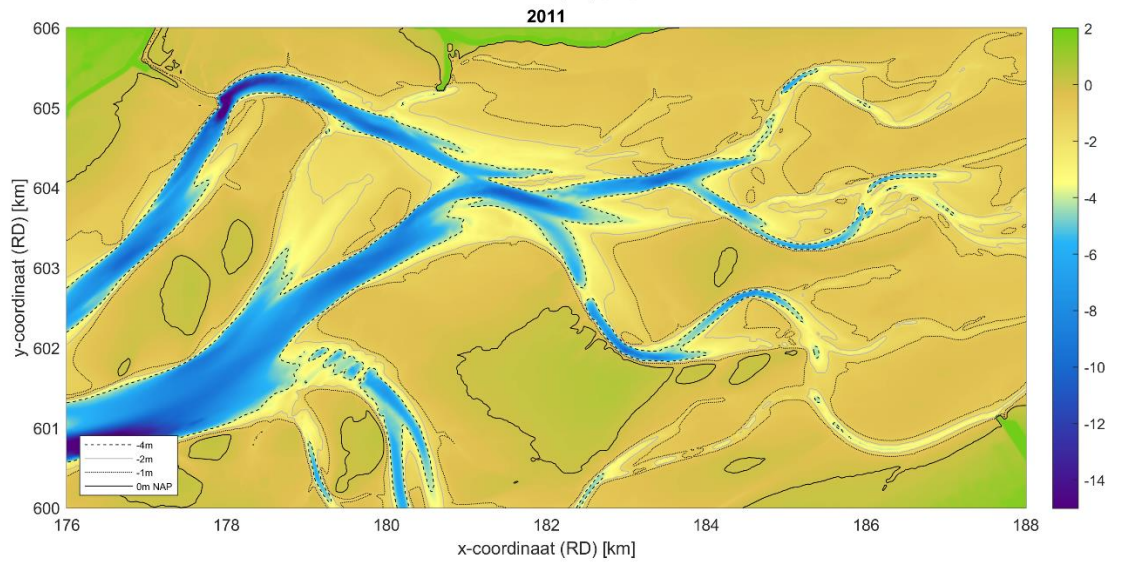
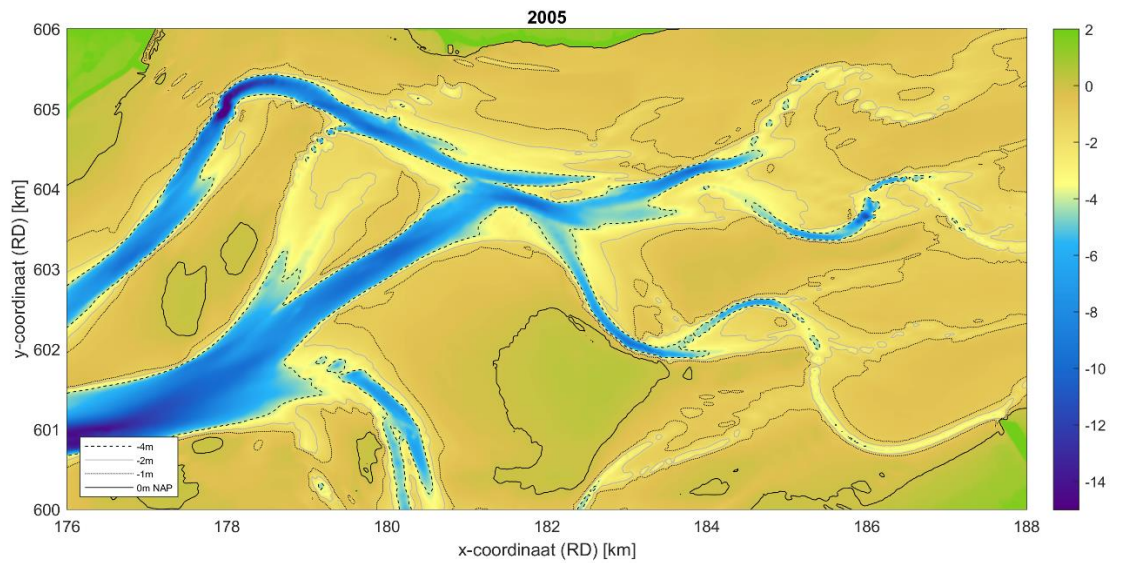
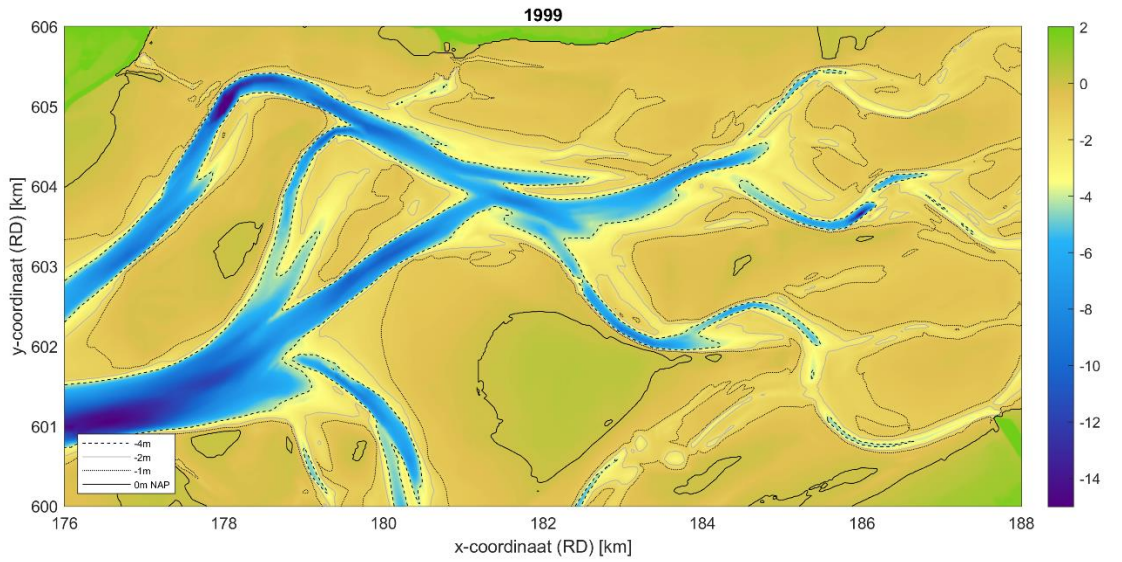
A.1 Ontwikkeling van waterstanden (GHW, GLW en Getijslag)

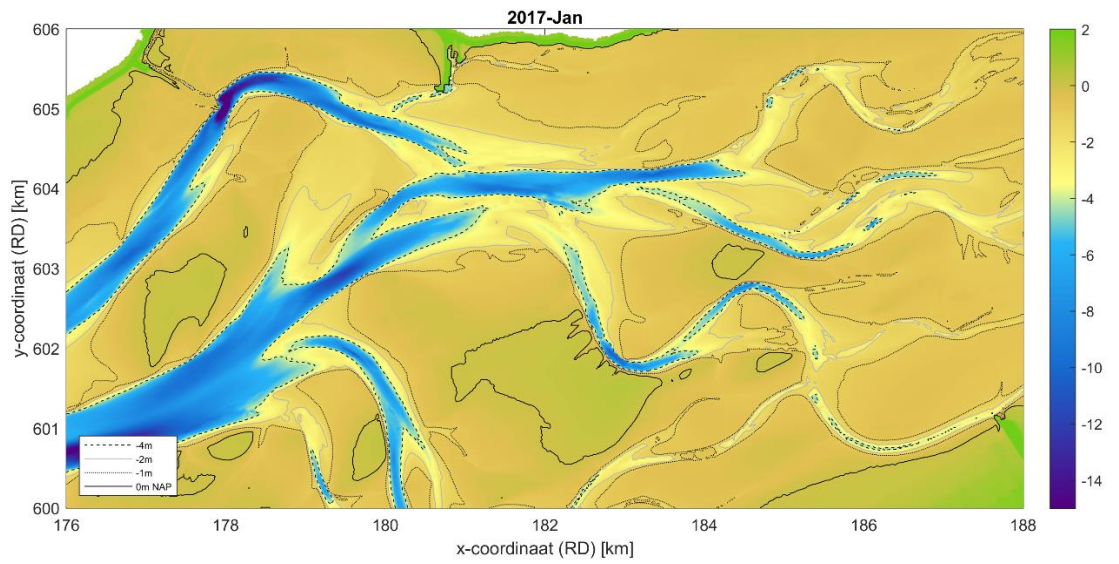


Figuur A.1 Ontwikkeling van GHW, GLW en getijslag voor de stations Holwerd en Nes over de afgelopen decennia. De puntjes geven de jaargemiddelde waarden, de doorgetrokken lijn geeft de trend weer, waarbij de 18,6-jarige cyclus wordt meegenomen. Figuren op basis van de Digitale Systeemrapportage (www.systeemrapportage.nl/wadden).

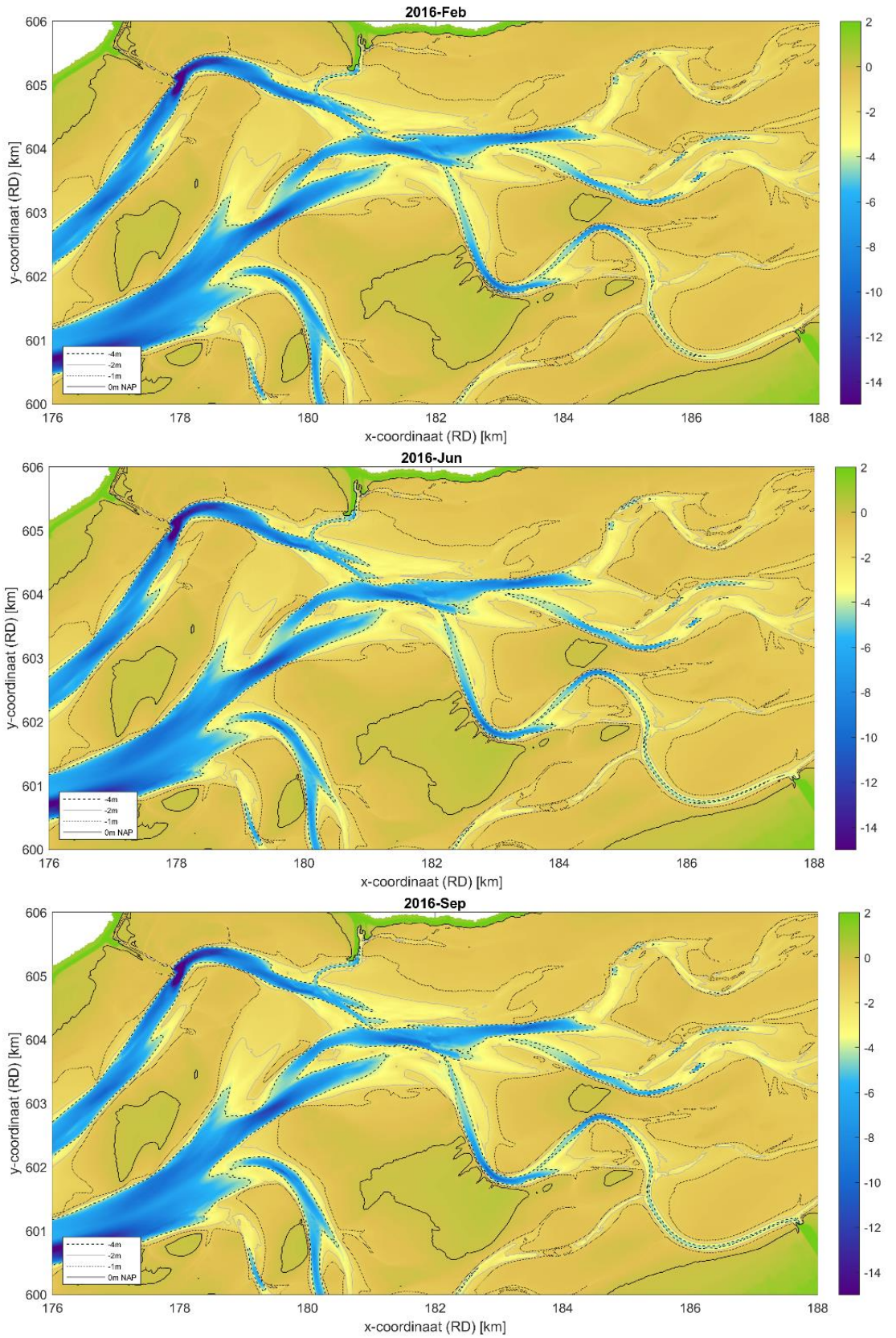
A.2 Vaklodingen

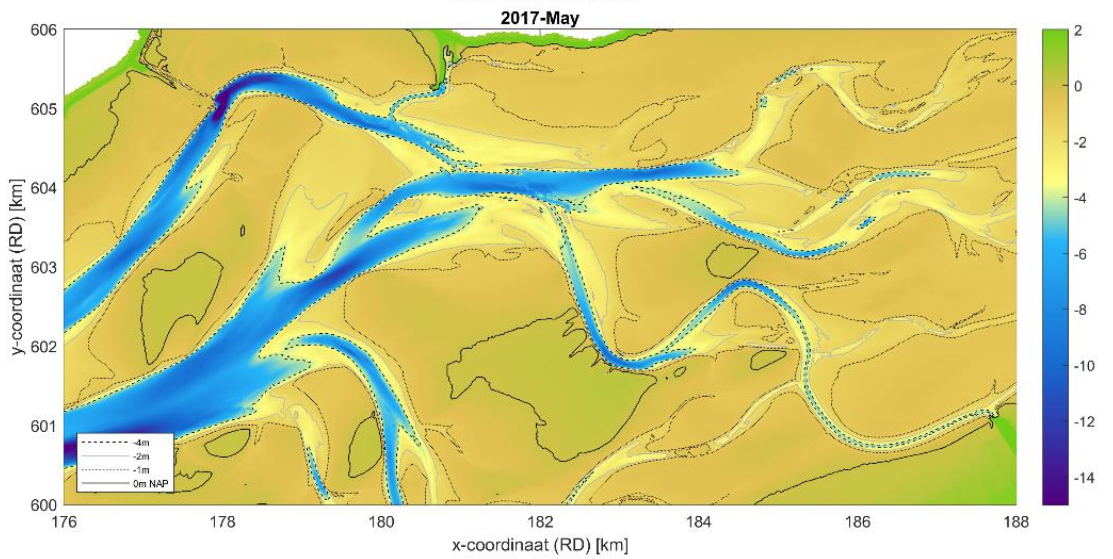
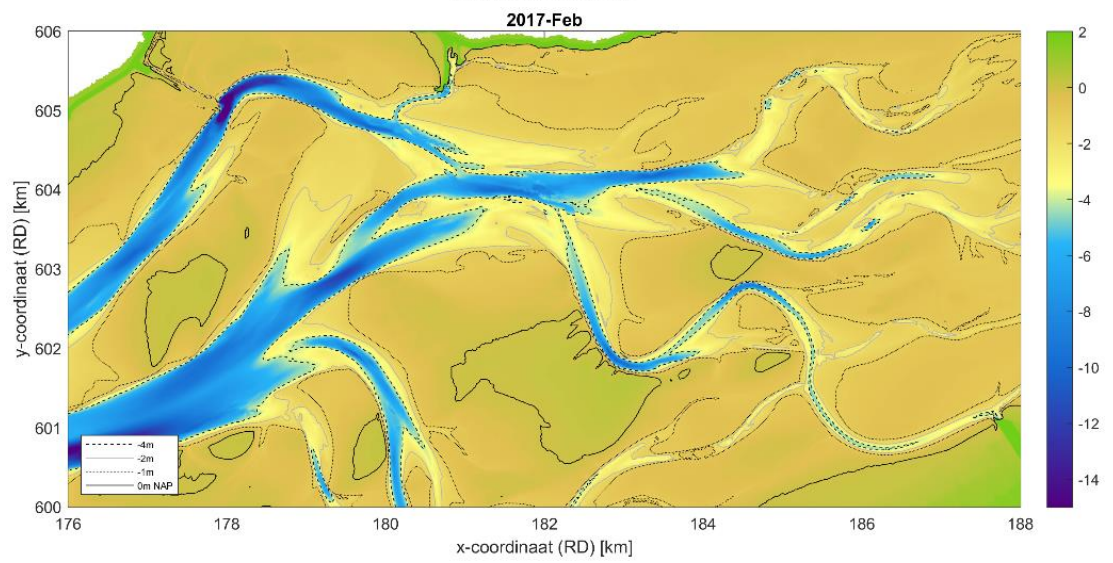
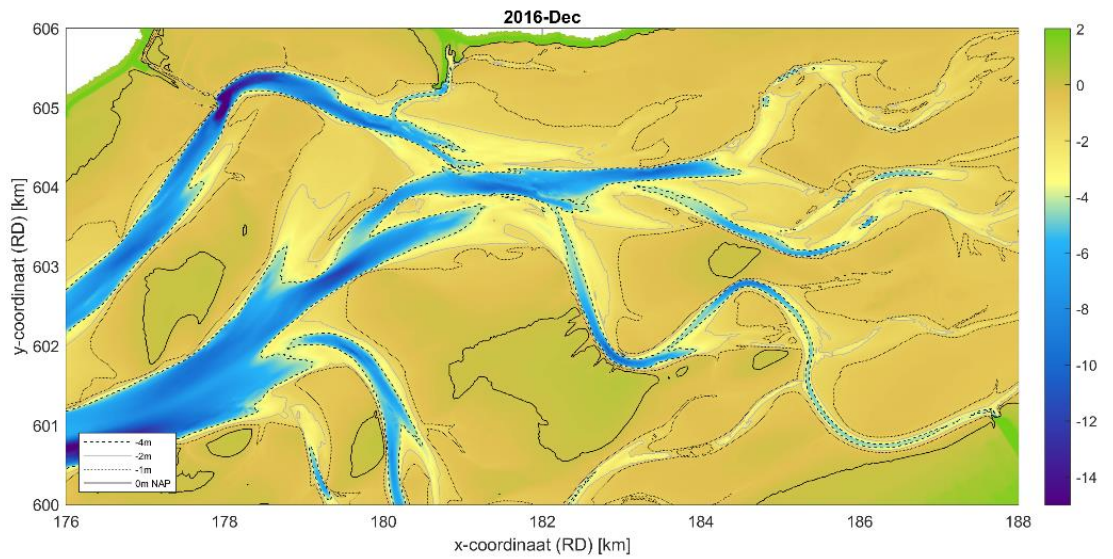


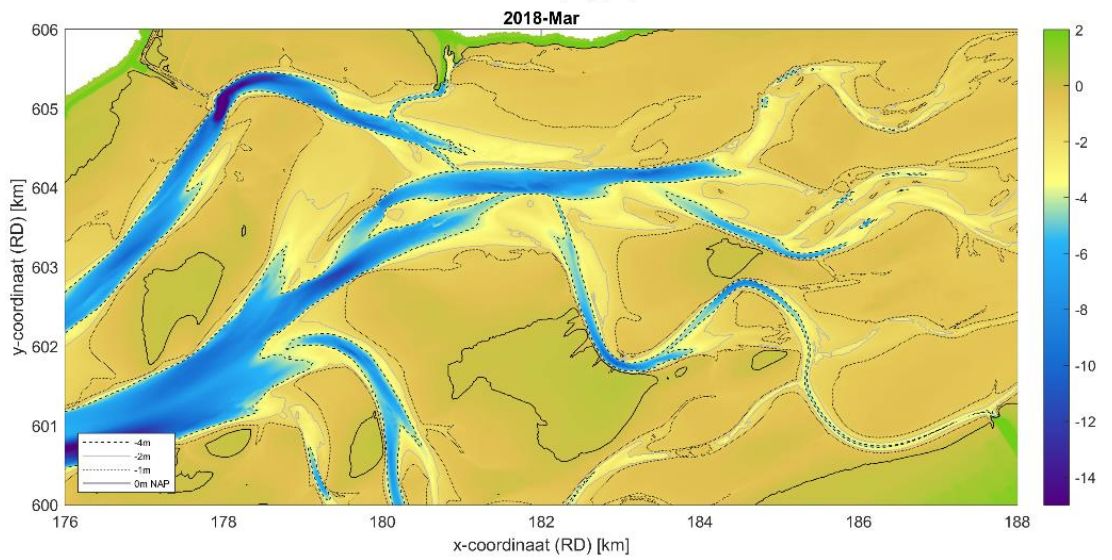
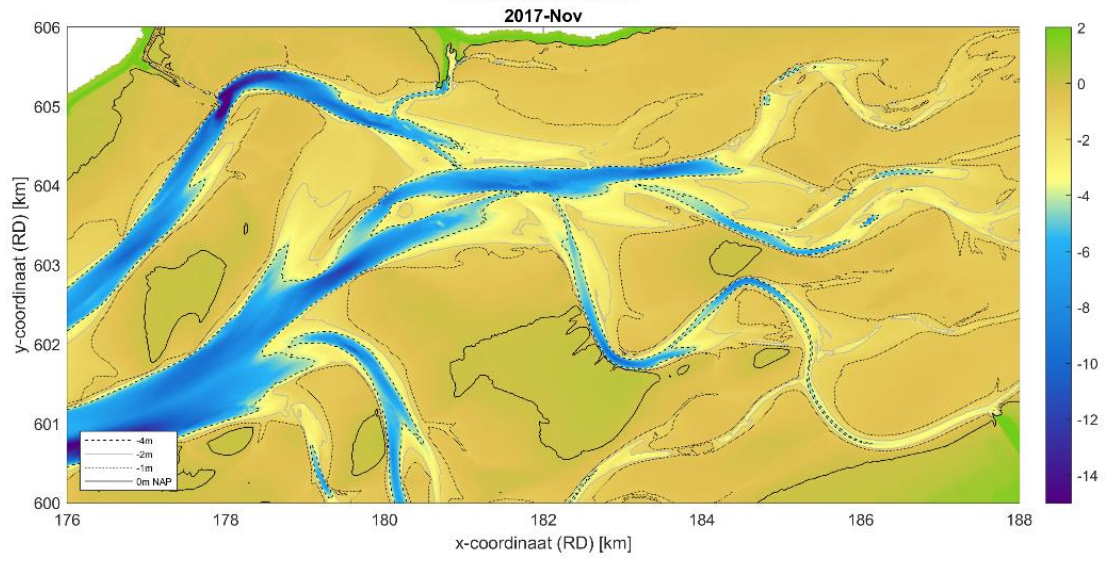
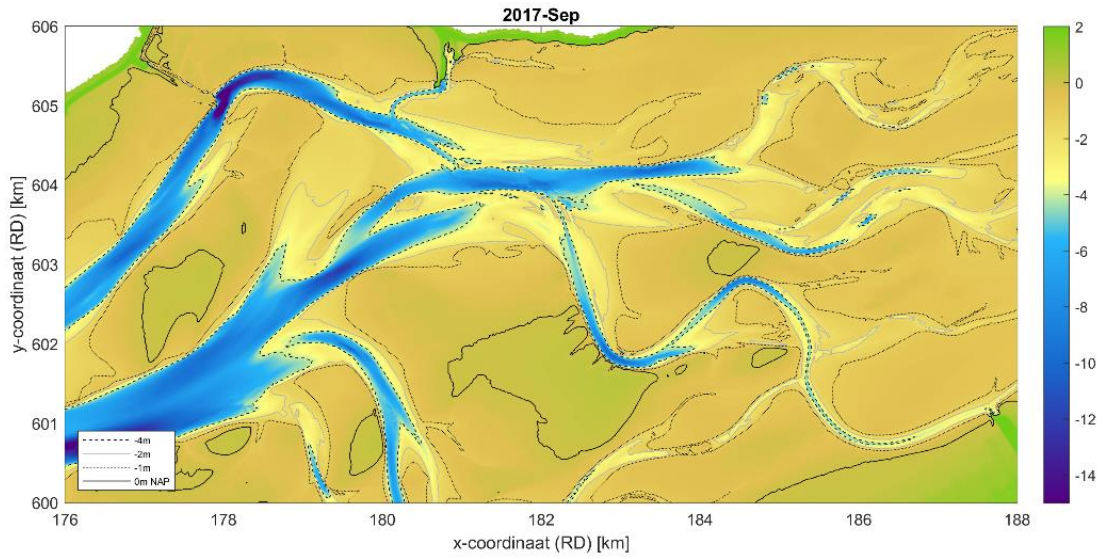


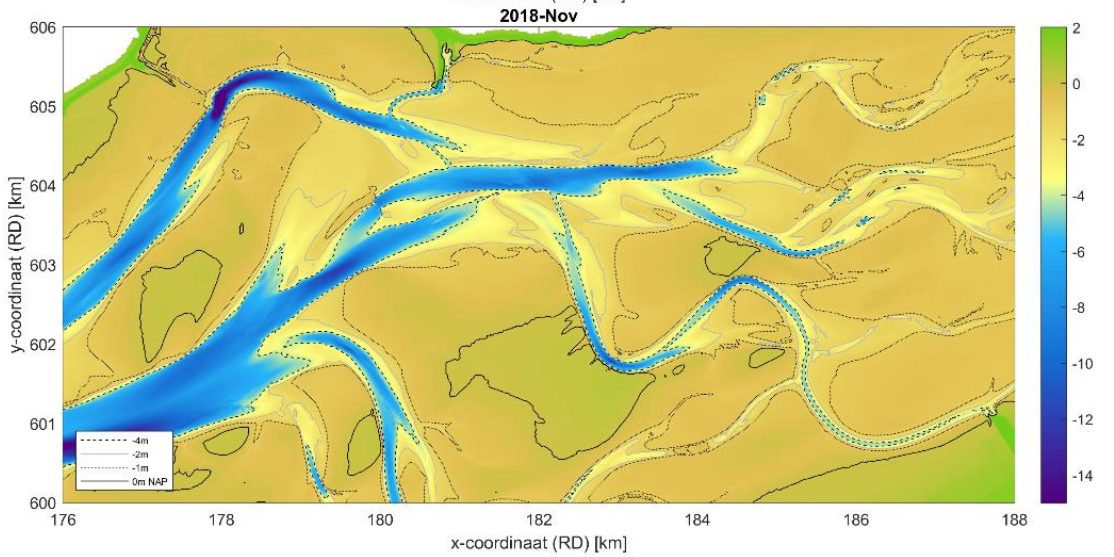
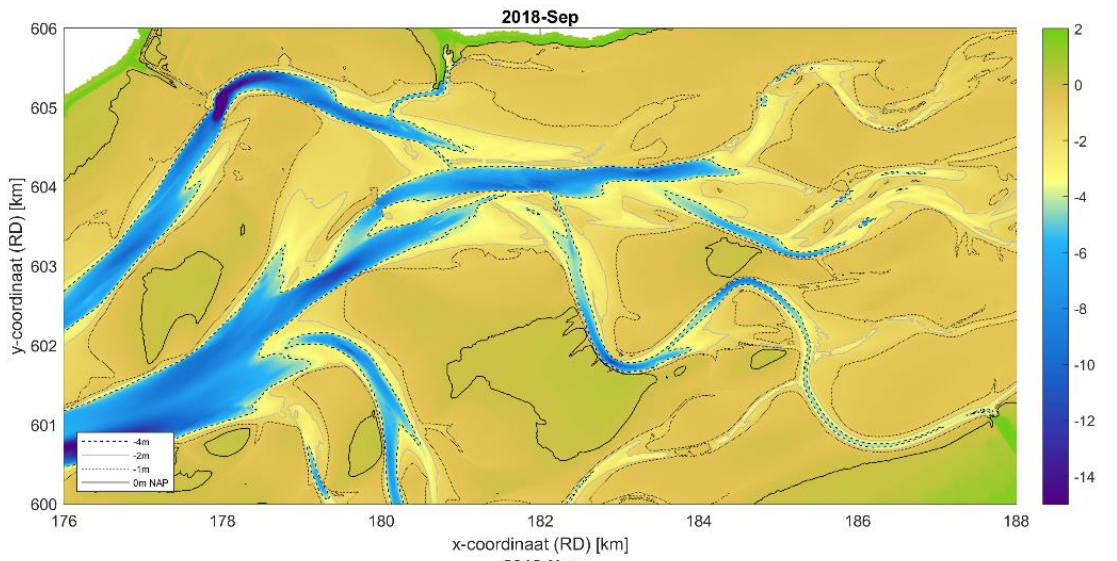
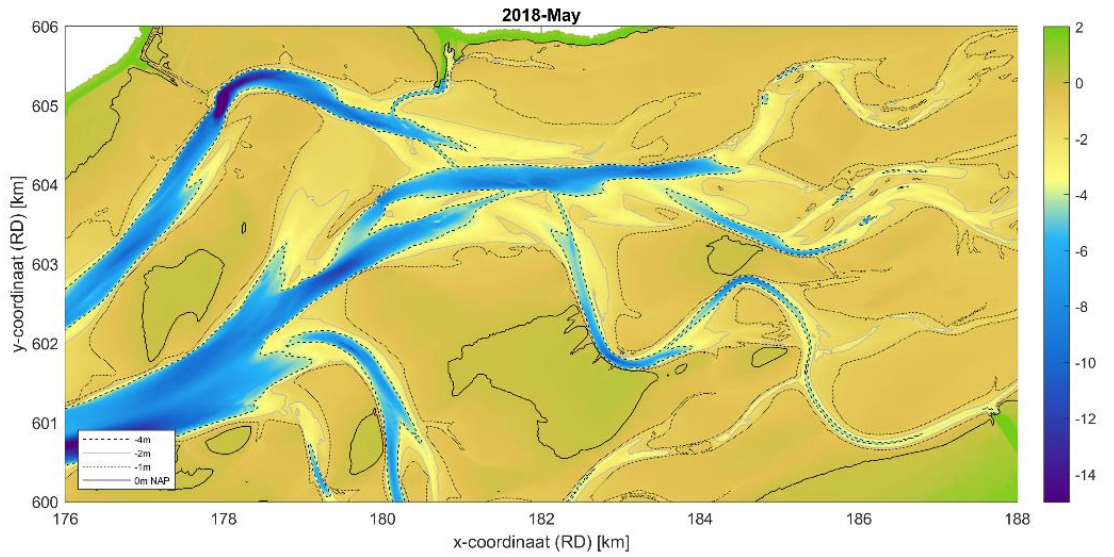


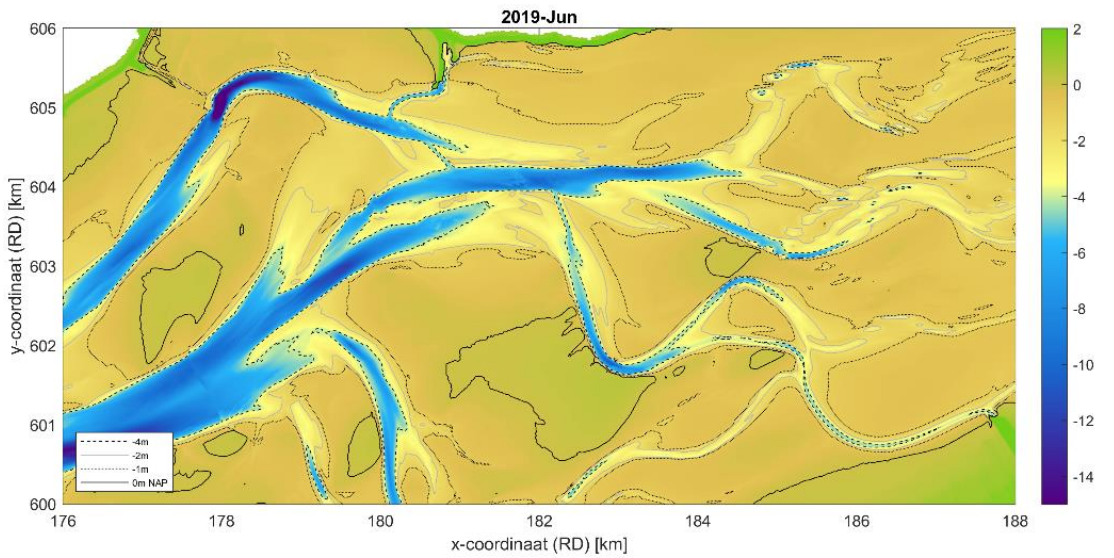
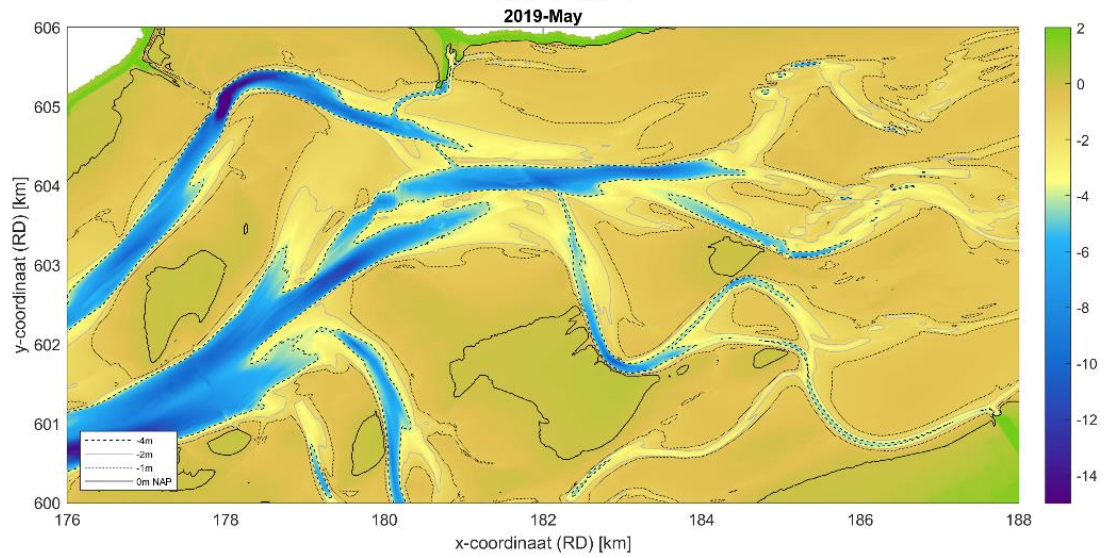
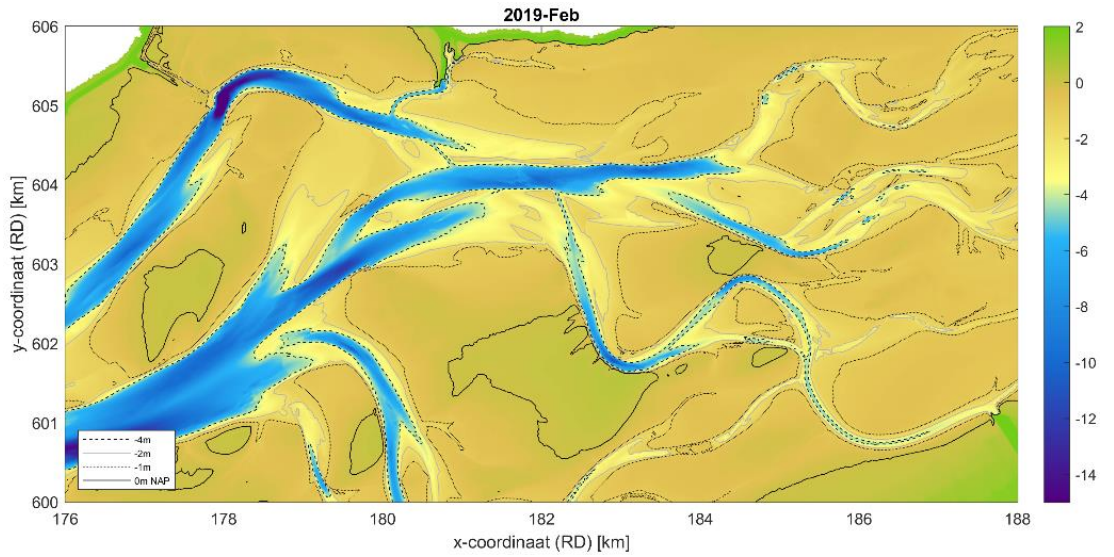
A.3 Beheerlodingen

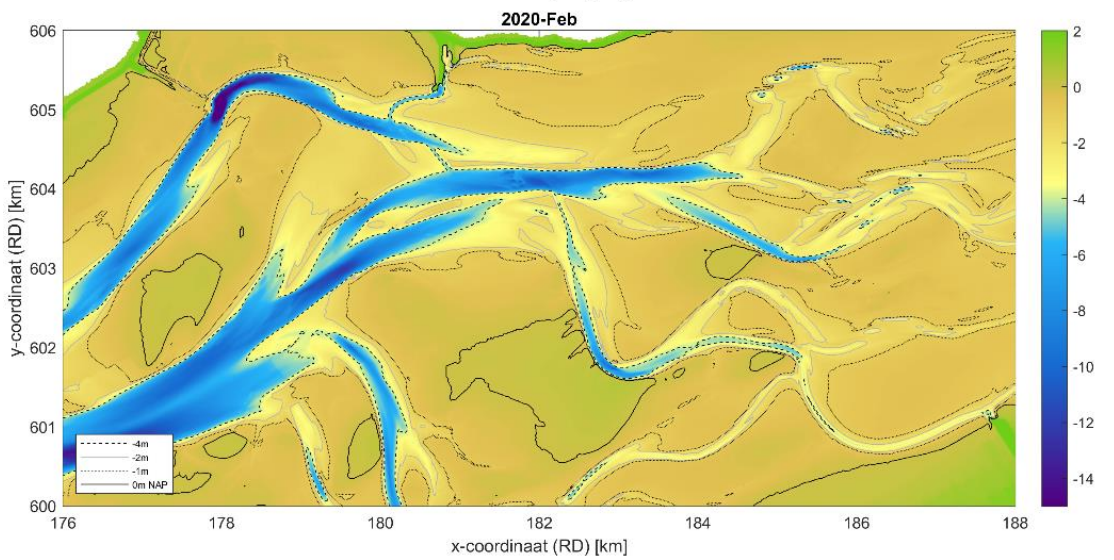
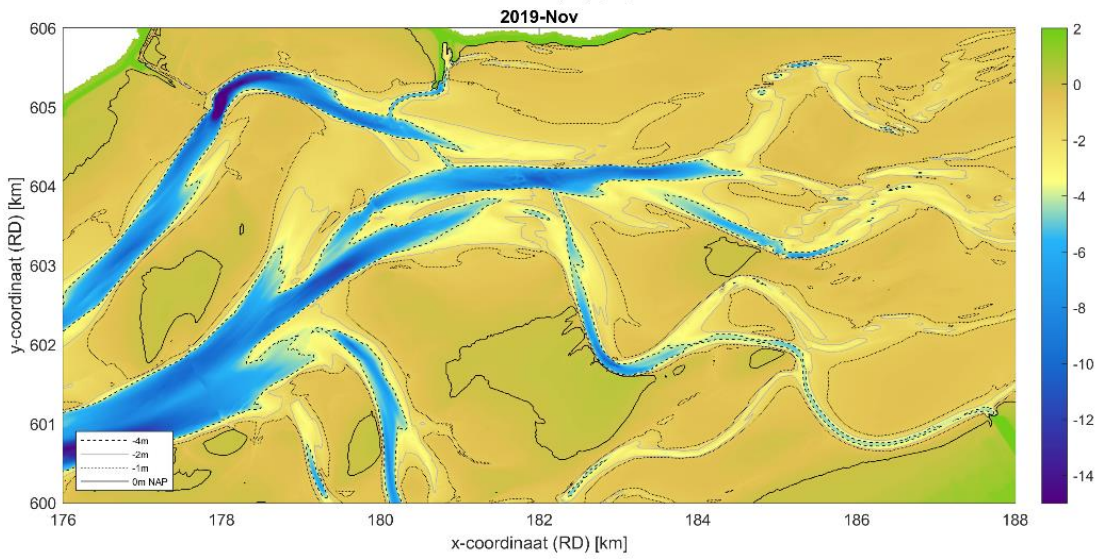
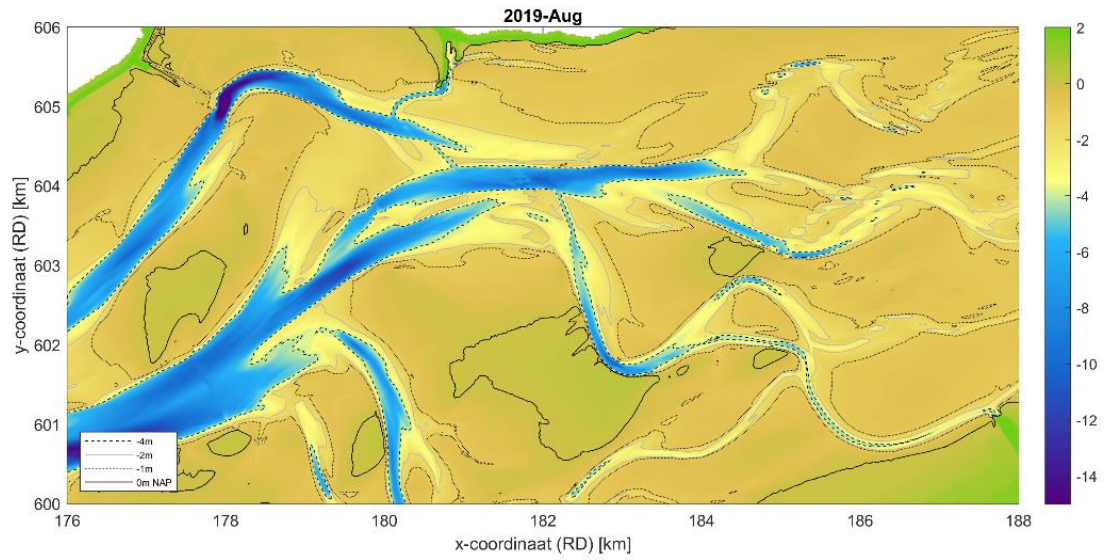


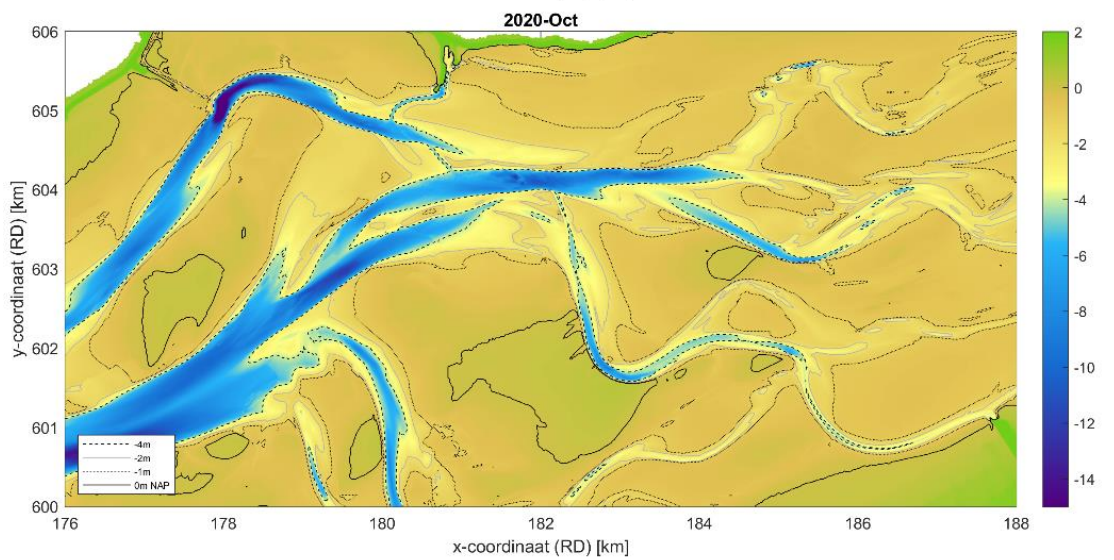
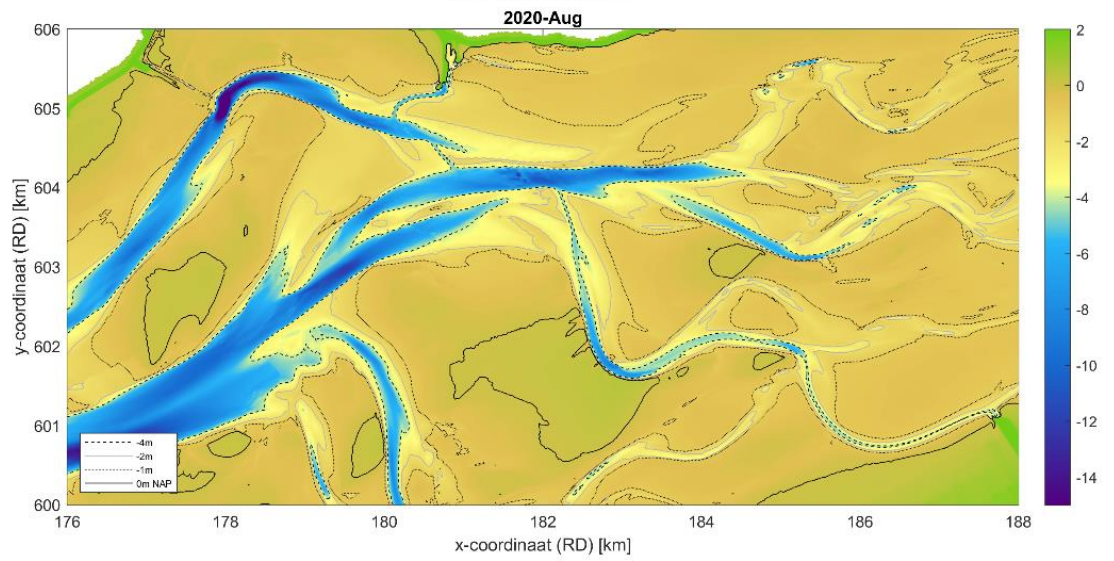
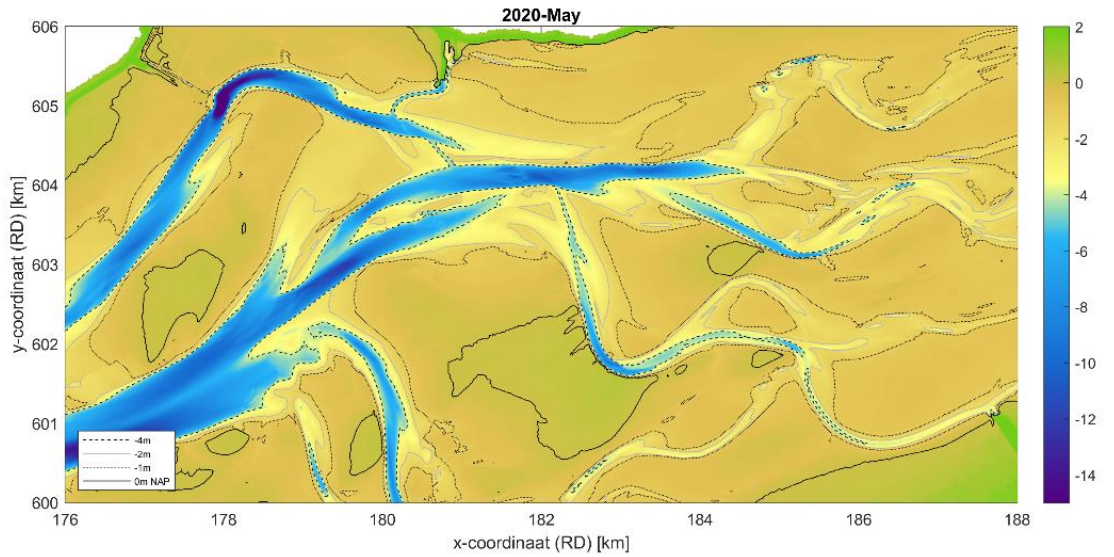


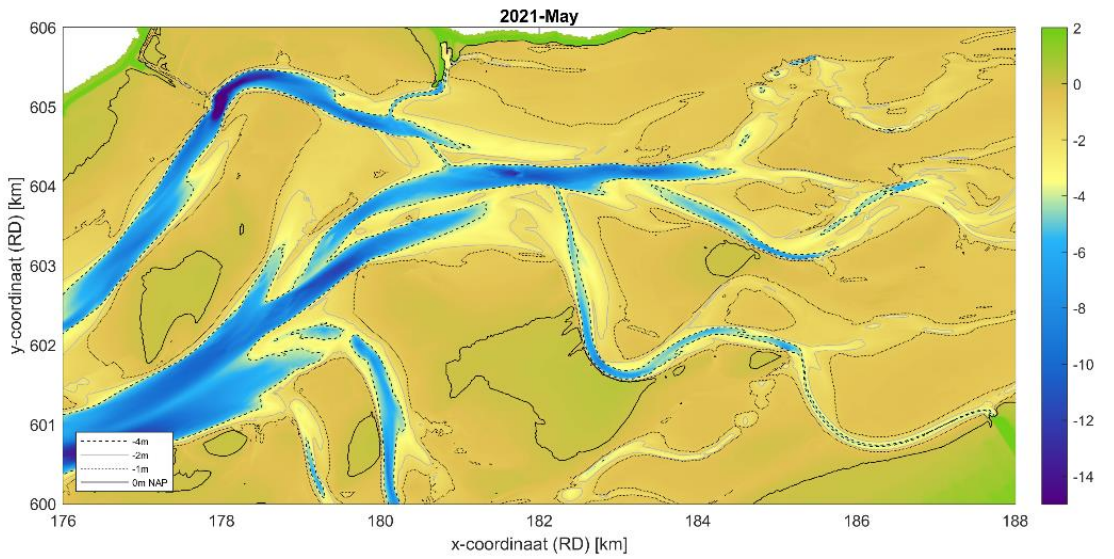
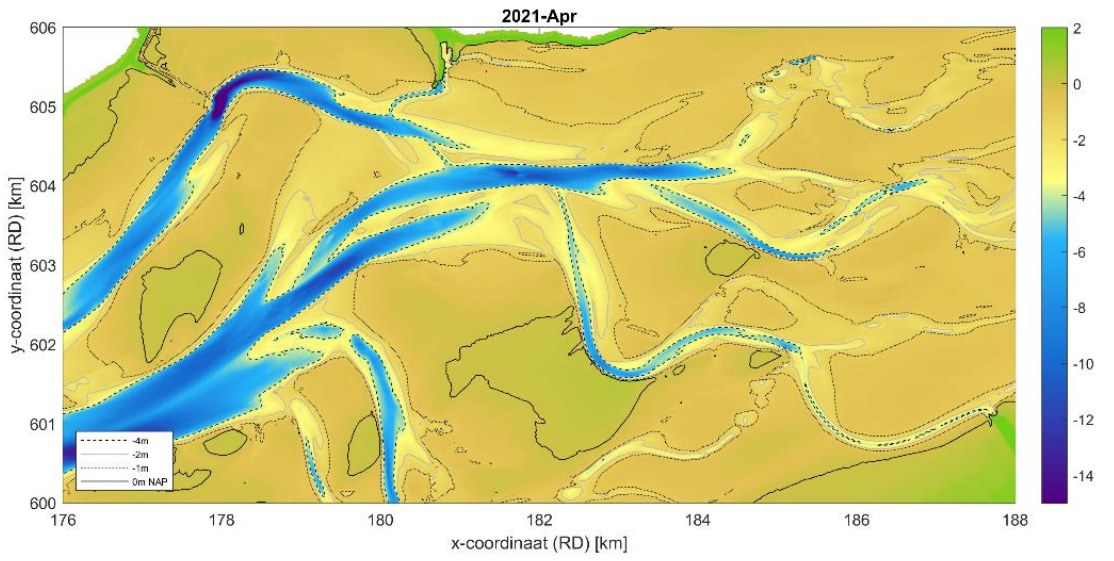
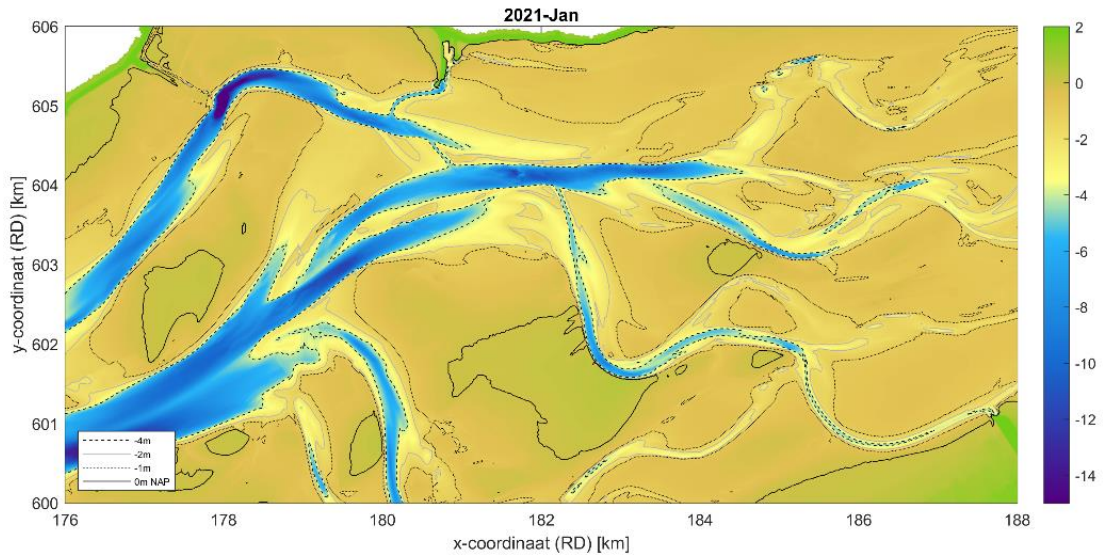


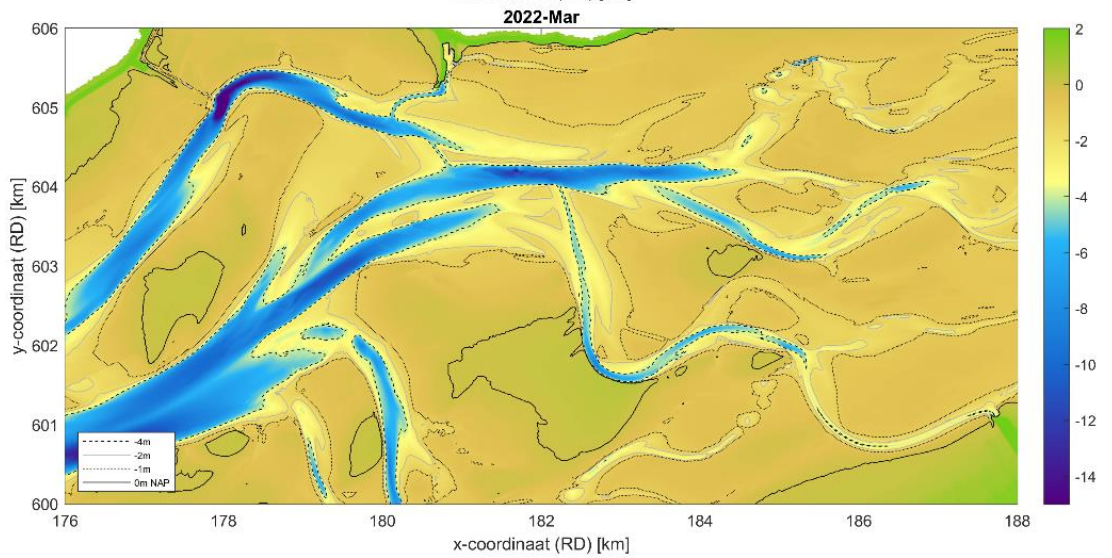
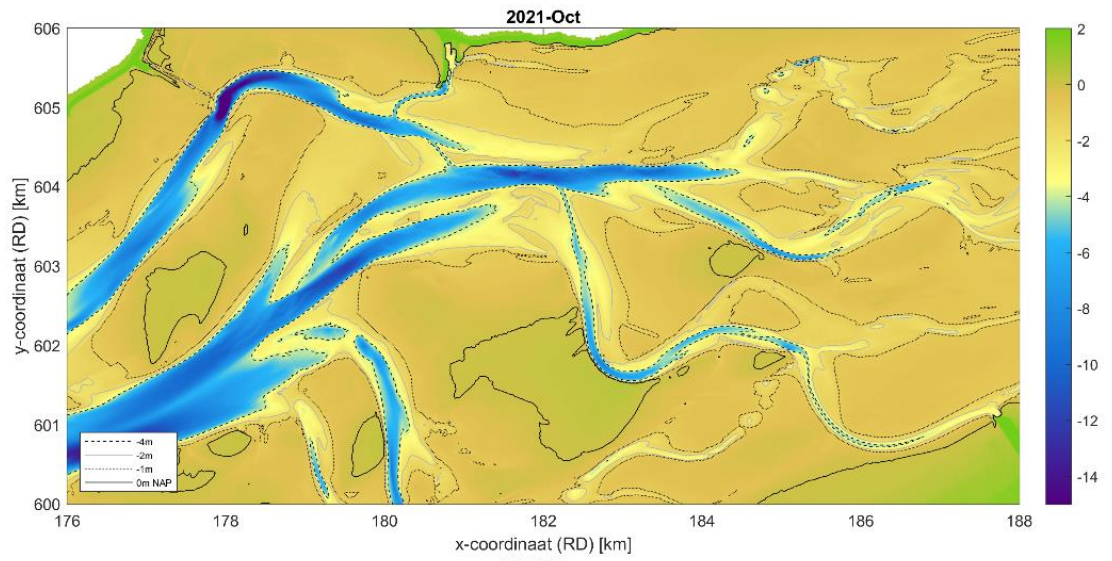
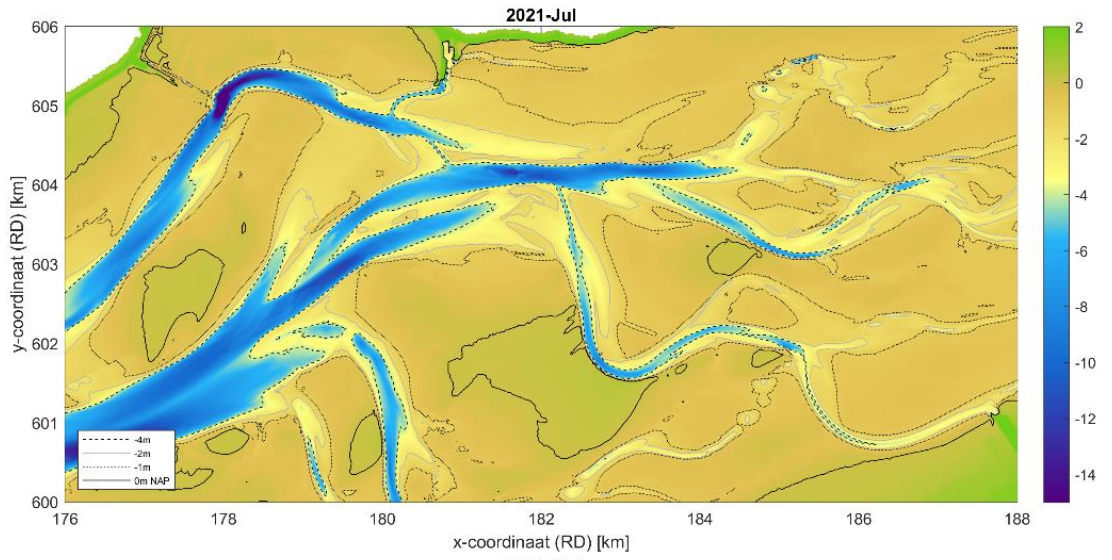


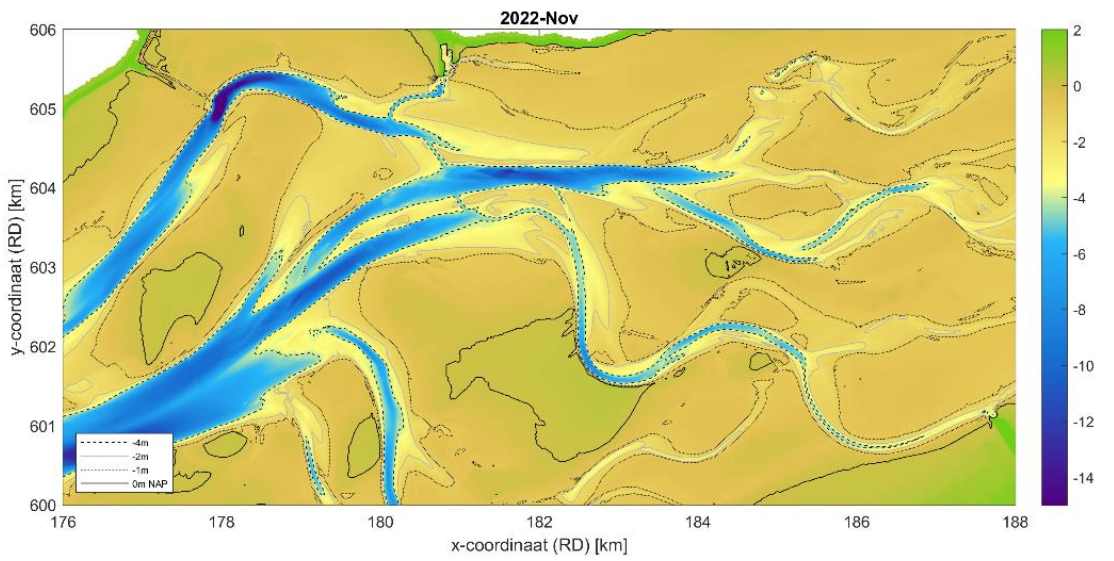
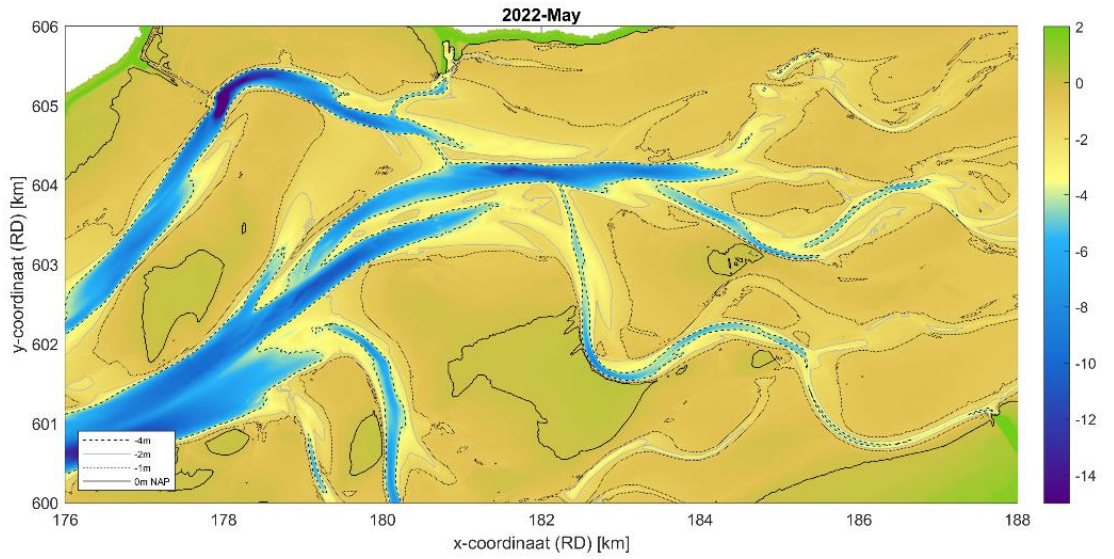


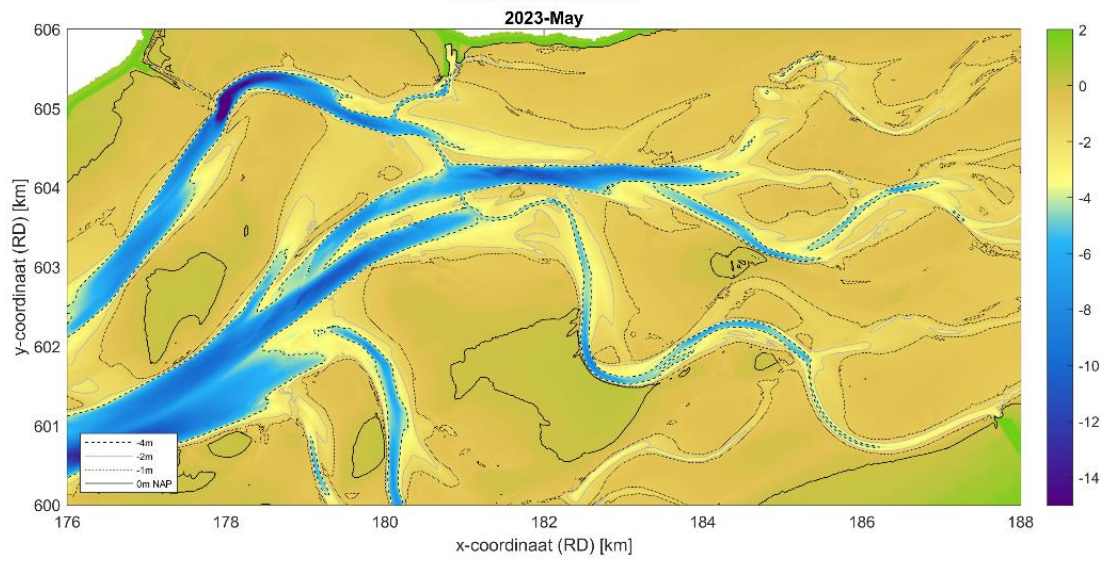
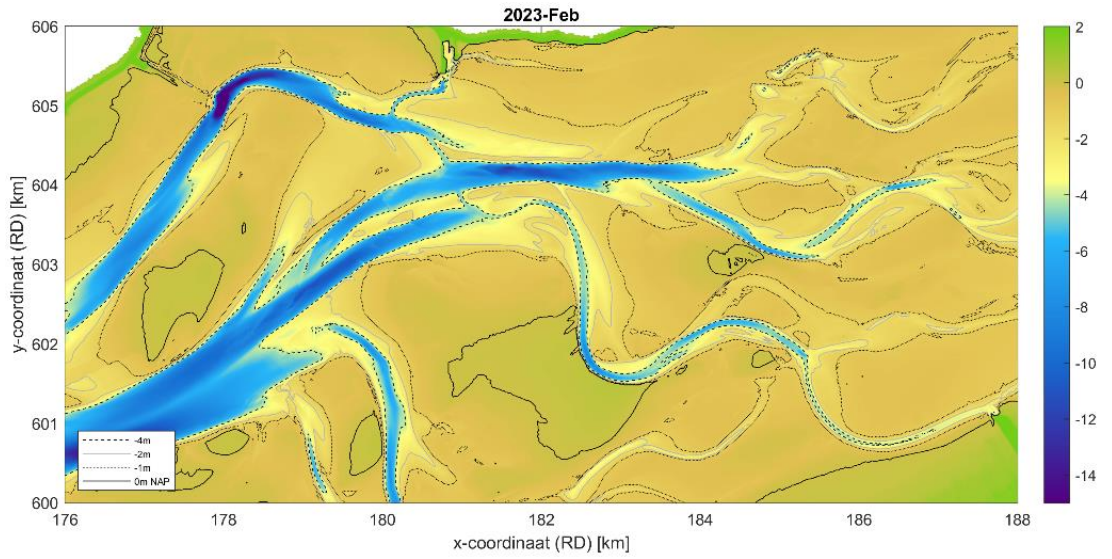




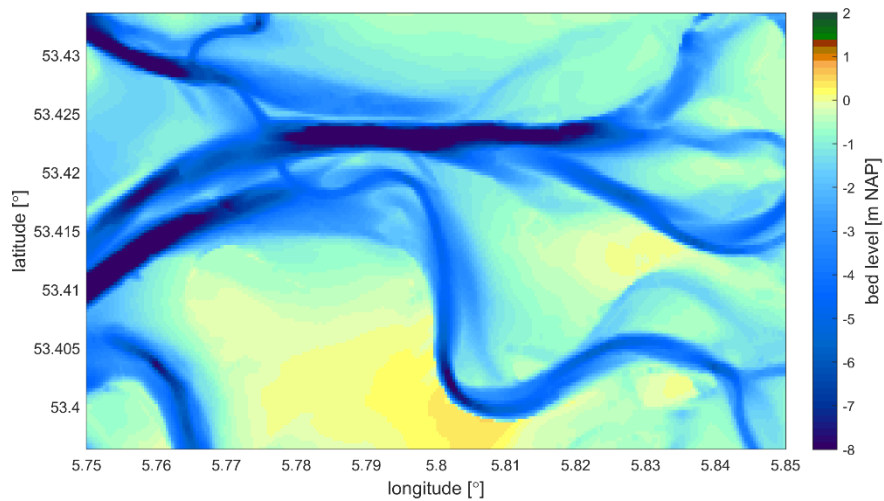




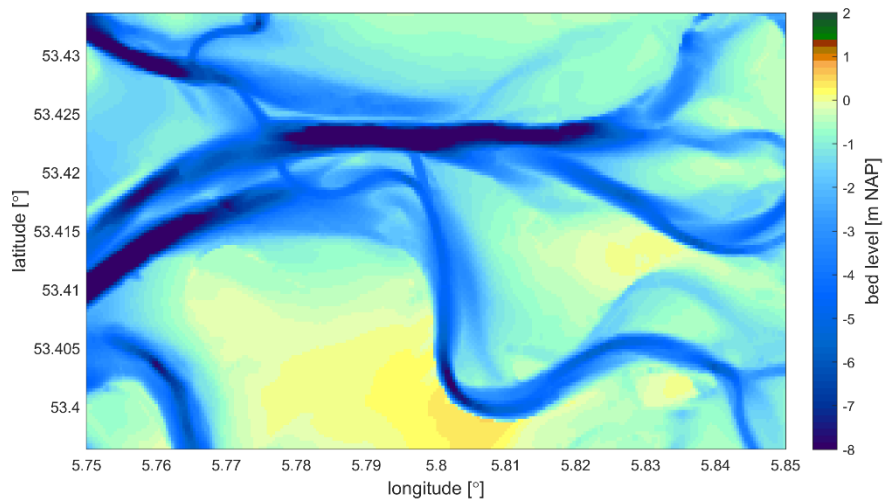




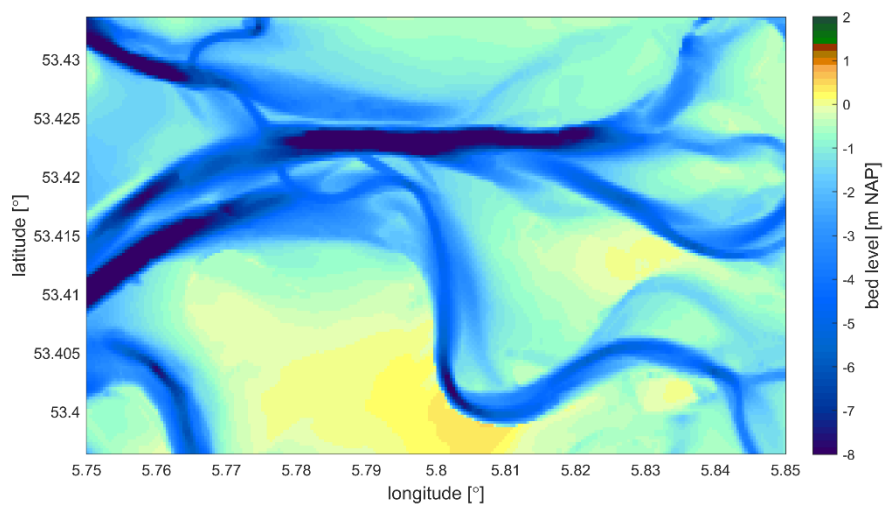
A.4 Modelbodems voor verschillende varianten



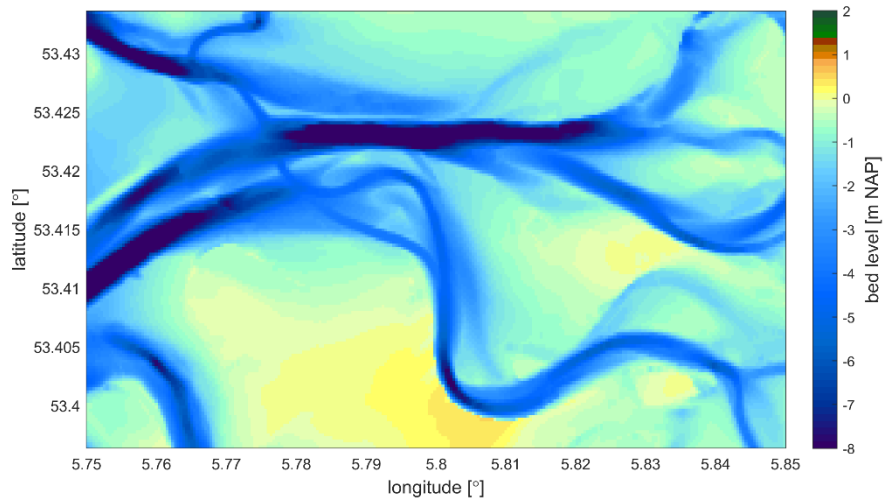
Figuur A.2 Bodemligging in modelberekeningen voor de huidige ligging van de vaargeul.



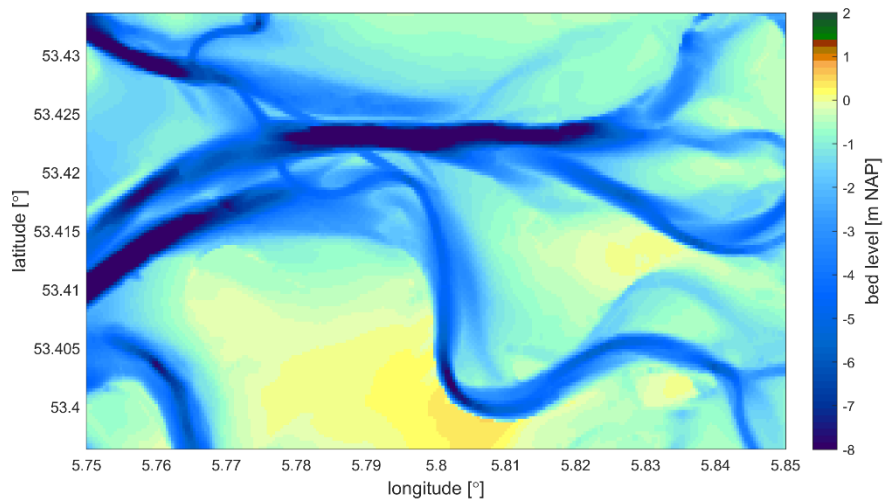
Figuur A.3 Bodemligging in modelberekeningen voor variant Noord Loodrecht.



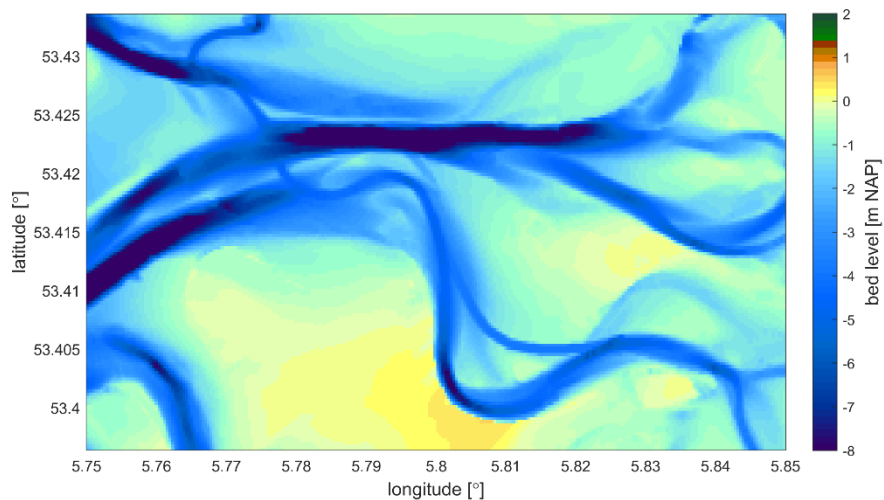
Figuur A.4 Bodemligging in modelberekeningen voor variant Noord Diagonaal.



Figuur A.5 Bodemligging in modelberekeningen voor variant Zuid.



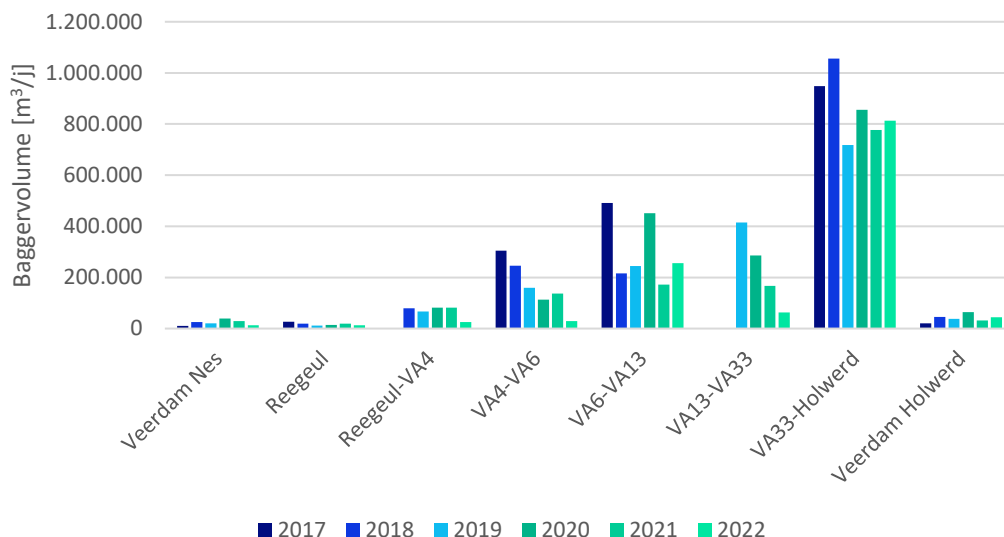
Figuur A.6 Bodemligging in modelberekeningen voor variant Noord Diagonaal in combinatie met een nieuwe verbinding met het Molengat.



Figuur A.7 Bodemligging in modelberekeningen met een bochtafsnijding ten zuidoosten van het huidige knelpunt. De bochtafsnijding is ook in combinatie met de noordelijke en zuidelijke doorsteken doorgerekend, maar die bodemliggingen zijn hier niet weergegeven.

B Ontwikkeling van het onderhoudsbaggerwerk

Het baggerbezwaar op de vaarroute tussen Ameland en Holwerd wordt in de registratie van de baggervolumes opgedeeld in de trajecten (van noord naar zuid) Veerdam Nes, Reegeul, Reegeul-VA4, VA4-VA6, VA6-VA13, VA13-VA33, VA33-Holwerd en Veerdam Holwerd. De geregistreerde volumes tussen 2017-2022 zijn weergegeven in Figuur 7.1.



Figuur 7.1 Baggervolumes tussen 2017-2022 op de vaarroute tussen Nes en Holwerd.

Het huidige knelpunt ligt in het tracé VA6-VA13. Op dit tracé wordt voornamelijk tussen VA9 en VA13 gebaggerd, en sinds 2022 ook tussen VA6 en VA9. Voor de meeste baggervakken zit er een dalende trend in de volumes. Echter voor 2015 zijn er helemaal geen baggervolumes gerapporteerd voor het tracé Reegeul-VA13. Als daar al gebaggerd werd, waren die volumes mogelijk laag of incidenteel. Anekdotische informatie over het baggerbezwaar na realisatie van de vaargeulverlegging, zoals beschreven in Hoofdstuk 1, is in dit geval waardevol naast de baggercijfers.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl