

Morfologische analyse effecten doorlaat Brouwersdam



Morfologische analyse effecten doorlaat Brouwersdam

Auteur(s)

Edwin Elias

Floortje Roelvink

Reinier Schrijvershof

Stuart Pearson

Morfologische analyse effecten doorlaat Brouwersdam




Opdrachtgever	-
Contactpersoon	
Referenties	Referenties
Trefwoorden	Grevelingen, morfologie, doorlaatmiddel, modelering

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	13-09-2021
Projectnummer	11206580-004
Document ID	11206580-004-ZKS-0004
Pagina's	157
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Edwin Elias	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Edwin Elias 	Zheng Wang 	Toon Segeren 	

Samenvatting

In de voorlopers van de planuitwerking Getij Grevelingen is een afweging gemaakt tussen een doorlaatmiddel in de Brouwersdam ten zuiden van Port Zélande (zuidlocatie) of ten noorden van Port Zélande (noordlocatie). Door het doorlaatmiddel keert in beperkte mate getijstroming terug in de Grevelingenmonding en in het Grevelingen meer. Door middel van een analyse van de literatuur, bodemdata en morfostatische modelering zijn de verwachte effecten op de sedimenttransporten en morfologische veranderingen in kaart gebracht.

Ook zonder doorlaatmiddel zullen er grote morfologische veranderingen in de Grevelingenmonding optreden. In de monding wordt nog steeds sediment landwaarts verplaatst als gevolg van de afsluiting van de Grevelingen in 1971. Dit heeft geresulteerd in de vorming van de Bollen van de Ooster, landwaartse verplaatsing van de kleinere bankcomplexen zoals Gloeiende Plaat en nabij Kous, aanzanding op de Aardappelenbult en doorgaande opvulling van de voormalige geulen zoals Brouwershavensche Gat, Kous en Springersdiep. Het merendeel van deze processen gebeurt geleidelijk en zal zich in de toekomst ook doorzetten. Het is ook waarschijnlijk dat de Bollen van de Ooster in de toekomst zal doorbreken, wanneer dit gebeurt is echter niet exact te voorspellen.

In eerste instantie hebben zowel een noordelijk als zuidelijk doorlaatmiddel een gelijk effect. Direct voor het doorlaatmiddel ontstaat een sterke uitstroming en zal zich een lokale uitstroomgeul vormen. Voor beide doorlaten geldt dat de stromingen in het Brouwershavensche Gat en langs de zuidzijde van de Bollen van de Ooster toenemen. De zuidelijke variant geeft hierbij de grootste beïnvloeding van de stroming in het Brouwershavensche Gat. Deze geul wordt daarmee verder geactiveerd als hoofdgetijgeul in de monding. Een vergroting van de stromingen kan de kusterosie van Schouwen negatief beïnvloeden. Ook aan de zuidzijde van de Bollen van de Ooster worden de stromingen onder beide varianten iets hoger. Negatieve effecten op morfologische ontwikkeling van de Bollen van de Ooster worden echter niet voorspeld. Ten noorden van de Middelpaalt zijn de veranderingen beperkt en er is geen morfologische beïnvloeding van de kustlijn van Goeree. Beide doorlaten hebben een vergelijkbaar effect op de sedimenttransporten in het Grevelingenmeer. Alleen in de directe uitstroming (uitstroomjet) van het doorlaatmiddel zijn sedimenttransporten te verwachten. Buiten deze invloedssfeer zijn zandtransporten vrijwel niet aanwezig.

Op langere termijn (>10 jaar) zal de morfologische ontwikkeling van de Grevelingenmonding met een noordelijke variant van het doorlaatmiddel afwijken van de zuidelijke variant. Bij een zuidelijke ligging blijft het Brouwershavensche Gat behouden als getijgeul, waardoor de hieraan gerelateerd kusterosie van Schouwen hier waarschijnlijk zal doorgaan. Met een noordelijke ligging van het doorlaatmiddel is het de verwachting dat zich op langere termijn een nieuwe westelijk gerichte uitstroomgeul vormt door het centrale deel van de buitendelta en bankvorming aan weerszijden hiervan. Het Brouwershavensche Gat zou dan bij voldoende zandaanbod kunnen verdwijnen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	8
1.1	Probleembeschrijving en vraagstelling	8
1.2	Plan van Aanpak.	9
1.3	Leeswijzer	9
2	Evaluatie van eerdere studies	10
2.1	Inventarisatie van onderzoek en rapporten	10
2.1.1	Overzicht	10
2.1.2	Nolte en Lagendijk (2016)	12
2.1.3	Wang (2010)	14
2.1.4	Jansen (2012); Morfologische analyse Voordelta	15
2.1.5	Jansen (2011); Morfologische beoordeling oevererosie en slibsedimentatie Grevelingen.	15
2.2	Evaluatie van de expertsessie; morfologie Voordelta	16
2.2.1	Aanleiding.	16
2.2.2	Afweging van de locatie.	16
2.2.3	Ontwerp	16
2.2.4	Effecten op de waterbeweging	17
2.2.5	Voor- en nadelen van de varianten	17
2.2.6	Onderzoeksvragen	19
3	Analyse grootschalige ontwikkelingen van de Grevelingen(monding)	20
3.1	Beschikbare data van bodems en ingrepen	20
3.1.1	Bodemdata	20
3.1.2	Sedimentsamenstelling	24
3.1.3	Hydrodynamica	26
3.1.4	Een overzicht van ingrepen	29
3.2	Een overzicht van de geulen en platen	31
3.3	Morfologische veranderingen in de monding	33
3.4	Recente ontwikkeling van de Bollen van de Ooster	38
3.5	Een conceptuele weergave van de processen	40
3.6	Ontwikkelingen langs de Brouwersdam	41
4	Modellering	43
4.1	Het Delft3D FM model voor de monding	43
4.1.1	Basis	43
4.1.2	Rekenroosters voor stroming en golven	44
4.1.3	Validatie en kalibratie van de getij randvoorwaarden	48
4.1.4	Golven	49
4.1.5	Implementatie van het doorlaatmiddel in het model	51
4.2	Het Grevelingen model	52

4.3	De SedTRAILS tool	53
4.4	Een overzicht van de aanpak en modelsimulaties	55
5	Modelresultaten voor de Monding	57
5.1	Een analyse van de T0	57
5.1.1	Getijgedreven stromingen	57
5.1.2	Invloed van golven	59
5.1.3	Sediment transporten	61
5.1.4	Transportpaden	63
5.2	Modelresultaten voor de T1 simulatie: doorlaatmiddel Zuid	64
5.2.1	Stromingen en sedimenttransport	64
5.2.2	Transportpaden	67
5.3	Modelresultaten voor de T1: doorlaatmiddel Noord	68
5.3.1	Stromingen en sedimenttransport	68
5.3.2	Transportpaden	70
5.4	Een samenvatting van de verschillen in sedimenttransport voor de twee locaties.	71
5.5	Invloed van het doorlaatmiddel op strand Brouwersdam	72
5.6	Zwemveiligheid	73
5.7	Beantwoording van de modelleringsvragen.	74
6	Modelresultaten voor de Grevelingen	76
6.1	Doorlaatmiddel zuid	76
6.1.1	Snelheden en transporten	76
6.1.2	Oriëntatie en ligging van het zuidelijke doorlaatmiddel	78
6.2	Doorlaatmiddel noord	80
7	Synthese; Ontwikkeling Grevelingenmondig	82
7.1	Een vergelijking van de effecten van het noordelijke en zuidelijke doorlaatmiddel op de monding.	82
7.2	Een doorkijk naar de toekomst	84
7.2.1	Natuurlijke veranderingen (T0)	84
7.2.2	Ontwikkelingen met een zuidelijk doorlaatmiddel.	85
7.2.3	Ontwikkelingen met een noordelijk doorlaatmiddel.	87
8	Conclusies	88
9	Referenties	89
A	Bodemdata	92
A.1	Een overzicht van de beschikbare bodemdata	92
A.2	Ontwikkeling van de Monding	97
A.3	Dwarsprofielen Brouwersdam	100
B	Modelering Grevelingenmondig	105
B.1	Inventarisatie modellen	105
B.1.1	Model schematisatie	105

B.1.2	Modelbodem	107
B.1.3	Morfologische schematisaties van de golven	108
B.2	Methode	111
B.2.1	Validatie waterstanden	111
B.2.2	Positionering doorlaatmiddel, ontgrondingskuil en uitstroomjet	115
B.2.3	SedTrails	120
B.2.4	Modelleringsvragen	121
B.3	T0 simulatie	123
B.4	Doorlaatmiddel zuid	127
B.5	Doorlaatmiddel Noord	137
B.6	Strand Brouwersdam	146
B.7	Aanvullende figuren	148
C	Modelresultaten Grevelingen	149
C.1	Doorlaatmiddel zuid	149
C.2	Doorlaatmiddel Noord	153

1 Introductie

1.1 Probleembeschrijving en vraagstelling

Een doorlaatmiddel in de Brouwersdam voegt aan de kustlangse getijstroming in de Voordelta een kustdwarse stroming toe als gevolg van het vullen en ledigen van het Grevelingenmeer. Deze aanpassing van de stroming werkt door in de morfologie. Dicht bij het doorlaatmiddel waar de verandering in stroming het grootst is, zal sprake zijn van een stroomgeul. Verder weg van het doorlaatmiddel wordt de verandering van stroming snel geringer en zal de morfologische aanpassing waarschijnlijk ook gering zijn. Omdat de morfologie een essentieel kenmerk is van en voor de natuurwaarden in het Natura2000 gebied, kunnen geringe veranderingen desalniettemin relevant zijn. Daarnaast kan andere verhouding tussen de kustlangse en -dwarse transporten gevolgen hebben voor de morfologie van de (eiland)kusten en daarmee voor de waterveiligheid. Ook het recreatiestrand Brouwersdam kan beïnvloed worden.

Waar de Voordelta morfologisch actief is, is het Grevelingenmeer dat in de huidige situatie niet. Morfologische aanpassing beperkt zich tot de ondiepe vooroevers waar door golfwerking al dan niet in interactie met (voor)oeverbescherming langzame erosie optreedt en tot de diepere delen waar voornamelijk fijn sediment ingevangen wordt. Door het doorlaatmiddel keert in beperkte mate getijstroming terug. Dicht bij het doorlaatmiddel waar de stroomsnelheden hoog zijn, zal sprake zijn van morfologische aanpassing van de aanstroomgeul en eventueel van de verbindingsgeul tussen de oude noordelijke en zuidelijke getijgeulen. Verder weg van het doorlaatmiddel blijven stroomsnelheden te gering om morfologisch actief te worden.

In de voorlopers van de planuitwerking Getij Grevelingen is een afweging gemaakt tussen een doorlaatmiddel in de Brouwersdam ten zuiden van Port Zélande (zuidlocatie) of ten noorden van Port Zélande (noordlocatie). Hieraan liggen diverse afwegingen ten grondslag, waarbij dit werkpakket zich beperkt tot de morfologische afweging. De basis voor die afweging is gelegd in een expertsessie in april 2016 over morfologische effecten in de Voordelta (Houtekamer en van Kleef, 2016). Het voorkeursalternatief in de verkenningsfase is gepositioneerd in de noordlocatie.

Uit de verkenningsfase (2019) is naar voren gekomen dat een nadere onderbouwing van de keuze tussen noord en zuid en vervolgens een nadere onderbouwing van de precieze positie binnen de gekozen noord- of zuidlocatie nodig is gericht op de morfologische effecten aan zowel de Voordelta zijde als de Grevelingenmeer zijde. De doelen zijn in de opdrachtverlening als volgt geformuleerd:

- a. Nagaan of de eerder gemaakte keuze van de locatie van het doorlaatmiddel in het noordelijk deel van de dam (expert oordeel 2016) verder onderbouwd en bevestigd kan worden.
- b. Bepalen van de effecten van de ligging en de inzet van het doorlaatmiddel op de morfologie van de Voordelta en de Grevelingen; bijzondere aandacht hierbij voor de beschermingsgebieden die zijn aangewezen als compensatie voor Maasvlakte II.
- c. Bepalen van de meest gunstige positie/locatie van het doorlaatmiddel (optimum tussen grootste waterkwaliteitseffect in de Grevelingen en minste negatieve effecten voor Natura2000 doelen in de Voordelta, instandhouding van stroomgeulen en strandprofielen).
- d. Vaststellen van eventueel benodigde technische ingrepen om nadelige effecten voor de morfologie en eventueel gebruiksfuncties teniet te doen.

1.2 Plan van Aanpak.

De aanpak is gericht op een kwantitatieve, modelmatige onderbouwing van de keuze tussen de noord- en zuidlocatie en de precieze positie binnen de gekozen locatie. Het onderzoek is hierbij in twee delen uitgevoerd. In Fase 1 worden alle voorgaande onderzoeken doorgenomen en worden alle beschikbare data en kennis geïnventariseerd met als doel om de aanpak en scenario's voor de modellering (nader) te definiëren. Fase 2 bestaat uit het modelleren van de effecten van het doorlaatmiddel. In de huidige situatie, zonder doorlaatmiddel, worden de waterbeweging en sedimenttransporten gedomineerd door de balans van het open-zee getij en de golfgedreven transporten. Na aanleg van het doorlaatmiddel wordt een estuariene (dwars)getijcomponent geïntroduceerd in het systeem. Er moet zich nu een nieuwe balans vormen tussen het getij door het doorlaatmiddel, het open-zee getij en de golfgedreven transporten. Met behulp van een model kunnen deze effecten in kaart worden gebracht. De hiervoor gevolgde aanpak volgt een morfostatische benadering en een Lagrangiaanse afschatting van de beïnvloeding van de sedimenttransporten door middel van SedTRAILS.

1.3 Leeswijzer

Naast het inleidende hoofdstuk bestaat deze rapportage uit 8 hoofdstukken. De resultaten van Fase 1 worden in deze rapportage weergegeven in Hoofdstuk 2 en 3. In hoofdstuk 2 wordt een inventarisatie van de beschikbare literatuur gegeven. Het synthesedocument van Nolte en Lagendijk (2016) en de resultaten van de Expertsessie (Houtekamer en Van Kleef, 2016a) geven al een goed beeld van de morfologische vraagstukken die resteren. Hoofdstuk 3 bevat een inventarisatie van de beschikbare meetdata en een overzicht van de morfologische ontwikkelingen van de Grevelingenmonding. Dit hoofdstuk bevat bestaande inzichten die aangevuld zijn met de meest recente data. In dit hoofdstuk is extra aandacht besteed aan de Bollen van de Ooster (H. 3.4 en H. 3.5). Ook is er een gedetailleerde weergave van de directe vooroever van de Brouwersdam (H. 3.6).

De resultaten van fase 2 van dit onderzoek, de morfologische modelering, worden gegeven in Hoofdstuk 5 en 6 voor respectievelijk de Grevelingenmonding en het Grevelingenmeer. In de synthese (Hoofdstuk 7) worden de resultaten samengevat en een doorvertaling gegeven naar korte- en lange-termijn morfologische ontwikkelingen. De rapportage wordt afgesloten met beknopte conclusies (Hoofdstuk 8). Naast deze hoofdstukken is een uitgebreide Appendix toegevoegd met daarin ondersteunende en aanvullende figuren.

2 Evaluatie van eerdere studies

2.1 Inventarisatie van onderzoek en rapporten

2.1.1 Overzicht

In het verleden zijn al vele onderzoeken uitgevoerd naar de ontwikkeling van de Grevelingen en de effecten van een doorlaatmiddel. In onderstaande Tabel 2.1 zijn de voor de morfologie relevante onderzoeken uitgelicht. Hierbij is een onderscheid gemaakt in de verschillende deelgebieden (monding versus Grevelingen) en is er een onderscheid gemaakt in grootschalige en kleinschalige studies.

In de rapportage van Nolte en Lagendijk (2016) wordt een uitgebreide synthese gegeven en worden de resterende kennisvragen samengevat. De belangrijkste inzichten m.b.t tot de morfologie worden hier herhaald in 2.1.2. Daarnaast is voor de relevante studies voor dit deelonderzoek aangegeven wat de belangrijkste inzichten zijn en waar deze verwerkt zijn in de analyses. Resultaten van de rapporten van Wang (2010), Janssen (2011, 2012) worden verder belicht in H. 2.1.3 tot en met H. 2.1.5.

Tabel 2.1: Een overzicht van de beschikbare literatuur en verwerking belangrijke inzichten

Auteur	Jaar	Titel	Relevante inzichten
Grootschalig; morfologie Moding			
Van der spek	1987	Inventariserend morfologisch onderzoek Voordelta; Beschrijving van de ontwikkeling van de buitendelta's van Haringvliet en Grevelingen.	Gedetailleerde beschrijving van de ontwikkeling van de buitendelta's. Deze inzichten zijn verwerkt en aangevuld met recente data in Elias et al. (2019) en Van der Spek en Elias (2020).
Elias, E. P. L., Van Der Spek, A. J. F.,	2015	Grootschalige morfologische veranderingen in de Voordelta 1964 – 2013 (werkdocument)	Gedetailleerde beschrijving van de morfologische veranderingen en het sediment budget van de Voordelta, waar de Grevelingen monding onderdeel van vormt. Deze kennis is verwerkt in H3.2 en 3.3 .
Houtekamer en Van Kleef	2016	Verslag Expertsessie Effecten van een doorlaat in de Brouwersdam op de morfologie van de Voordelta	Relevante inzichten en kansen en risico's van het noordelijke en zuidelijke doorlaatmiddel. Deze studie is samengevat in H2.2
Elias, E. P. L., Van Der Spek, A. J. F., & Lazar, M.	(2017).	The "Voordelta", the contiguous ebb-tidal deltas in the SW Netherlands: Large-scale morphological changes and sediment budget 1965-2013; Impacts of large-scale engineering.	Gebaseerd op Elias en van der Spek (2015). Deze kennis is verwerkt in H3.2 en 3.3 .
Van der Spek, A.P., Elias, E.P.L.	2020	Half a century of morphological change in the Haringvliet and Grevelingen ebb-tidal deltas (SW Netherlands)- Impacts of large-scale engineering 1964-2015	In deze publicatie worden de Grevelingen en Haringvliet in detail geanalyseerd. Van der Spek (1987), Elias en van der Spek (2015) en Elias et al. (2017) vormen de basis. Een belangrijk element uit deze studie is het conceptueel model dat de toekomstige ontwikkeling

			van de Grevelingen uitlegt. Dit model is beschreven in H3.4 .
Kleinschalig: Bollen van de Ooster			
Elias E.P.L.	2015	Verkenning morfologische effecten (geulwand)suppletie Bollen van de Ooster.	Modelanalyse van de effecten van suppleren rond de kop van de Bollen van de Ooster. Inzichten zijn verwerkt in H3.4
Groenewegen, M.Q.T.	2019	Morphological development of the Bollen van de Ooster. A potential hazard for Goeree-Overflakkee?	Modelanalyse van de effecten van suppleren rond de kop van de Bollen van de Ooster.
Kleinschalig: Strand Brouwersdam			
Huibregtse, W.P.	2014	Morphological analysis of the beach at the Brouwersdam	Deze twee studies behandelen beide de werking van een strandsuppletie op Strand Brouwersdam. Van belang is met name de morfologische verandering van dit strand. Met name voor het noordelijke doorlaatmiddel is deze ontwikkeling van belang. Dit onderzoek vormt onderdeel van H3.6 .
Schrijvershof, R.A.	2015	Morphological modelling of a nourishment at the Brouwersdam beach	
Specifiek onderzoek doorlaatmiddel/getijcentrale			
Wang	2010	Morfologische effecten van een getijdecentrale in de Brouwersdam	Uitvoerige morfologische analyse. Deze inzichten vormen een goede basis en zijn verwerkt/komen overeen met de expertsessie zoals gepresenteerd in H2.2 . Zie ook H2.1.2 voor een samenvatting van de belangrijkste inzichten.
Jansen, M.H.P.	2012	Morfologische analyse Voordelta	Morfologische modellering van de effecten van een getijcentrale in de Brouwersdam. Zie H2.1.3 voor aanvullende opmerkingen
de Boom	2016	Modelling hydrodynamics and sediment transport in the Grevelingen outer delta in response to human interventions	Modellering van waterbeweging en sediment transport met en zonder doorlaatmiddel. Resultaten en inzichten vormen onderdeel van de expertsessie en zijn beschreven in H2.2.4 . Een overzicht van het beschikbare model wordt getoond in Appendix B.1 .
Natuur (Monding en Grevelingen)			
Houtekamer en Van Kleef	2016a	Verslag expertsessie Effecten van een doorlaat in de Brouwersdam op de natuur van de Voordelta	niet geëvalueerd.
Grevelingen meer			
Jansen, M.H.P.	2011	Morfologische beoordeling oevererosie en slibsedimentatie Grevelingen	Gedetailleerde studie van de morfologische veranderingen in het binnengebied door middel van modellering. Een beknopt overzicht van relevante resultaten is gegeven in H2.1.4 .
Houtekamer en Van Kleef	2016b	Verslag Expertsessie Effecten van een doorlaat in de Brouwersdam op de slibhuishouding van de Grevelingen,	Een belangrijke conclusie is dat de opwerveling van bestaande sliblagen in de Grevelingen niet voor langdurig, grote vertroebeling zorgt. Het vraagstuk of slib dat vanuit de Noordzee wordt aangevoerd een belangrijke rol speelt is niet beantwoord.
van Kessel, T. Veheul, M.R.A., de Lucas Pardo, M.A., Ibanez, M.E.	2016c	Resultaten bodemonmonsteranalyse Grevelingen en Volkerak-Zoommeer	niet geëvalueerd.

2.1.2 Nolte en Lagendijk (2016)

In de rapportage van Nolte en Lagendijk (2016) wordt een vijftal kennisvragen beantwoord m.b.t de morfologie. Als basis voor deze beantwoording liggen ten grondslag: data-analyse en -interpretatie van raaimetingen en lodingen, hoogte- en dieptebestanden, literatuurstudie en de modelstudie van Jansen (2011, 2012). Deze vragen en antwoorden worden voor de volledigheid hieronder herhaald.

Wat zijn de te verwachten effecten op het Grevelingenmeer?

In het Grevelingenmeer is het effect te onderscheiden tussen de intergetijdengebieden en (voor)oevers en de delen dieper dan 2 meter onder het waterniveau.

Het directe effect van 50 cm getij is het ontstaan van circa 1400 ha intergetijdengebieden (tussen NAP -0,45 m en NAP +0,05 m). Het intergetijdengebied en de vooroever zullen zich echter aanpassen aan de nieuwe stromings- en golfcondities en zijn daarbij afhankelijk van de aanwezig bescherming. Van de ongeveer 60 km oever wordt zo'n 46 km beschermd door directe of indirecte (voor)oeververdediging. Zo'n 14 km oever is onbeschermd. Volgens Rijkswaterstaat (2010) zal erosie van het intergetijdengebied en de vooroever (tot 2 meter onder het laagste waterniveau) optreden, omdat de afbrekende morfologische kracht van de golven dominant is boven de opbouwde morfologische kracht van het getij, equivalent aan de zandhonger in de Oosterschelde. Voor de vooroever wordt globaal een verdieping voorspeld van 0,25 m zijnde het verschil tussen huidig gemiddeld peil en toekomstig laagwater. Op de afname van het areaal intergetijdengebied wordt geen effect verwacht, ofwel de afname bij 50 cm getij blijft gelijk aan de huidige afname die geschat wordt op 240 ha in 5 jaar (Rijkswaterstaat, 2010).

Witteveen + Bos (2011) heeft de ontwikkeling van het intergetijdengebied en de vooroever ook onderzocht voor 50 cm getij, maar gaat daarbij uit van een middenstand van NAP -0,10 m. Aangezien zij constateren dat de erosie afneemt ten opzichte van de huidige situatie, omdat de gemiddelde waterdiepte toeneemt, is de aangenomen hogere middenstand mogelijk van groot belang voor deze conclusie. Het resultaat is daardoor niet zondermeer bruikbaar voor de randvoorwaarde van middenstand NAP -0,20 m bij 50 cm getij. Tenslotte geeft Deltares (2010) nog aan dat de gaten tussen de vooroeverdammen zullen uitschuren door de sterke stroming bij het vullen en legen van het gebied achter de dammen.

Van de diepere delen en dan vooral de geulen wordt geen morfologische verandering verwacht anders dan een zich voortzettende zeer langzame opvulling met sediment dat van de ondieptes komt of (waarschijnlijk in beperkte mate) door het doorlaatmiddel vanaf de Voordelta. In de delen dieper dan NAP -15 m is afzetting van fijn slib aannemelijk als voortzetting van de huidige situatie. Uitzondering is de erosie bij de doorlaat en een kortsluitgeul tussen de noordelijke en zuidelijke geul ten zuidwesten van de Hompelvoet.

Wat zijn de te verwachten effecten op de Voordelta?

Het effect is uit te splitsen in de korte termijn en de lange termijn. Op de korte termijn zal in de aan- en uitstroming van het doorlaatmiddel uitschuring van de geul plaatsvinden. Deels zal deze geul aangelegd worden en van bodembescherming worden voorzien. Na een initieel snelle ontwikkeling van de nieuwe geul in weken tot maanden, zal de geul onderdeel gaan uitmaken van het dynamisch evenwicht in de Voordelta.

Op de lange termijn is het in zekere zin complexer, omdat de Voordelta zich nog morfologisch aan het aanpassen is aan de Deltawerken en de tweede Maasvlakte. Een uitwisseling met het Grevelingenmeer komt daarbij als aandrijver van morfologische verandering, maar wordt als kleinschaliger dan de andere twee ontwikkelingen gezien. Tijdens de laatste decennia blijken de Bollen van de Ooster hoger, smaller en langgerechter te worden. Bovendien zijn ze aan zeezijde geërodeerd. Aan de landzijde zijn de platen aangezand richting Goeree. Verwacht

wordt dat de huidige landwaartse verplaatsing van de Bollen van de Ooster door zal zetten. Witteveen + Bos (2011b) voorspelt met een morfologisch model dat de verplaatsing sneller zal plaatsvinden, maar dat de afname van de breedte minder snel zal verlopen. Het aanlanden van de Bollen van de Ooster wordt als mogelijkheid gezien, hoewel dat ook als autonome ontwikkeling kan gebeuren.

De door Rijkswaterstaat georganiseerde expertsessie 'Morfologie Voordelta' concludeerde samenvattend voor de Bollen van de Ooster het volgende (Houtekamer en Van Kleef, 2016a): "Het gebied verandert nog steeds door de bouw van de dammen en recenter door de aanleg van Maasvlakte 2. Het heeft een functie als rustplaats voor zeehonden en foerageergebied van zeevogels, het is aangewezen als Natura-2000 gebied en extra beschermd als compensatie voor de natuureffecten van Maasvlakte 2 en de kortsluitgeul Schaar zorgt voor kustafslag. De aanleg van een doorlaatmiddel heeft op dit alles invloed waardoor de stapeling van effecten toeneemt. Of dat in positieve of negatieve zin is, is vooralsnog onduidelijk. De experts adviseren Rijkswaterstaat daarom onderzoek uit te voeren naar de gevolgen van een doorlaatmiddel voor de morfologie en ecologie van het platengebied en een eventuele aanlanding van het platengebied aan de kust van Goeree, op korte en lange termijn. Het is belangrijk om de gevolgen af te kunnen zetten tegen de autonome ontwikkeling, zodat Rijkswaterstaat daar ook kennis over dient te vergaren. Kennis van de ontwikkeling van de Hinderplaat voor de kust van Voorne kan hierbij van pas komen. De reeds verzamelde kennis in het MER behorend bij de Rijksstructuurvisie Grevelingen en Volkerak-Zoommeer en de daaraan ten grondslag liggende rapporten bieden daarvoor een goede basis."

De dynamiek in het gebied tussen de Bollen van de Ooster en de Brouwersdam wordt groter door de uitwisseling met het Grevelingenmeer. Geulen kunnen zich verdiepen of zouden langer open kunnen blijven. Hoewel niet gekwantificeerd en moeilijk te voorspellen, wordt de toegenomen dynamiek als positief voor de natuur gezien.

Zijn de effecten verschillend voor een doorlaatmiddel of een getijdencentrale?

Het effect op morfologie is alleen afhankelijk van de debieten die uitgewisseld wordt tussen Noordzee en Grevelingenmeer. Aangezien dat gelijk is voor een doorlaatmiddel en een getijdencentrale, is er geen verschil voor de morfologie. Omdat voor een getijdencentrale een grotere, bredere opening in de Brouwersdam nodig is dan voor uitsluitend een doorlaatmiddel, zijn de stroomsnelheden dichtbij de getijdencentrale lager dan bij het doorlaatmiddel. Voor ontgronding en uitschuring zal er dus lokaal enig verschil zijn.

Wat zijn de resterende kennisvragen?

Dat er in het Grevelingenmeer intergetijdengebied ontstaat is vanzelfsprekend. Hoe het areaal intergetijdengebied en de bijbehorende vooroever zich zal ontwikkelen is niet zeker, maar een afname is waarschijnlijk. Voor het doen van meer concrete prognoses op lange termijn zou ook meer bekend moeten zijn omtrent de ondergrond qua mogelijke aanwezigheid van slecht erodeerbare lagen. Verder (model)onderzoek zal de onzekerheid niet wezenlijk kunnen verkleinen, zodat beoordelingen voor bijvoorbeeld natuur beter met kansen- en risicobreedtes kunnen werken.

De expertsessie Morfologie Voordelta heeft de volgende kennisvraag geformuleerd:

"Het is nog onduidelijk wat precies de invloed van een doorlaatmiddel kan zijn op de Bollen van de Ooster en op de Schaar. Het vermoeden bestaat dat de kans op het vastgroeien van het platengebied aan Goeree toeneemt, maar de onzekerheid is groot. Ook is onzeker wat de invloed is op het platengebied en of dat positief of negatief is voor de natuurfunctie, afgezet tegen Natura-2000-doelstellingen, compensatiedoelstellingen voor Maasvlakte 2 en autonome ontwikkeling. Uit de expertsessie komt de vraag voort hier nader onderzoek naar te doen. Zowel gedetailleerde rekenkundige modellen als het bestuderen van ontwikkelingen bij het Haringvliet kunnen hierbij behulpzaam zijn."

2.1.3 Wang (2010)

De studie van Wang (2010) geeft al veel onderbouwing van de morfologische effecten van een getijcentrale. Voor een groot deel komen deze inzichten terug in de resultaten van de expertsessie (H. 2.2). Wel wordt in deze studie een betere onderbouwing gegeven. Hieronder worden de doelstellingen en een samenvatting van de inzichten van deze studie weergegeven.

De doelstellingen van deze studie zijn, middels een bureau studie:

- (1) Een inventarisatie te geven van de te verwachten morfologische veranderingen als gevolg van de getijdecentrale in de Brouwersdam.
- (2) Advisering in hoeverre de sedimentatie in de nabijgelegen geulen de werking van de centrale kan beïnvloeden.
- (3) Aanbevelingen te geven over verder benodigd onderzoek.

Als mogelijke effecten van een getijcentrale voor het Grevelingenmeer worden genoemd:

- Sedimentatie/erosie van de geulen. In de huidige situatie is de getijstrooming in de geulen praktisch volledig weggefallen. De geulen hebben dus een grote potentiële zandhonger. Maar door gebrek van sedimentbronnen treden er nauwelijks sedimentatie op in de geulen. Ook in de nieuwe situatie met de getijdecentrale zullen de geulen in het Grevelingenmeer potentiële zandhonger hebben voor het scenario dat het getijverschil ongeveer 0,6 m wordt. Veranderingen van de geulen kunnen optreden door sediment van gebieden met een kleinere zandhonger (dichtbij de centrale) naar gebieden met een grotere zandhonger (verder van de centrale) te transporteren. Het gaat echter om relatief kleine en langzame veranderingen. Doordat de getijstrooming bij de dam alleen door de noordelijke geulen gaat, zal er lokaal sterkere verandering optreden, namelijk het verruimen van de kortsluitgeul vlakbij de centrale.
- Veranderingen m.b.t. erosie van de oevers en ondiepe gebieden. De inschatting is dat de oeverbeschermingen (na eventuele aanpassingen) effectief zullen blijven werken.
- Ontwikkelingen rondom de gaten in de vooroeverdammen. Hierbij wordt geconcludeerd dat een getijstrooming door deze gaten niet tot ernstige erosie zal leiden. Lokale erosie kan met aanvullende bestorting worden gemitigeerd.

In de Grevelingenmonding kunnen de volgende relevante veranderingen optreden:

- Verandering m.b.t. erosie van de vooroever en sedimentatie. De huidige afbraak van het zeewaartse deel en sedimentatie landwaarts zal afgeremd worden. Het is echter de verwachting dat deze ontwikkeling niet geheel stopt. Hiervoor is de nieuwe getijbeweging te beperkt.
- Verandering in de ontwikkeling van de Bollen van Ooster. Deze zandbanken zijn sinds de bouw van de Brouwersdam uitgebreid als gevolg van de verandering van het patroon en de sterkte van de getijstrooming. Hoe deze ontwikkeling zal veranderen in de nieuwe situatie met de getijdecentrale is moeilijk aan te geven. Afname van de omvang van deze zandbanken kan niet worden uitgesloten. Dit kan ook in het geval van de autonome ontwikkeling plaatsvinden.
- Verandering m.b.t. sedimentatie-erosie van de geulen. Sinds de bouw van de Brouwersdam is er sedimentatie in de geulen in het mondinggebied opgetreden. De sterkere getijstrooming in de nieuwe situatie met de getijdecentrale zal leiden tot erosie in deze geulen, vooral dichtbij de getijdecentrale.
- Verandering m.b.t. ontwikkeling van de platen/ondiepten. Sinds de bouw van de Brouwersdam worden de platen en ondiepten in het binnendeel van het mondinggebied geërodeerd. In de nieuwe situatie zal de getijstrooming sterker worden, daarom zal de erosie vergroten.

- Heroriëntatie van de geulen. Het stromingspatroon in de nieuwe situatie met de getijdecentrale zal anders zijn t.o.v. de situatie van vóór de bouw van de Brouwersdam. Dit kan mogelijk tot heroriëntatie van de geulen leiden in de vorm van lokale erosie van bijvoorbeeld een kortsluitgeul, hoewel het nu niet kan worden aangegeven hoe dit gaat gebeuren.

Van de bovengenoemde effecten zijn de volgende zorgpunten geconstateerd:

- Verruiming van de kortsluitgeul dicht bij de getijdecentrale aan de binnen zijde van de Brouwersdam door erosie. Als dit negatief worden beschouwd kan men als mitigerende maatregel dit gebied van tevoren uitbaggeren.
- Mogelijke afname in omvang van de Bollen van Ooster.
- Erosie van geulen dichtbij de getijdecentrale buiten de Brouwersdam. Ook het vrijkomen van het afgezette slib vraagt aandacht.
- Mogelijk heroriëntatie van geulen in het mondinggebied die gepaard gaat met bijvoorbeeld sterk lokale erosies.

2.1.4 Jansen (2012); Morfologische analyse Voordelta

De studie van Jansen (2012) presenteert de resultaten van morfologische modellering van een getijcentrale in de Brouwersdam. Analyse van de resultaten geeft weer dat de morfologische veranderingen van de Bollen van de Ooster wel redelijk weergegeven worden (Jansen 2012; pag. 22, Figuur 4.10). De veranderingen in het zuidelijk deel zijn echter onrealistisch. Hier wordt meer dan 5 m sedimentatie en erosie gemodelleerd. Ook de veranderingen nabij Middelpaalt lijken minder goed te worden weergegeven. Realistische morfologische resultaten zijn bij toepassing van dit model voor de doorrekening van het doorlaatmiddel dan ook niet waarschijnlijk. Hiervoor is nog een verdere modelverbetering benodigd.

2.1.5 Jansen (2011); Morfologische beoordeling oevererosie en slibsedimentatie Grevelingen.

In deze studie wordt geconstateerd dat na afsluiting de geulen zich gedeeltelijk met sediment hebben gevuld. Het sediment is afkomstig van erosie (golfgedreven) van de plaatranden. Uit het onderzoek blijkt dat:

- De mate van (potentiële) erosie bij het inlaten van het (gereduceerd) getij nog steeds plaatsvindt, maar wel afneemt tussen de huidige situatie en de toekomstige situatie in 2020 en 2100. Dit komt met name door een toenemende waterstand.
- De golfcondities (significante golfhoogte en gemiddelde golfperiode) gemiddeld respectievelijk 10 % en 30-50 % toenemen tijdens normale omstandigheden voor de jaren 2020 en 2100 ter plaatse van ondiepe delen in de Grevelingen. Ter plaatse van de diepe geulen nemen de golfcondities alleen toe voor de situatie in 2100 (ongeveer 5 %).
- De golfanalyse laat zien dat bij een verhoogde waterstand de vooroeverdammen nog steeds effectief blijven werken.
- Het getij zorgt ervoor dat de erosie minder op één vaste oeverlijn werkt, maar de erosie/aanzanding meer verdeeld over de verticaal (in het intergetijdengebied) plaatsvindt, waardoor de platen minder snel eroderen.

Ten aanzien van de verspreiding van slib in de Grevelingen worden de volgende conclusies getrokken:

- De stroomsnelheden in de Grevelingen nemen toe tot maximaal 0,4 m/s in de hoofdgeulen tot 0,8 m/s ter plaatse van de drempel tussen de zuidelijke en noordelijke geulen. Hierdoor ontstaat erosie bij de openingen en ontstaat er een kortsluitgeul tussen de getijdencentrale en de zuidelijke geul.

- De slibconcentraties nemen lokaal toe tot maximaal 0,12 kg/m³. Deze lokale toename treedt alleen op zolang erosie optreedt en er nog slib aanwezig is op de bodem. In het overgrote gedeelte van de Grevelingen verandert de slibconcentratie nauwelijks in relatie tot de huidige situatie. Er kan geconcludeerd worden dat de effecten dus zeer lokaal zijn. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat de morfologische veranderingen nog niet zijn meegenomen in de waterbeweging. Deze kunnen een (geringe) invloed hebben op de concentraties en de slibverspreiding.

2.2 Evaluatie van de expertsessie; morfologie Voordelta

Dit paragraaf geeft een samenvatting van de expertsessie over het effect van een doorlaatmiddel Brouwersdam op de morfologie van de Voordelta (20 April 2016).

2.2.1 Aanleiding.

In de lente en zomer verdwijnt het zuurstof uit de diepe geulen van het meer, ontstaan witte bacteriematten en sterft het bodemleven dat je van nature in de geulen zou verwachten. De oplossing voor dit probleem is om het water in de geulen telkens door het getij in beweging te brengen. Dit kan door in de Brouwersdam een groot doorlaatmiddel met een gemiddeld debiet van 950-1000 m³/s te bouwen.

2.2.2 Afweging van de locatie.

Het doorlaatmiddel kan zowel ten noorden als ten zuiden van de Middelplaat gebouwd worden. Op dit moment heeft Rijkswaterstaat een voorkeur om het in het noordelijke deel van de dam te bouwen, tussen de Middelplaat en Goeree. De volgende overwegingen zijn hiervoor van belang:

- In het zuidelijke deel van de Brouwersdam is weinig ruimte. Daarom wordt het lastig om de Brouwerssluis te behouden als het nieuwe doorlaatmiddel ook in het zuidelijke deel wordt aangelegd. Bij aanleg in het noordelijke deel kan de Brouwerssluis in bedrijf blijven. Hierdoor wordt peilbeheer met twee openingen mogelijk (getij, waterkwaliteit) en kunnen vissen en zeezoogdieren van en naar het meer trekken.
- In het zuidelijke deel zijn meer initiatieven gaande, zoals de bouw van Brouwerseiland.
- Bij een noordelijk doorlaatmiddel worden problemen met de waterkwaliteit in dat deel van het Grevelingenmeer opgelost (de geulen zijn daar niet zo diep), terwijl de problemen in de zuidelijke geulen bij een zuidelijk doorlaatmiddel deels blijven bestaan (de geulen zijn daar veel dieper en hebben minder baat bij het doorlaatmiddel). Een noordelijk doorlaatmiddel is daarom effectiever.

2.2.3 Ontwerp

In het referentiealternatief heeft het doorlaatmiddel 15 betonnen kokers met een opening van 8x8 meter, met een doorstroomoppervlak van 960 m² en een breedte van 137 meter. De kokers worden 50 meter lang. Bij aanleg in het noorden van de dam kan de drempel van de caissons, die gebruikt zijn voor het sluiten van de stroomgeul, blijven liggen. In het zuiden liggen grote betonblokken die verwijderd moeten worden voor aanleg.

Er is ook een andere variant denkbaar waarbij minder, maar diepere kokers gebruikt worden (10 kokers van 12x8 meter). De breedte van het doorlaatmiddel en de hoeveelheid beton die ervoor nodig is zijn daardoor kleiner, maar door de grotere diepte moet daarvoor in het noorden de caissondrempel weg. De waterstroom is ook geconcentreerder, wat meer ontgroning geeft.

Als het doorlaatmiddel ook getijcentrale wordt, zal de weerstand van de turbines ervoor zorgen dat minder water in en uit het meer stroomt. Om het debiet te herstellen zal de doorlaat daarom breder worden. Het doel is en blijft een gemiddeld debiet van 950-1.000 m³/s. Piekdebieten kunnen oplopen tot 5.000 m³/s.

Aanvullende maatregelen zijn benodigd bij aanleg van een noordelijk doorlaatmiddel. Aan de zee- en meerzijde van het doorlaatmiddel is bodembescherming benodigd om ontgrondingskuilen te voorkomen. Ter behoud van het recreatiegebied op de Middelpaat (strand Brouwersdam) zal een strekdam nodig zijn. Het strand verplaatst noordwaarts en zal zonder aanvullende maatregelen eroderen.

2.2.4 Effecten op de waterbeweging

Effecten op de waterbeweging en sedimenttransporten zijn in kaart gebracht met behulp van Delft3D modellering (de Boom, 2016). Op basis van de uitgevoerde modellering kan worden geconcludeerd dat bij een doorlaatmiddel in het zuidelijke deel van de Brouwersdam (ter plaatse van het voormalige Brouwershavensche gat) de stroming zowel bij vloed als bij eb de loop van de oude geul blijft volgen.

Een doorlaatmiddel in het noorden zal meer dynamiek teweeg brengen in het hele mondingsgebied dan een centrale in het zuiden. Met een doorlaatmiddel in het noorden trekt bij vloed de stroming langs Middelpaat heen en stroomt bij eb deze langs het strand naar het zuidwesten. Deze aan- en afvoer kan tot de vorming van een zuidwest-noordoost georiënteerde geul leiden die tegen de Middelpaat schuurt.

Een aandachtspunt zijn ook de Bollen van de Ooster, de langgerekte bank die zich net ten zuidwesten van de kust van Goeree uitstrekt. Vooral bij de noordelijke maar ook bij het zuidelijke doorlaatmiddel nemen vloed- en ebstream door de Schaar (de kortsluitgeul tussen de Bollen van de Ooster en het strand van Goeree) af. De effecten van een doorlaatmiddel op de Bollen van de Ooster dienen daarbij zorgvuldig in kaart te worden gebracht.

2.2.5 Voor- en nadelen van de varianten

De voor- en nadelen van de zuidelijke en de noordelijke variant zijn in Tabel 2.2 samengevat. Deze voor- en nadelen vormen de basis voor de uit te voeren modelering. In Appendix B.2.4 zijn deze uitgewerkt in modeleringsvragen. Deze modeleringsvragen worden in Hoofdstuk 5 en 6 onderzocht.

Naast de voor- en nadelen per doorlaatmiddel is een aantal belangrijke opmerkingen geplaatst: Er is voor beide doorlaten waarschijnlijk geen baggerwerk nodig om het doorlaatmiddel open te houden.

- De morfologische ontwikkeling van het kustgebied is niet bepalend in de keuze. Het voorbehoud is hier dat de directe effecten van ontgrondingskuilen onder controle blijven.
- Stapeling van effecten voor de Bollen van de Ooster. Dit gebied fungeert als compensatie voor de natuureffecten van Maasvlakte 2. Daarnaast is er kustafslag bij Goeree aan de kop van de Bollen.
- Slibtransport naar de Grevelingen. Door erosie van slibafzettingen in de oude geulen.

Tabel 2.2: Voordelen en nadelen van een zuidelijke versus een noordelijk doorlaatmiddel

Voor- en nadelen zuidelijke en noordelijke doorlaat			
Zuid		Noord	
Voordeel	Nadeel	Voordeel	Nadeel
Sluit aan op bestaande diepe getijgeul: rustiger patroon van morfologische aanpassingen	Minder herstel van getijdynamiek in grotere kustgebied	Uitstroom in WZW-richting zorgt voor meer dynamiek in grotere kustgebied met nieuwe geul	
Kleinere kans op versterkte kusterosie door Schaar bij Goeree	Kleinere kans op vastgroei Bollen vd Ooster aan Goeree	Kans op vastgroei Bollen vd Ooster aan kust Goeree	Grotere kans op versterkte kusterosie door Schaar bij Goeree
	Kans op kusterosie door sterke uitstroom langs kust Schouwen (Noorderstrand, Renesse)	Sterke uitstroom is van kust af gericht: geen kans op directe kusterosie	
	Kans op erosie door neer in hoek van kust Schouwen, mogelijk strekdam nodig		Kans op erosie door neer in hoek van kust Goeree
			Verhindert migratie Middelpaats in noordelijke richting: strekdam en suppleties nodig
			Gevaar badgasten voor gevaarlijke stroming
	Door ontgroning import van slibrijk sediment naar Grevelingenmeer. Meer slib dan bij Noord	Sediment naar Grevelingenmeer is wel minder slibrijk, minder vertroebeling	Door ontgroning veel sediment naar Grevelingenmeer
	Bestorten ontgrondingskuil is moeilijker door slibrijke ondergrond		
	Minder ruimte voor ontgrondingskuil: eerder bestorting nodig		
	Door kleilagen in bodem kans op onregelmatige, onvoorspelbare erosie		

2.2.6 Onderzoeksvragen

Tijdens de bijeenkomst is een aantal onderzoeksvragen geformuleerd.

1. Het is onduidelijk wat de invloed van een doorlaatmiddel is op de Bollen van de Ooster en op de Schaar. Het vermoeden bestaat dat de kans op het vastgroeien van het platengebied aan Goeree toeneemt (vooral bij een noordelijk doorlaatmiddel), maar de onzekerheid is groot. Ook is onzeker wat de invloed is op het platengebied en of dat positief of negatief is voor de natuurfunctie, afgezet tegen Natura-2000-doelstellingen, compensatiedoelstellingen voor Maasvlakte 2 en autonome ontwikkeling. De experts adviseren Rijkswaterstaat hier nader onderzoek naar te doen. Zowel gedetailleerde rekenkundige modellen als het bestuderen van ontwikkelingen bij het Haringvliet kunnen hierbij behulpzaam zijn.
2. In bredere zin herstelt een doorlaatmiddel een deel van de getijdedynamiek in het totale zeegebied, bij de noordelijk doorlaatmiddel meer dan bij de zuidelijke. Morfologische dynamiek speelt een rol in het ecosysteem door de verscheidenheid aan habitats die het tot gevolg heeft. De experts raden Rijkswaterstaat aan te onderzoeken in hoeverre de meerwaarde van het noordelijke doorlaatmiddel medebepalend kan zijn voor locatiekeuze.
3. Kennis van de samenstelling en erodeerbaarheid van de bodem ter plaatse en in de omgeving van de ontgrondingskuilen is belangrijk voor het inschatten van het slibtransport door het doorlaatmiddel naar het Grevelingenmeer en van het risico op onverwachte patronen (bijvoorbeeld verder zijwaarts of verder weg van het doorlaatmiddel). De experts adviseren Rijkswaterstaat de bodemsamenstelling door middel van boringen te bepalen en te betrekken in de analyse.
4. Vertroebeling van het meer is een risico voor verschillende functies. Aan de ene kant wordt (voor zover dit het zeegebied betreft) mogelijke vertroebeling versterkt door import van slib uit de ontgrondingskuilen (zie 2), maar ook schommelende dichtheidsverschillen door wisselende rivierafvoer kunnen voor verrassende effecten zorgen. De experts adviseren Rijkswaterstaat daarom potentiële effecten van slibimport te onderzoeken.
5. Bij zowel een zuidelijke als een noordelijk doorlaatmiddel zullen zich ontgrondingskuilen vormen. De experts adviseren Rijkswaterstaat grondig onderzoek te doen naar de (driedimensionale) omvang van de kuilen en hoe de bodem beschermd kan worden. Bijzondere aandacht is nodig als blijkt dat er in de ondergrond veel slib aanwezig is (zie 2): klei kan bodembescherming complexer maken.
6. Bij een zuidelijk doorlaatmiddel is de kust van Schouwen nabij. Er kan kustafslag optreden als de ontgrondingskuil te groot wordt, als er een neer ten zuiden van de ebstroom ontstaat en als de bundel van uitstromend water de kust bij Renesse aanvalt. De experts adviseren Rijkswaterstaat, mocht zij het zuidelijke doorlaatmiddel overwegen, speciaal op deze locatie onderzoek te doen naar het voorkomen of beheersen van de kustafslag.
7. Een noordelijk doorlaatmiddel verhindert de noordelijke verplaatsing van de Middelpaat. De groep bevestigt de conclusies uit een eerdere expertsessie dat een strekdam en nu en dan een suppletie nodig zijn om de Middelpaat als recreatiegebied te behouden. Ook bevestigen zij de geringe kans op toename van erosie van de kust van Goeree. Gezien de relatief grote belangen voor kustbeheer en recreatie adviseren de experts, ondanks dat zij onderling weinig verschil van inzicht hebben, om hier gericht aandacht aan te schenken.

Als aanvullende opmerking is ingebracht dat bij de noordelijke inlaat er mogelijk verzanding kan optreden tijdens stormcondities.

3 Analyse grootschalige ontwikkelingen van de Grevelingen(monding)

De inventarisatie van de kennis uit voorgaande studies geeft al veel inzicht in de morfologische vragen die ontstaan na aanleg van een doorlaatmiddel. In de evaluaties komen de ontwikkeling van de Bollen van de Ooster en de ontwikkeling van de Middelpaalt (strand Brouwersdam) als vraagstuk herhaaldelijk terug.

In dit hoofdstuk wordt een samenvatting van de morfologische ontwikkelingen van de Grevelingenmondning gegeven. De basis wordt gevormd door een literatuur analyse (o.a. Elias et al. 2019; Elias, 2015; Van der Spek en Elias, 2020). Deze inzichten worden aangevuld met de meest recente meetdata. Deze recente data geven al een aanvullend inzicht in de werking van de Bollen van de Ooster en Middelpaalt. Daarnaast zijn de recente detailbodems gepresenteerd in 3.6 van belang voor het kiezen van de locaties waar een mogelijke doorlaatmiddel aangebracht kan worden.

3.1 Beschikbare data van bodems en ingrepen

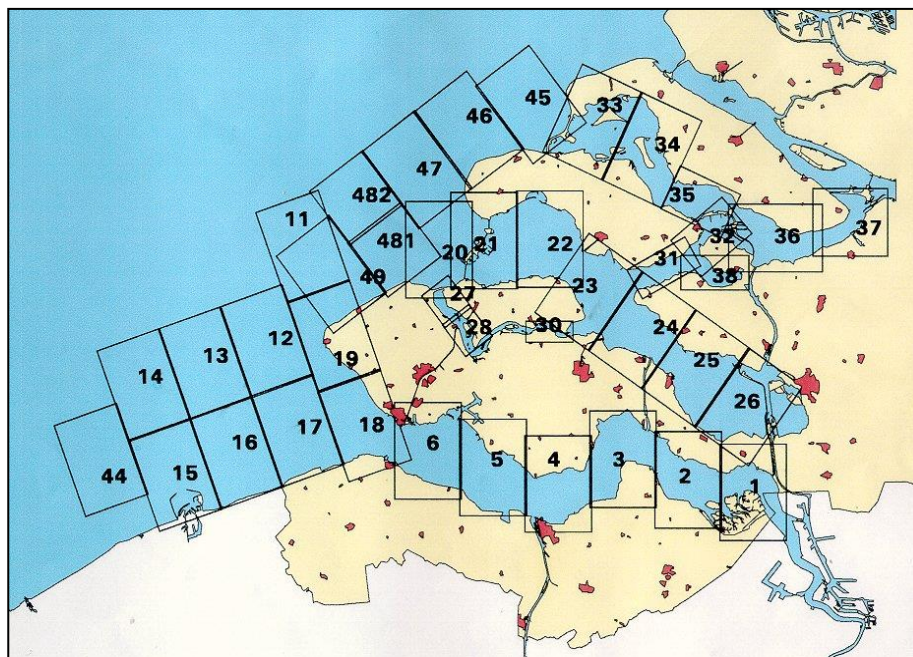
3.1.1 Bodemdata

Er zijn verschillende bronnen voor de bodemdata. De belangrijkste zijn de Jaarlijkse Kustmetingen en de Vaklodingen. Deze twee datasets worden centraal bij Rijkswaterstaat gearcheveerd. De Jaarlijkse Kustmetingen (JarKus) worden al sinds 1964 opgenomen. Deze profielmetingen worden loodrecht op de kust uitgevoerd met een tussenafstand van 200-250 m en een lengte van 800-1200 m vanaf de RijksStrandPalen (RSP-lijn).

De Vaklodingen zijn gebiedsdekkend, beslaan het hele mondingsgebied tot ruwweg de -20 m contour, maar worden minder frequent opgenomen. Vaklodingen worden opgeslagen als 10x12.5 km blokken met 20 m resolutie. Een uitgebreide inventarisatie van de centraal gearcheveerde meetdata is gemaakt door de Kruif (2001). In dit document wordt een overzicht gegeven van alle bodemdata aanwezig bij Rijkswaterstaat in de periode 1925-2000 (met een accent op de periode 1965-2000).

In de Zeeuwse Delta worden de Vaklodingen uitgevoerd door Rijkswaterstaat Dienstonderdeel Zee en Delta (voorheen Directie Zeeland). De data zijn gearcheveerd volgens de originele Zeeuwse opnamegebieden (zie Figuur 3.1) en volgens de landelijke kaartblad Vakloding indeling. Data voor de Grevelingenmondning zijn beschikbaar over de periode 1964-2019. Het opname interval varieert tussen de 1 en 6 jaar. In totaal zijn er voor de monding 18 gebiedsdekkende bodemkaarten te construeren (Appendix A, Figuur A-1 en A-2). Voor 8 van deze kaarten is ook het Grevelingen meer/estuarium gemeten (Appendix A, Figuur A-3, A-4 en A-5). De bodemdata zijn gearcheveerd bij Rijkswaterstaat en op te vragen bij de Helpdesk Water van Rijkswaterstaat. De bodemdata zijn ook beschikbaar via het OpenEarth initiatief (<http://openearth.deltares.nl>) in de repository:

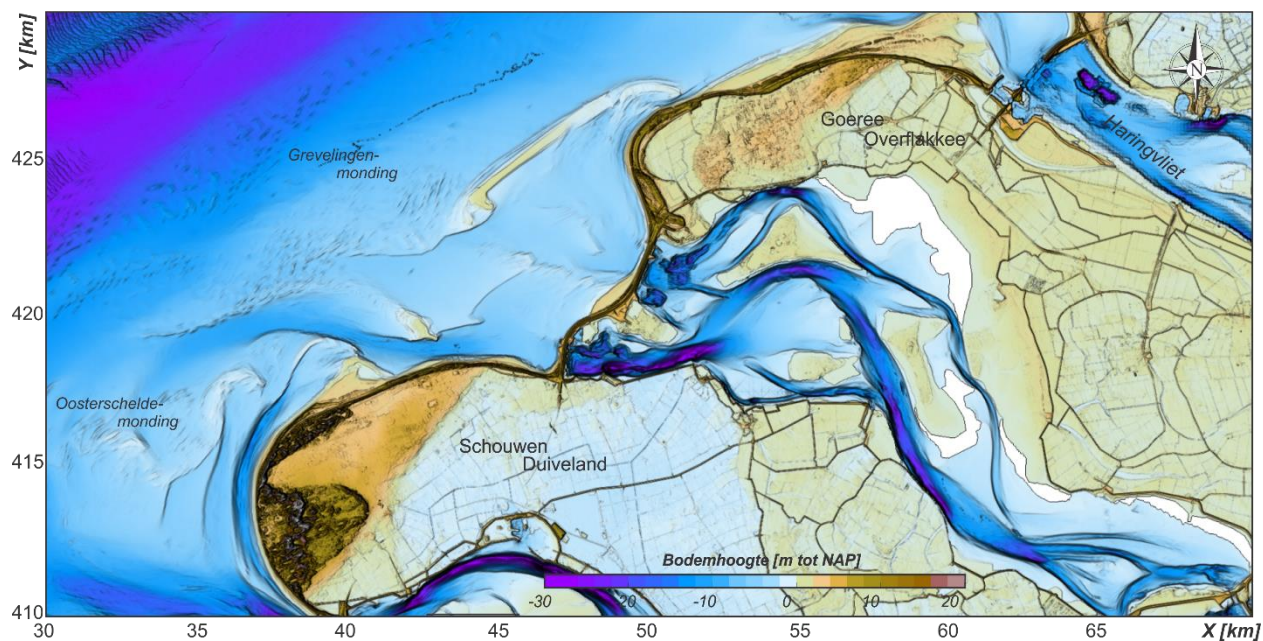
<http://opendap.deltares.nl/thredds/dodsC/opendap/rijkswaterstaat/vaklodingen/catalog.html>
<http://kml.deltares.nl/kml/rijkswaterstaat/vaklodingen.kml>.



Figuur 3.1: De lodingsvakken van Directie Zeeland. De Zeeuwsche delta bevat de mondingsgebieden van de Westerschelde, Oosterschelde en Grevelingen. Het Haringvliet behoort bij de provincie Zuid-Holland.

Tabel 3.1: Een overzicht van de beschikbare Vaklodingen bodems

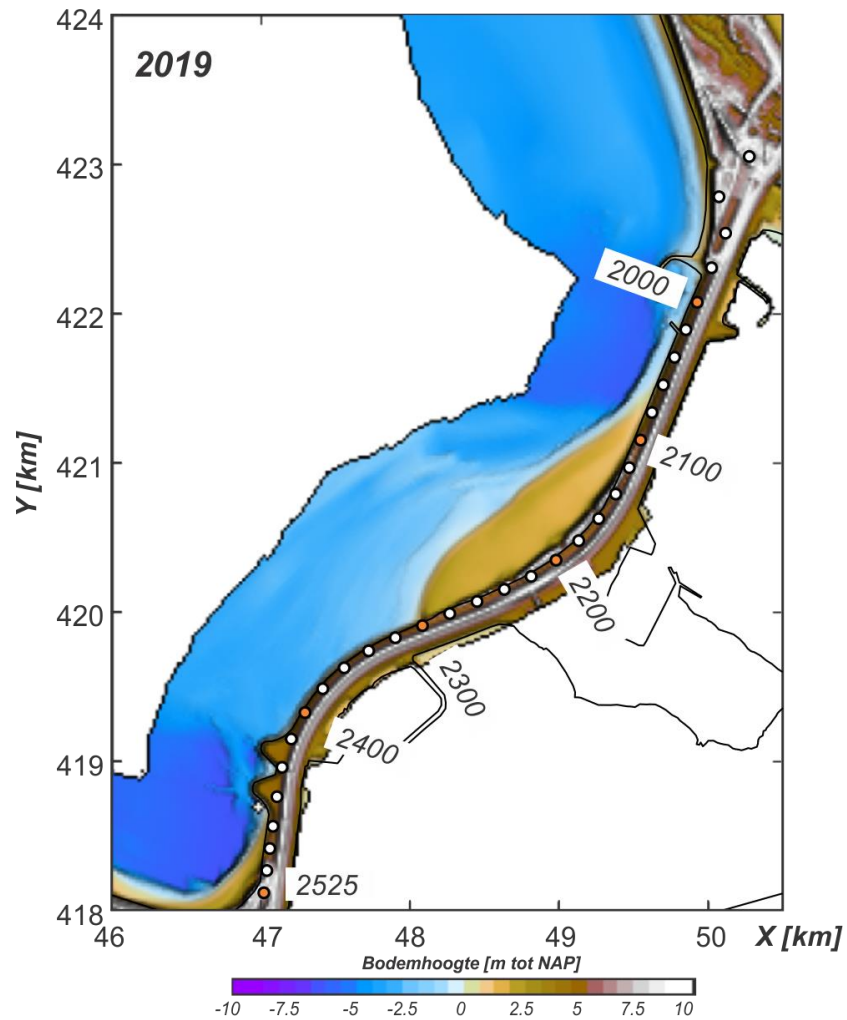
Representatief Jaar	Monding	Estuarium – Meer	Representatief Jaar	Monding	Estuarium – Meer
1964	1964	1963	1998	1998	-
1968	1968	1968	1999	1999,1998	-
1972	1972	1970	2000	2000	-
1976	1976	1975	2004	2004	2004
1980	1980	-	2006	2006,2007	2006
1984	1984	-		2004,2010*	-
1988	1988,1989	-	2010	2010,2009	-
1989	1989,1988	-	2013	2013	2014
1991	1991,1992	1991	2019	2018, 2019	-
1996	1996,1995, 1997	-			



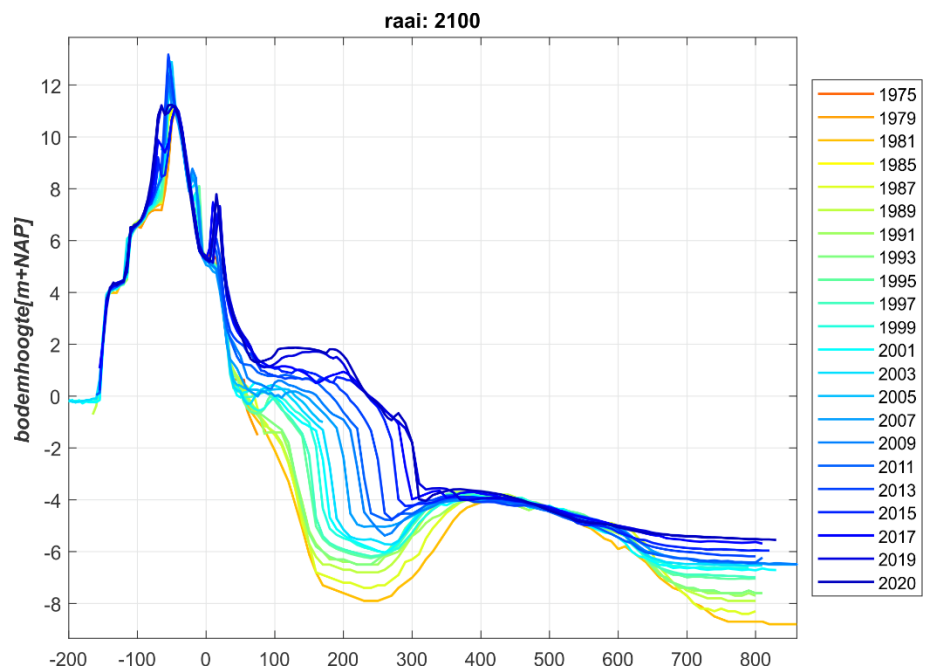
Figuur 3.2: Een voorbeeld bodemkaart gebaseerd op de 2019 opname in de monding, gecombineerd met de 2014 metingen van het Grevelingen meer. De omliggende eilanden zijn ingevuld met het AHN hoogtebestand. Alle hoogtes zijn relatief t.o.v. NAP.

Naast de gebiedsdekkende Vaklodingen worden ook jaarlijks metingen uitgevoerd van de kustzone, de zogenaamde Jarkus metingen. Deze metingen worden uitgevoerd op specifieke raaien die loodrecht op de kust staan. Deze raaien hebben een tussenafstand van ongeveer 200-250 m en een lengte van 800-1200 m vanaf de RijksStrandPalen (RSP-lijn). In totaal bestaat de Nederlandse kust uit 2000 raaien. De raaien worden sinds 1964 jaarlijks ingemeten vandaar de naam JarKus (Jaarlijkse Kust) metingen. Het natte deel van de JarKus raai (en ook de Vaklodingen) wordt met een single-beam echo-sounder (zelfregistrerend echolood) opgenomen. Het droge deel van het strand en de droge delen van de Waddenzee worden sinds 1996 vanuit een vliegtuig met laseraltimetrie (Lidar) ingewonnen.

De JARKUS metingen worden opgeslagen als raaien, maar ook als grid met 20 m rasterresolutie. Als voorbeeld wordt in Figuur 3.3 de vergridde JarKus data getoond aan de zeezijde van de Brouwersdam voor het jaar 2019. In deze figuur worden de locaties van de jarkus profielen (dwarsraaien) aangegeven met de bolletjes. De Jarkus raaien met nummering 1925 tot en met 2525 liggen langs de Brouwersdam.

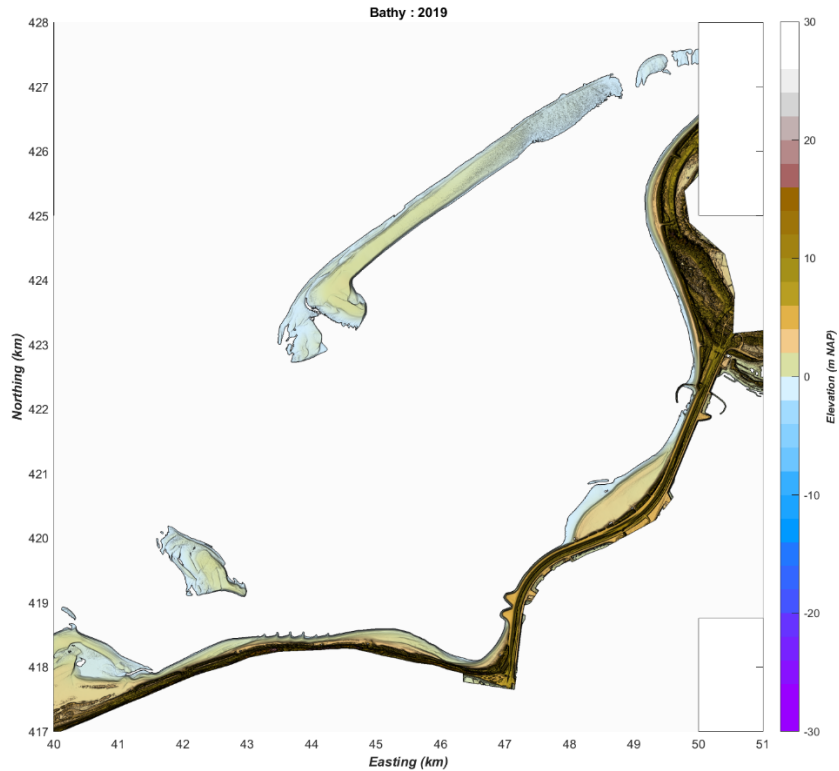


Figuur 3.3: Een overzicht van de dekking van de meest recente (vergriddde) JarKus data voor het jaar 2019.



Figuur 3.4: Bodemontwikkeling van Jarkus raai 2100, gelegen aan de noordzijde van de Brouwersdam. In deze figuur is het opvullen van de voorliggende geul en het uitbouwen van de kust duidelijk zichtbaar.

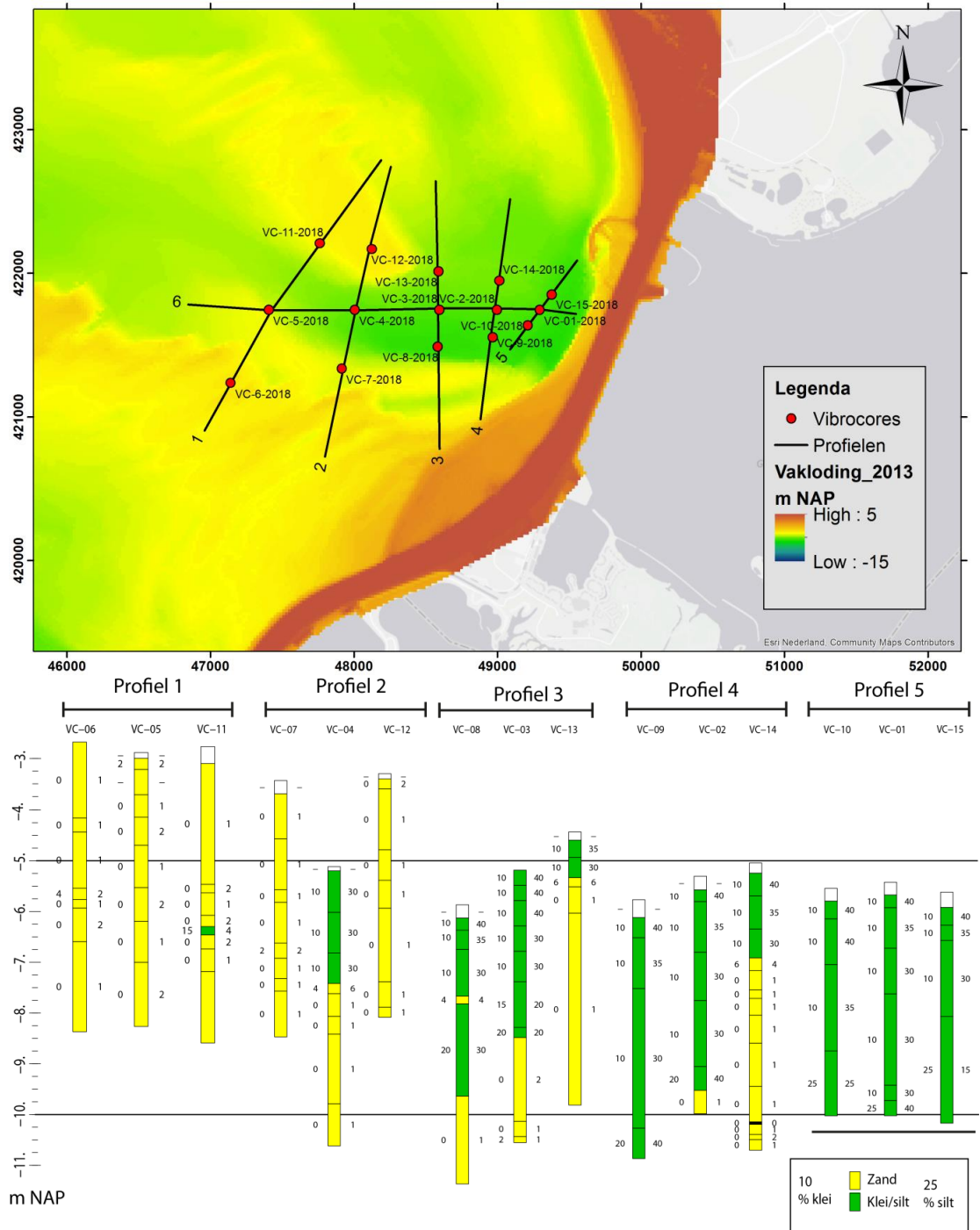
Als onderdeel van de JarKus metingen, worden de hoogtewaarnemingen van het strand en de duinen sinds 1996 opgenomen met een laserscanner (LIDAR) aan boord van een vliegtuig. Na analyse van de resultaten wordt een Digitaal Terrein Model (DTM) verkregen. Het DTM wordt verwerkt in de JarKus metingen maar wordt ook in 5 m rasterresolutie gearchiveerd. Deze bodemdata lijken met name geschikt voor detailanalyses van grote droogvallende platen of banken (zoals de Bollen van de Ooster). Nabij de Brouwersdam is informatie beperkt doordat hier weinig droog strand aanwezig is.



Figuur 3.5: Een voorbeeld bodemkaart gebaseerd op de 2019 LIDAR dataset.

3.1.2 Sedimentsamenstelling

Vroom et al. (2018) geeft een overzicht van de sedimenteigenschappen van 15 boorkernen gestoken in de voormalige geul Springersdiep. Deze analyse laat zien dat de opvulling van het Springersdiep voor een groot deel bestaat uit een klei/silt eenheid (opvulling van de oude getijgeul) en hieronder een zandeenheid (substratum van de oude getijgeul en van de huidige zandgolven). Het zandpakket bestaat uit fijn tot matig grof zand ($D_{50}=110-320$ micron), vaak met silt- en kleilagen en met veel schelpen/schelpgruis.



Figuur 3.6: (onder) Lithologische beschrijving en percentage van klei en silt in de vibrocores. De zwarte lijn markeert de grens tussen de onderste zandige eenheid en de bovenste kleiige eenheid. Ligging van de profielen is weergegeven in de bovenste deelfiguur uit Vroom et al. (2018).

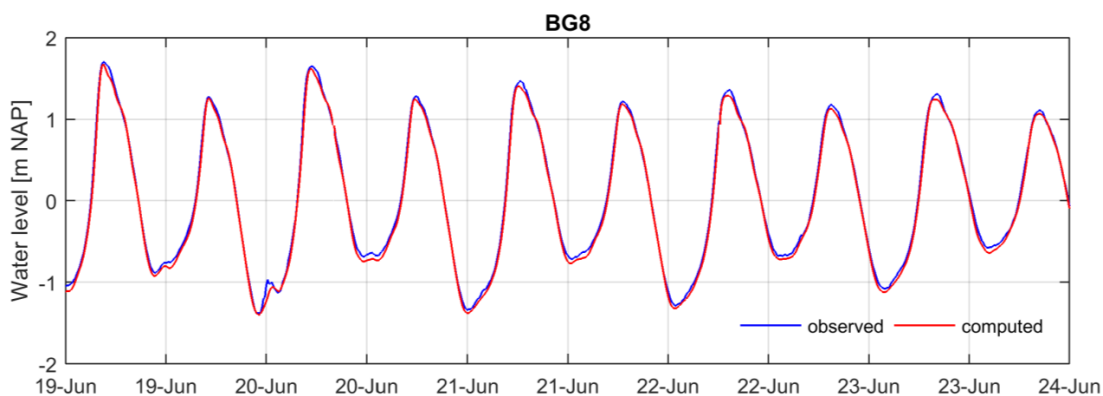
3.1.3 Hydrodynamica

Waterstanden

Figuur 3.7 geeft een overzicht van de getijmeetstations nabij de Grevelingenmondning. Alleen de stations Brouwershavensche Gat 02 en 08 liggen direct in de monding. Naast deze twee station liggen er nog de meetstations Oosterschelde 13 en 14 aan de zuidkant en de stations Lichteiland Goeree en Haringvliet 10 ten noorden. Meetstation Brouwershavensche Gat 08 is door de Boom (2016) gebruikt in de modelvalidatie. Een tijdserie van de gemeten en berekende waterstanden is weergegeven in Figuur 3.8.



Figuur 3.7: Een overzicht van de getijmeetstations in de buurt van de Grevelingenmondning.



Figuur 3.8: Gemeten en berekende waterstanden in meetstations Brouwershavensche Gat 08, uit De Boom (2016).

De getijbeweging langs de Nederlandse kust en dus ook bij de Grevelingenmondning wordt bepaald door het Noordzee getij. Door de vorm van de Noordzee loopt de getijgolf van zuid naar noord langs de Nederlandse kust. Tijdens de vloed stroomt het water in noordelijke richting en tijdens eb stroomt het water in zuidelijke richting, omdat de waterverplaatsing tijdens de vloed is iets groter is dan tijdens eb wordt een netto noordwaartse reststroom gegenereerd. Het gemiddelde getijverschil neemt in noordelijke richting af. Nabij Vlissingen is het getijverschil zo'n 3.86 m bij Vlissingen, in de Grevelingen monding ligt dit gemiddeld op 2.5 m en dit neemt

dan af tot 1.74 m bij Hoek van Holland. Figuur 3.8 geeft een voorbeeld van de gemeten waterstand in het meetstation Brouwershavensche Gat (19-24 Juni 2007). Dit getij is ook representatief voor de huidige situatie, omdat de basis ontstaat door de rotatie van de aarde en de aantrekkingskracht van de maan en deze kunnen worden beschreven door astronomische componenten (met amplitude, frequentie en fase). Deze componenten zijn in 2007 en 2019 niet anders.

Een aantal componenten zijn dominant in de waterbeweging. Ten eerste de M2 en M4 componenten met perioden van respectievelijk 12 uur en 25 minuten en 6 uur 12 minuten. Daarnaast zijn twee opeenvolgende getijden zijn niet gelijk. Dit verschijnsel noemen we dagelijkse ongelijkheid en wordt vooral veroorzaakt door de O1 en K1 componenten. Ook is er een springtij – doottij cyclus van ongeveer 14 dagen. Dit wordt veroorzaakt door een fase verschuiving tussen de M2 en S2 component.

Deltares (2020) heeft met het 2D Dutch Continental Shelf Model (DCSM FM 100m) onderzocht hoe het getij langs de Nederlandse kust verandert bij zeespiegelstijging tot 2 m. Het onderzoek concludeert dat de maximale waterstanden tot 5% meer stijgen en de minimale waterstanden tot 5% minder stijgen dan op basis van de zeespiegelstijging alleen verwacht kan worden. De getijslag neemt dus iets toe. Bij de ontwerpeis tot 40 cm zeespiegelstijging is het effect derhalve circa -2/+2 cm.

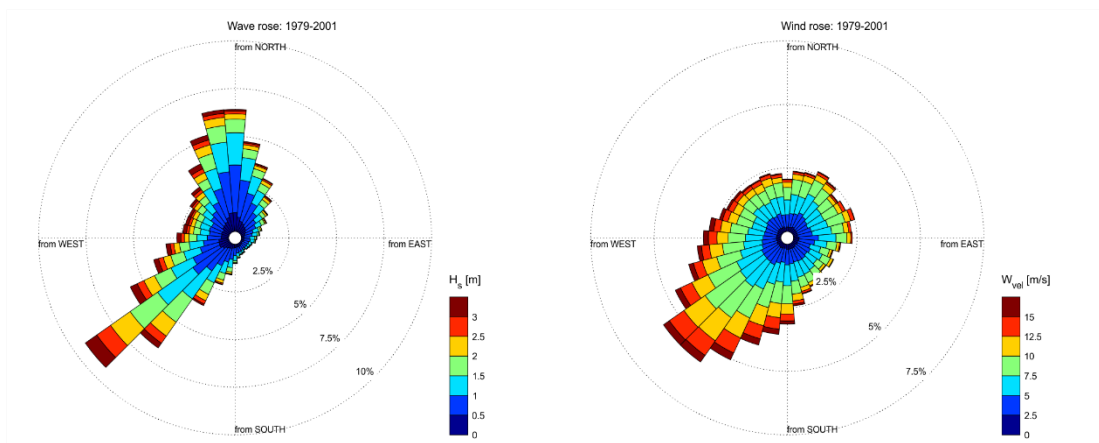
Golven

Golfdata representatief voor de Brouwersdam is beschikbaar in een viertal locaties (Figuur 3.9). De Schouwenbank en Brouwershavensche Gat 02 locaties zijn onderdeel van het ZEGE (Zeeuwse Getijdenwateren) meetnetwerk en liggen direct voor de monding. Het station Europlatform en Lichteiland Goeree zijn beide onderdeel van het MNZ (Meetnet Noordzee).

Het golfklimaat wordt overheerst door 2 golfrichtingen, Zuidwest en Noord-noordwest (Figuur 3.10). Het windklimaat wordt duidelijk gedomineerd door de zuidelijke richtingen. Het verschil tussen het golf- en windklimaat komt mede door de vorm van de Noordzee. De strijklengte voor wind uit het noorden is veel groter dan die voor het zuiden, waardoor veel grotere golven gegenereerd worden.



Figuur 3.9: Overzicht van de locaties van de golfboeien



Figuur 3.10: Een overzicht van het overheersende golf- (links) en windklimaat (rechts) op basis van de metingen van het Europlatform (1979-2001).

3.1.4 Een overzicht van ingrepen

Aanleg van de Brouwersdam

De Brouwersdam vormt onderdeel van het Delta Plan en is hierin het zevende bouwwerk. Met de bouw van de Brouwersdam is direct na sluiting van de Grevelingendam begonnen. De Grevelingendam werd in 1965 voltooid. Een probleem was dat het Grevelingenestuarium nog in verbinding stond met de Noordzee. Hierdoor konden stormvloedgolven hoog oplopen. Aanleg van de Brouwersdam was essentieel om dit te voorkomen.

De aanleg van de Brouwersdam begon in 1964 met het ophogen van de Middelplaat en Kabellaarsbank. Na aanleg begon de afsluiting van de geulen Springersdiep en Brouwershavensche Gat. Springersdiep werd afgesloten door middel van het afzinken van caissons op een drempel van gestort steen. Het Brouwershavensche Gat werd afgesloten door deze met betonnen blokken dicht te storten. In 1971 was de 6.5 km lange Brouwersdam dan voltooid en werd het Grevelingen estuarium volledig van de Noordzee afgesloten. Dat de aanleg van de Brouwersdam de omliggende natuur beïnvloedde was snel duidelijk. Om natuur in het brakke water van het Grevelingen meer te herstellen werd al snel een doorlaat aangelegd, de Brouwerssluis, die in 1978 werd geopend.



Figuur 3.11: Afsluiting van het Brouwershavensche Gat door het storten van betonblokken (https://beeldbank.rws.nl, Rijkswaterstaat / Afdeling Multimedia Rijkswaterstaat

Zandsuppleties

Alleen aan de zuidzijde van de Brouwersdam, langs de kust van Schouwen worden met regelmaat suppleties uitgevoerd (Tabel 3.2). Tussen de voet van de Brouwersdam en Renesse is sinds 1990 bijna 4 miljoen m³ aan zand toegevoegd. Het opvullen van de naastliggende geul Brouwershavensche Gat gaat gepaard met een zandverlies van het aangrenzende strand. Door de smalle strandzone resulteert dit al snel tot erosie van de duinenrij. Deze duinenrij is smal.

Naast de reguliere kustlijnsuppleties is er eenmalig, in 2015, een suppletie uitgevoerd op het strand Brouwersdam. Deze suppletie had vooral als doel de afkalving van het strand tegen te gaan en zo het recreatiestrand te behouden (economisch belang). De suppletie van de 500.000 m³ is door Rijkswaterstaat geregistreerd en heeft als doel de functionaliteit van het activiteitenstrand tot minimaal 2020 garanderen.

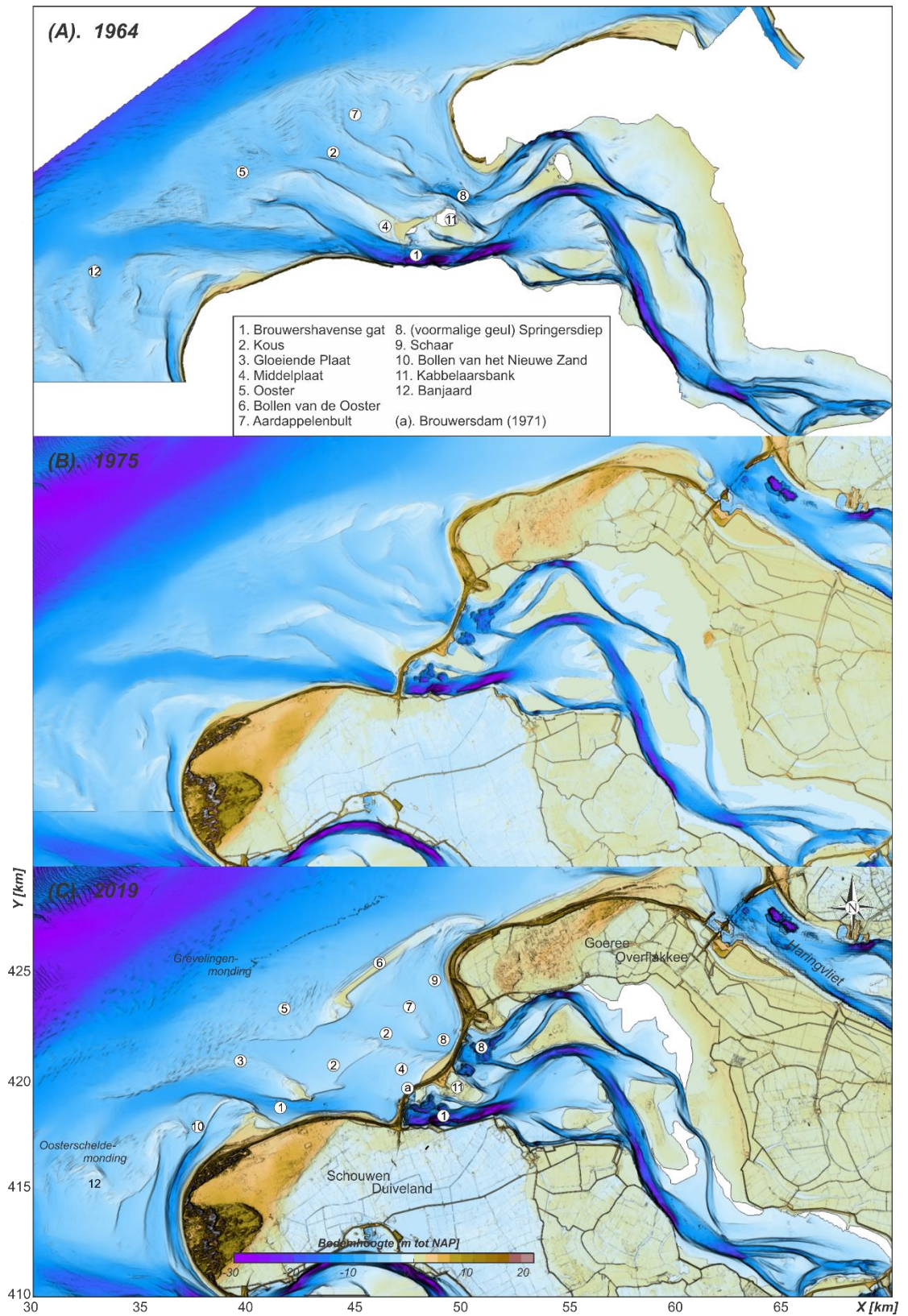
Tabel 3.2: Overzicht suppleties uitgevoerd op Schouwen Noorderstrand en nabij Renesse in het kader van kustlijn zorg.

Locatie	Start Datum	Begin raai	Eind raai	Type	Volume (situ) [10 ³ m ³]
Noorderstrand	1990	0.84	3.19	duinverzwaring	15,000
Noorderstrand	1990	0.84	3.19	duinverzwaring	415,000
Noorderstrand	1994	1.59	1.90	strandsuppletie	40,000
Noorderstrand	1994	2.59	2.93	strandsuppletie	49,000
Renesse	1995	3.67	6.43	strandsuppletie	818,000
Noorderstrand	1999	0.95	6.42	strandsuppletie	560,000
Renesse-I	2003	1.16	2.10	strandsuppletie	61,912
Renesse-II	2003	3.27	4.77	strandsuppletie	201,847
Renesse-oost	2007	1.06	1.97	strandsuppletie	161,689
Renesse	2007	3.77	4.69	strandsuppletie	169,643
Renesse					
Noorderstrand	2011	1.06	4.69	strandsuppletie	592,299
Renesse	2016	3.19	4.69	strandsuppletie	246,750
Renesse	2019	1.06	1.48	strandsuppletie	81,500
Renesse	2019	3.19	4.69	strandsuppletie	418,660
				Totaal	3,831,300

3.2 Een overzicht van de geulen en platen

Een representatief overzicht van de morfologie van de Grevelingenmonding en het Grevelingenmeer wordt gegeven in Figuur 3.12C. De Grevelingenmonding ligt ingeklemd tussen de eilandkoppen van Goeree en Schouwen. De ontwikkelingen van de Grevelingenmonding en de naastliggende Haringvlietmonding vertonen grote overeenkomsten. Beide gebieden zijn veranderd van een actieve naar een passieve buitendelta; een ondiep platen-geulen gebied waar sediment (landwaarts) wordt herverdeeld. Het Haringvliet loopt wat voor in de ontwikkeling en kan daardoor een goede indicatie geven van de toekomstige ontwikkeling van de Grevelingenmonding (Van der Spek en Elias, 2020).

Het noordelijke gedeelte van de Grevelingenmonding wordt gedomineerd door ondiepe plaatgebieden (Middelplaat, Kabellaarsbank en Aardappelenbult) die ingeklemd liggen tussen de Brouwersdam, Goeree en De Bollen van de Ooster. De Bollen van de Ooster heeft zich na afsluiting van het Grevelingen estuarium in 1971 ontwikkeld tot een hoge, langgerekte plaat (of spit) met een zuidwest-noordoost oriëntatie. Ingeklemd tussen deze plaat en de kust van Goeree ligt een kleine geul Schaar. Deze geul is in de huidige bodem nauwelijks nog te onderscheiden. De voormalige hoofdgeul Kous / Springersdiep is vrijwel geheel opgevuld met sediment. Alleen in het zuiden, langs de kust van Schouwen, is er nog een diepere getijgeul: het Brouwershavensche Gat aanwezig. Het Brouwershavensche Gat is vooral langs de kust van Schouwen en nabij de Brouwersdam opgevuld met sediment. Het zeevaartse gedeelte van de geul vertoont een kromming door het opdringen, noordwaarts uitbouwen, van het platengebied Bollen van het Nieuwe Zand. Aan de noordzijde wordt de geul begrensd door de Gloeiende Plaat. Het Brouwershavensche Gat heeft een zuidelijke uitstroom gekregen de Banjaard op en op de Banjaard heeft zich voor de geul een duidelijk eb-schild gevormd.



Figuur 3.12: Ligging van de belangrijkste geulen en platen in de Grevelingenmondning vóór afsluiting (A), direct ná afsluiting (B) en representatief voor de huidige situatie (C).

3.3 Morfologische veranderingen in de monding

Voor afsluiting zijn de platen en geulen in de Grevelingen gevormd als een dynamisch evenwicht tussen de uitbouwende kracht van de getijstroming in en uit het estuarium en de landwaartse, golfgedreven stroming en sedimenttransporten. Na afsluiting van het estuarium in 1971 is de kustdwarse (estuarium-gedreven) getijstroming bekken gestopt. Het afsluiten van het estuarium betekent eigenlijk dat het gebied zijn status als buitendelta verliest. Op de buitendelta overheersen nu de golfgedreven transporten. Er is nog wel getijstroming aanwezig maar deze wordt bepaald door het Noordzeegetij en niet door het estuarium. Het Noordzeegetij veroorzaakt een rondstroming door de oude getijdgeulen heen (van der Spek, 1987). Het water stroomt de monding in via het Brouwershavensche gat en stroomt uit via de Schaar, en vice versa na kentering. Deze rondstroming is veel minder efficiënt dan het oorspronkelijke estuarium-gedreven stroming. De balans tussen getij- versus golfgedreven transporten is hierdoor verstoord. De golfgedreven transporten overheersen. Grootschalige (landwaartse) verplaatsing van de platen en het opvullen van de oorspronkelijke geulen is daarom te verwachten en ook opgetreden (Figuur 3.12 tot en met Figuur 3.15).

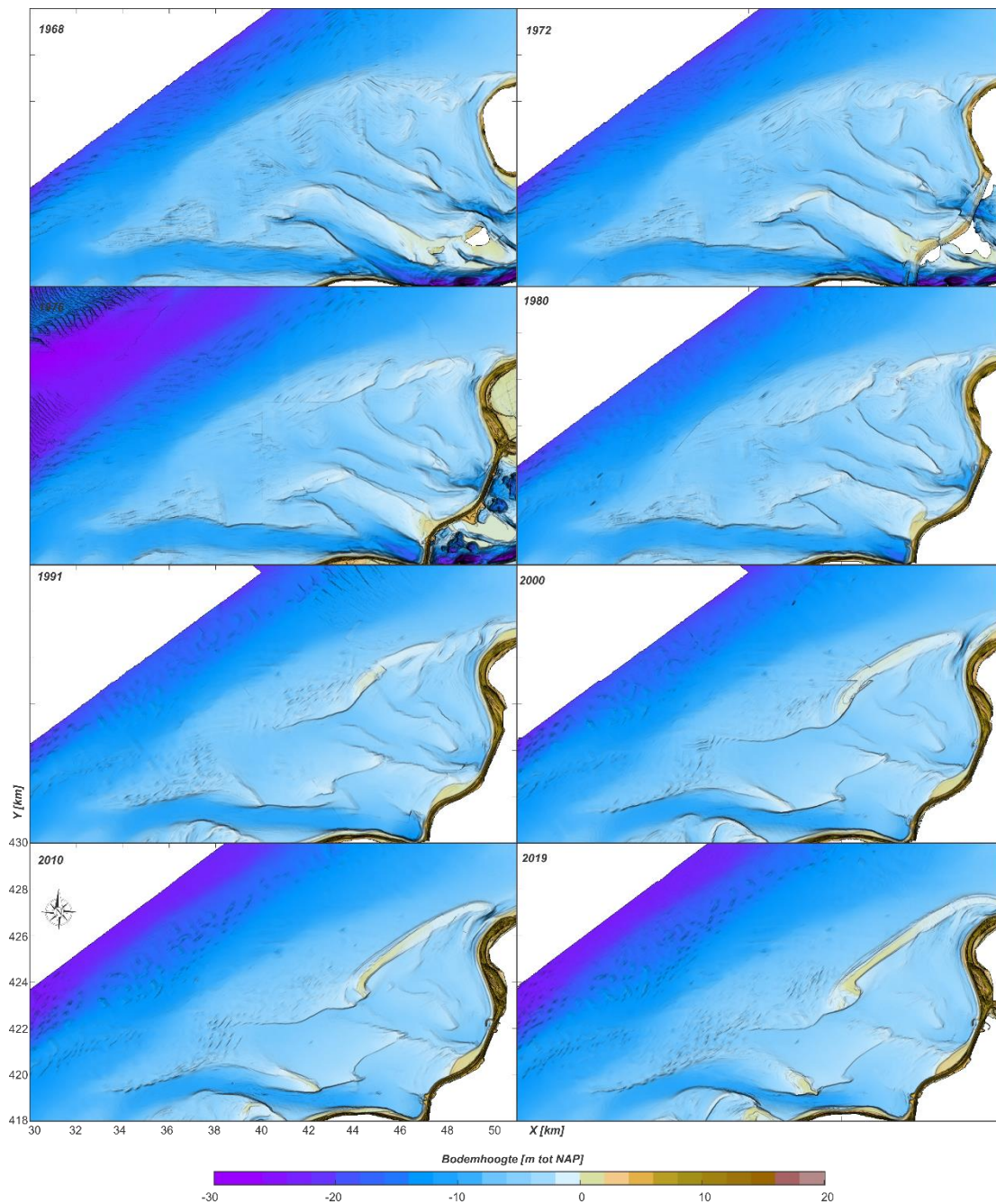
Een beschrijving van de ontwikkelingen van de buitendelta vóór afsluiting van de Grevelingen (over de periode 1933-1959) wordt gepresenteerd door Van der Spek (1987); "Gedurende deze periode neemt het getijvolume van de Grevelingen af, ten gunste van het getijvolume van de Oosterschelde, waardoor het dwarsoppervlak van de beide geulen Brouwershavensche Gat en Springersdiep geleidelijk vermindert. De geulen worden smaller en ondieper, het bankengebied tussen de geulen wordt steeds breder. De Middelpaats en de Kabbelaarsbank verschuiven in de richting van de Hompelvoet. De geul Brouwershavensche Gat verplaatst zich in de richting van de oever van Schouwen, waardoor een zeer steil talud ontstaat. Door de reductie van het getijvolume zal ook de omvang van de buitendelta minder geworden zijn. Zeewaarts van de toekomstige Brouwerdam schuiven de geulen in de periode 1961-1965 ongeveer 100m naar het noordoosten en neemt de hoogte van de platen af."

Een gedetailleerd beeld van de ontwikkeling van de Grevelingen monding sinds 1968 wordt weergegeven in Figuur 3.14. De 1968 bodem geeft een beeld van de monding net voor afsluiting van het estuarium. Geheel representatief voor de natuurlijke situatie is deze bodem echter niet. In 1964 is het landwaartse deel van de Grevelingen estuarium al afgesloten door de Grevelingendam, waardoor de waterbeweging al beïnvloed is. Dit resulteert al in een morfologische aanpassing van de monding (Figuur 3.15A). De geobserveerde morfologische veranderingen zijn echter nog beperkt in vergelijking met de morfologische aanpassing na de voltooiing van de Brouwersdam in 1971. De Brouwersdam sloot het estuarium volledig af van de buitendelta en grootschalige veranderingen hebben plaatsgevonden. Vooral de voormalige plaat Ooster erodeert sterk aan de noordwestzijde (Figuur 3.15B). Het sediment wordt landwaarts verplaatst waardoor een langgerekte, ondiepe bank (Bollen van de Ooster) met zuid-noord oriëntatie vormt (Figuur 3.14). De vorming van deze bank is duidelijk te volgen in de dwarsprofielen weergegeven in Appendix A, Figuur A- 6 en Figuur A- 7). Het heeft tot 1999 geduurd voor een vrijwel continue, vrijwel rechte ondoorbroken bank werd gevormd. Deze bank was in 1999 nog breed (zo'n 500 m). Sindsdien is de hoogte verder toegenomen maar is de breedte afgenomen. In totaal is het zandvolume aan de zeezijde van de Ooster met -63 miljoen m³ in sediment afgenomen in de periode 1964-2010 (Elias en van der Spek, 2016; zie Appendix A, Figuur A- 8). Elias en van der Spek laten ook zien dat een deel van het ge-erodeerde sediment heeft bijgedragen aan de vorming van de Bollen van de Ooster (13 miljoen m³) en het invullen van het landwaartse deel van Ooster (25 miljoen m³). Het geul-plaat gebied (Aardappelenbult) ingeklemd tussen de Bollen van de Ooster en de Brouwersdam vult op en vlakt uit. Dit gaat gepaard met een netto sedimentatie van 8 miljoen m³. In de geulen, zoals Kous en het afgesloten Springersdiep, is de sedimentatie echter aanzienlijk groter (+18 miljoen m³), dit komt omdat een gedeelte van het sediment geleverd wordt door de naast- en tussengelegen platen (-10 miljoen m³).

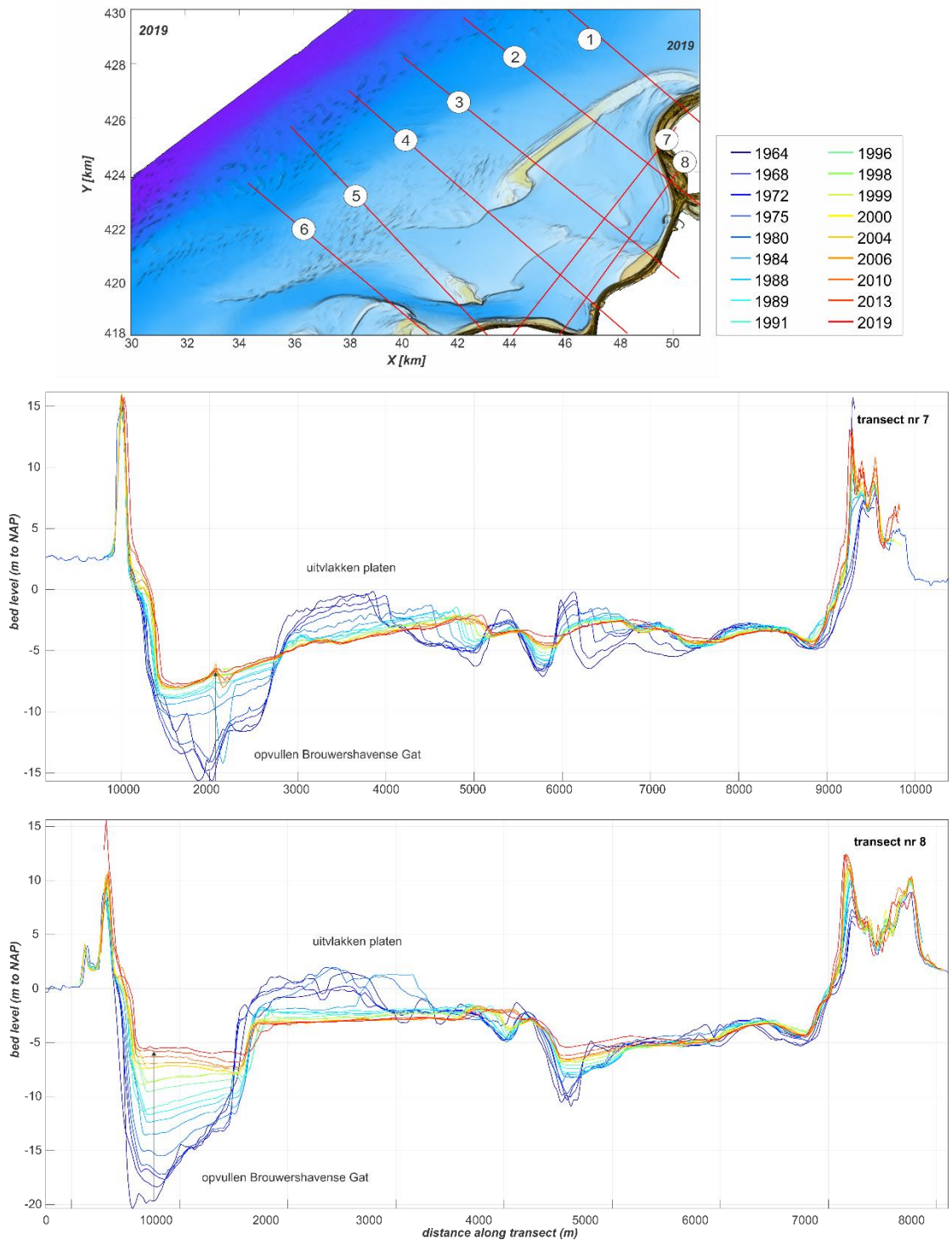
Ook in het zuidelijke gedeelte van de monding treden grote veranderingen op. Het Brouwershavensche Gat blijft hier, ook in de 2019 bodem, echter wel duidelijk als geul zichtbaar. Het voorliggende deel van de buitendelta vertoont ook hier een landwaartse verplaatsing. Een grote verandering treedt op rond een voormalige ebschaar van het Brouwershavensche Gat en de aangrenzende Middelplaat. Het voormalige ebschild dat rond en voor deze ebschaar aanwezig is wordt landwaarts verplaatst en de ebschaar vult volledig op met sediment. De verplaatsing van dit ebschild en het landwaarts opschuiven van de Ooster, is in dwarsprofiel 5 en 6 (Appendix A, Figuur A- 7) goed te volgen. Profiel 5 geeft ook een interessant beeld van de opgetreden verandering in het Brouwershavensche Gat. De opvulling van het diepe gedeelte van de geul vindt vooral plaats in de periode 1964-1998. Sinds 1998 blijft de bodem hier rond de -10 m liggen, wel bouwt de zeewaarts gelegen bank (Gloeierende Plaat) sterk landwaarts uit waardoor het geulvolume verkleint. Het Brouwershavensche Gat staat verder onder druk bij de Kop van Schouwen, waar de groei en noordwaartse verplaatsing van de Bollen van het Nieuwe Zand het Brouwershavensche Gat vanuit het zuiden wegdrukt. Het Brouwershavensche Gat krijgt hierdoor een kromming om de bollen van het Nieuwe Zand heen. Deze kromming draagt dan waarschijnlijk weer bij aan het zuidelijker worden van de uitstroom de Banjaard op. Zoals al eerder geobserveerd wordt op de Banjaard een duidelijk ebschild gevormd. Langs de noordzijde wordt het Brouwershavensche Gat verder begrensd door een langgerekte bank (Gloeierende Plaat).

De twee langsprofielen (raai 7 en 8) weergegeven in Figuur 3.14 geven een beeld van de morfologische ontwikkelingen direct voor de Brouwersdam. Beide profielen bevatten gelijke kenmerken. De grootste bodemverandering vindt plaats in het Brouwershavensche Gat. De geul blijft behouden, maar de bodemhoogte direct voor de dam is met bijna 15 m toegenomen (raai 8). Verder zeewaarts vindt ook geulopvulling plaats maar is de verandering wel kleiner (raai 7). Naast geulopvulling is ook duidelijk het uitvlakken van de banken/platen te onderscheiden. Bankopbouw vindt wel plaats bij de Bollen van de Ooster, maar niet in het afgeschermd gebied landwaarts hiervan. Hier kunnen de banken niet behouden worden en de afgesloten geulen vormen een efficiënte bezinkput voor het sediment. De grootste veranderingen traden hier in de periode tot ongeveer 1980 op. Sindsdien zijn de veranderingen wel doorgaand, maar veel kleiner.

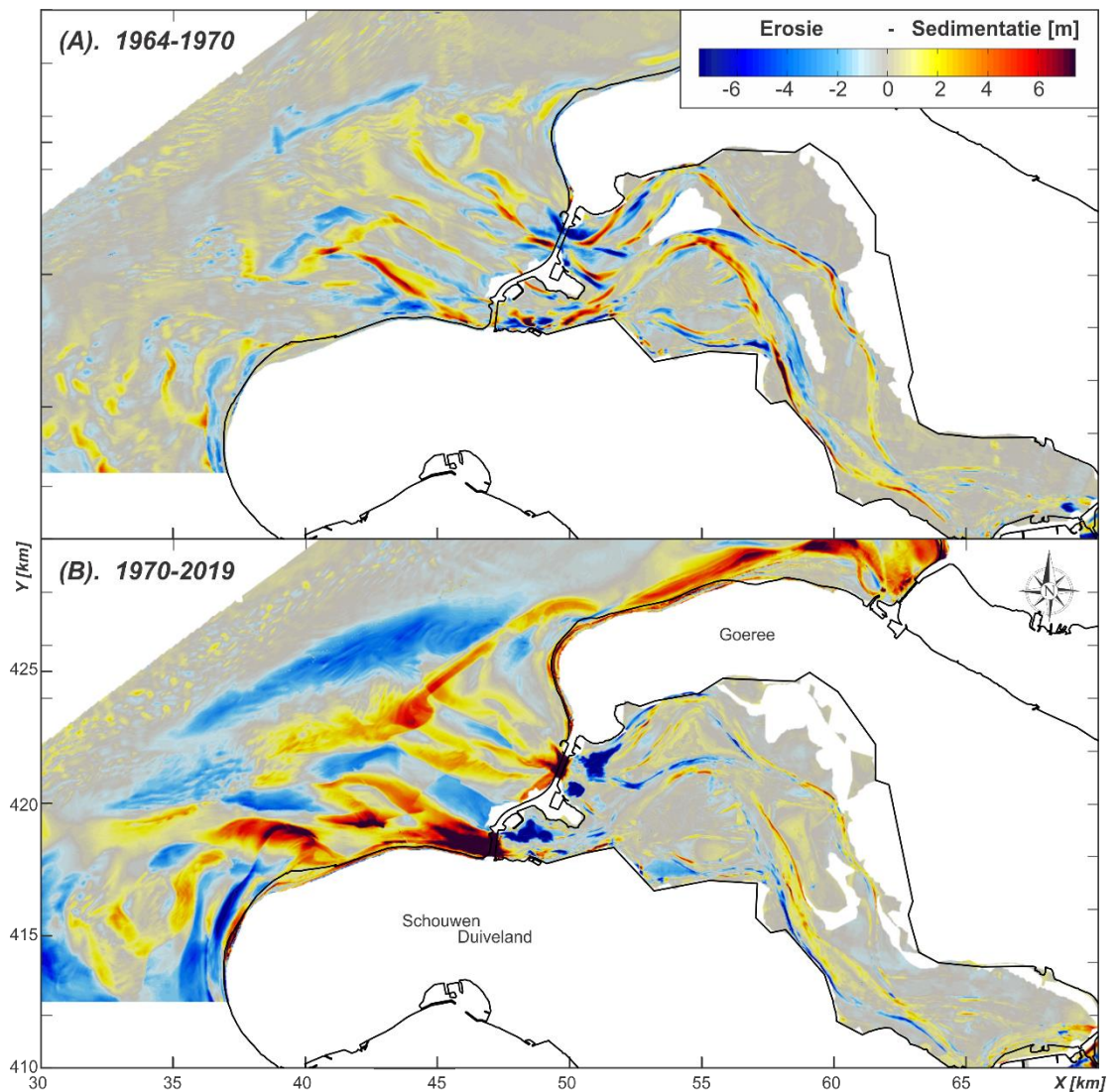
Elias en van der Spek (2015) concluderen verder dat er in de monding grote morfologische veranderingen optreden, maar dat de totale netto volumeverandering eerder beperkt is. In de periode 1964-2010 neemt het sediment volume toe met 51 miljoen m³. Een deel van deze sedimentatie (28 miljoen m³) aan de zuidkant van het Brouwershavensche Gat. Als we dit in meer detail beschouwen zien we dat het buitendelta front 89 miljoen m³ aan sediment verliest [15, 2]. De Bollen van de Ooster nemen met 38 miljoen m³ toe. De afgesloten geul Springersdiep en de Kous zijn opgevuld met sediment. Opvullen van het Springersdiep en de vorming van de Aardappelenbult heeft tot een volumetoename van 8 miljoen m³ geleid. Het opvullen van Kous (pol. 17,18) heeft geresulteerd in een volumetoename van 9 miljoen m³. In het landwaartse deel van het Brouwershavensche Gat grenzend aan de kust van Schouwen (pol. 11 – 9-13) is veel sediment afgezet (50 miljoen m³). Een significant gedeelte van dit sediment is afkomstig van het aangrenzende bankengebied. De Middelplaat verliest -21 miljoen m³ sediment.



Figuur 3.13: Overzicht van de veranderingen in bodemligging van de Grevelingenmonding over de periode 1970-2019.



Figuur 3.14: Overzicht van de veranderingen in bodemligging van de Grevelingenmond over de periode 1964-2010 door middel van representatieve profielen. In Appendix A, Figuur A- 6 en Figuur A- 7 worden doorsneden voor raaien 1 tot en met 6 getoond.



Figuur 3.15: Veranderingen in bodemligging vóór (boven) en ná (onder) afsluiting van de Grevelingen. Zie Appendix A, Figuur A- 8 voor een kwantificering van de veranderingen over de periode 1964-2010.

In Figuur 3.15 is ook de respons van het Grevelingenmeer op de afsluiting zichtbaar. Voor de afsluiting is er vooral geulverplaatsing te zien (Figuur 3.15, boven). Dit resulteert in aansluitende banen van sedimentatie (geel-rood) en erosie (blauw). Na afsluiting vindt er vooral erosie plaats langs de plaatranden. Dit materiaal bezinkt dan in de aangrenzende geulen (Figuur 3.15, onder).

Wat in deze figuur ook opvalt is de zeer grote erosievakken vlak naast de dam. Lokaal ligt hier de bodem in 2019 meer dan 8 m lager dan in 1970. Deze vakken zijn waarschijnlijk ontstaan tijdens de aanleg van de dam. Al in de 1975 bodem zijn ze aanwezig (Appendix A, Figuur A-4).

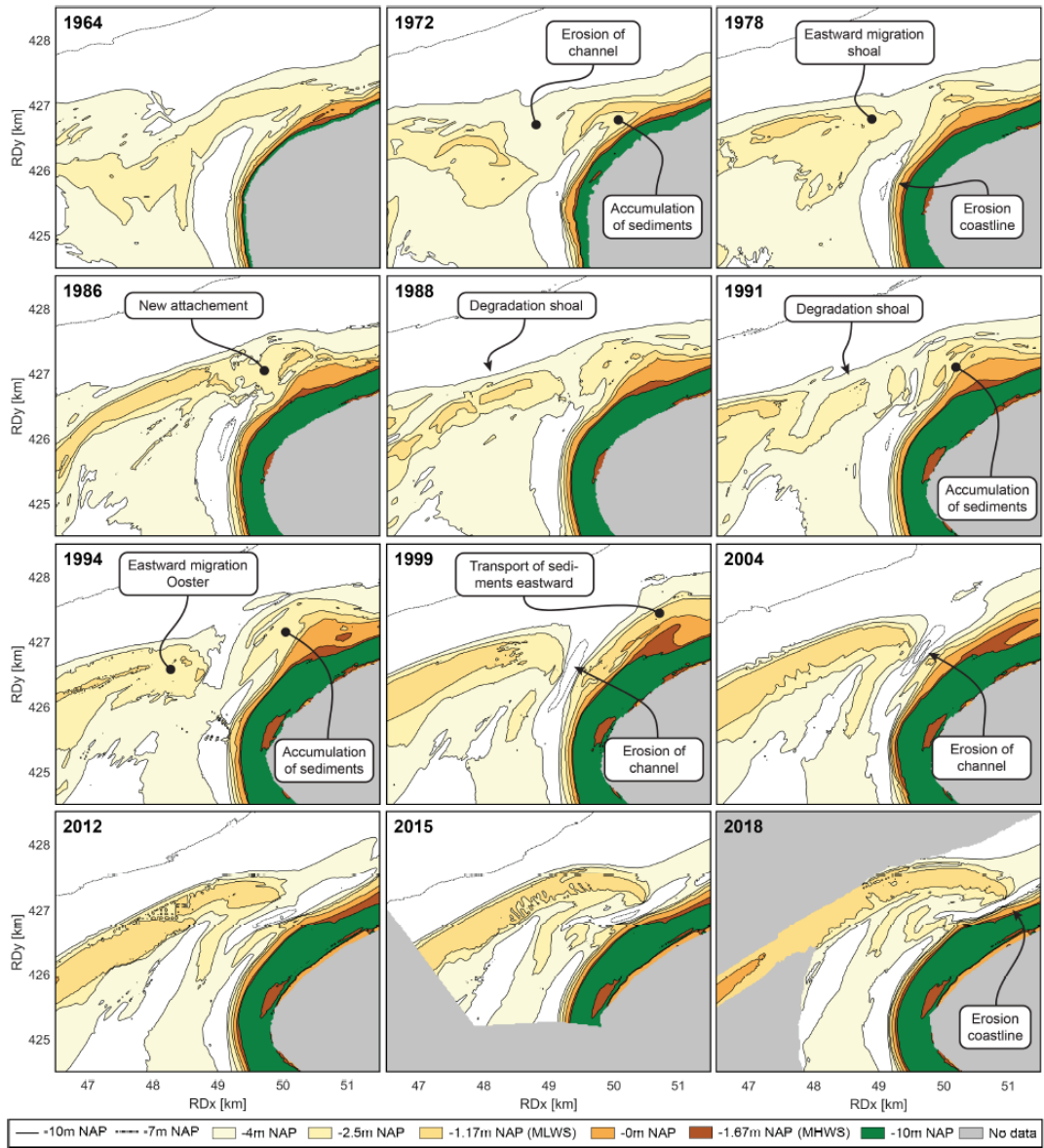
3.4 Recente ontwikkeling van de Bollen van de Ooster

De morfologische ontwikkeling van de Bollen van de Ooster is van belang voor ten eerste Natura-2000-doelstellingen en compensatiedoelstellingen voor Maasvlakte 2. Ten tweede hangt de kustlijnerosie van de noordwestzijde van Goeree samen met het landwaarts verplaatsen van de Bollen van de Ooster en het in de kust drukken van de tussenliggende geul (Elias et al. 2015; Groenewegen, 2019). Het noordwaarts uitbouwen van de Bollen van de Ooster en het in de kust drukken van de geul schaar zijn in Figuur 3.14 en Figuur 3.16 duidelijk te volgen. Wel zijn de processen in de loop van de tijd veranderd. In de periode 1964-1972 was Schaar nog een geul die zich langs de kust van Goeree uitstreekte en rechtstreeks in verbinding stond met het achterliggende Grevelingen bekken. Aan de zeewaartse uitstroom had zich een eb-schild gevormd (Figuur 3.14, 1968). Rond 1972 beginnen kleinere geultjes en platen zichtbaar te worden op dit eb-schild. Deze platen en geulen landen periodiek aan op de kust. De vele suppleties die in de periode 1966-1985 zijn uitgevoerd, zijn waarschijnlijk gerelateerd aan de kusterosie ten gevolge van de geulen die periodiek kusterosie veroorzaken.

Rond 1996 is er een duidelijke verandering van het morfologische gedrag. Een grote en diepe (kortsluit)geul vormt en blijft dan onafgebroken aanwezig. Deze geul verhindert de verdere aanlanding van platen, waardoor de kust nu structurele erosie vertoont. De geul vormt zich als een vloed-schaar zeewaarts van de oorspronkelijke geul Schaar. Schaar wordt initieel, tijdens de vorming, de kust in gedrukt. Tot 2000 blijft een grote geul zichtbaar. Initieel had de vorming van de geul nog geen negatieve gevolgen voor de kust. Tussen de geul en de kust bevond zich nog een zandrug die zich verheelde met de kust. Dit levert rond 2003 een maximale zeewaartse verplaatsing (zandvolume). Sindsdien erodeert de kust sterk. Vanaf 2003 zien we ook dat er geen enkele hoofdgeul aanwezig is, maar meerdere kleine geultjes gescheiden door zandruggen ontwikkelen zich. Dit is eigenlijk het begin van de huidige configuratie van geulen gescheiden door kleine bankjes. Het is waarschijnlijk dat deze ontwikkelingen zijn gekoppeld aan de vorming van de Bollen van de Ooster. De Bollen van de Ooster strekt zich steeds verder noordwaarts (en landwaarts) uit (Figuur 3.14, 2000-2019). De Bollen van de Ooster duwen tijdens zuidgaand Noordzeegetij de stromingen tussen de bank en de kust en er ontstaan kleine in- en uitstroomgeulen. Deze geulen sturen in grote mate de achterliggende kustlijnontwikkeling.

Stromingsmodellering door Elias (2015) laat zien dat juist het afgaande getij op de Noordzee een belangrijke aandrijver is voor de stroming in het geultje tussen de Bollen en de kust. Deze stroming veroorzaakt juist grote stroomsnelheden. Deze stromingen dragen ook bij aan het uit de kust houden van de Bollen. Het erosiegebied dat samenhangt met de geul en stromingen verplaatst zich langzaam noordwaarts met de verplaatsing van de Bollen mee. Stromingen door de geul Schaar vanuit de Grevelingenmonding zijn minder van belang aan de kop van de Bollen. Deze strekken zich juist meer zeewaarts uit over de Bollen heen. In dit opzicht kan het effect van een doorlaat op de erosie aan de noordwestzijde van Goeree beperkt zijn.

Een grotere stroming over de Bollen kan wel het doorbreken van de plaat versterken. In de meest recente data is al te zien dat het noordoostelijke deel van de Bollen relatief diep ligt. Hier zijn al enkele ondiepe doorbraken te onderscheiden. Het doorbreken van de Bollen en het langzaam eroderen, afbreken van de bank is onderdeel van de natuurlijke ontwikkeling en zal met of zonder doorlaat zich in de toekomst doorzetten.



Figuur 3.16: Ontwikkeling Bollen van de Ooster in relatie tot de stranderosie van Goeree (uit Groenewegen, 2019).

3.5 Een conceptuele weergave van de processen

Van der Spek en Elias (2021) illustreren de ontwikkeling van de Grevelingen en Haringvliet buitendelta's door middel van een conceptueel model dat bestaat uit 3 stadia van ontwikkeling.

Stadium 1: Open zeegat – dynamisch evenwicht (Figuur 3.17, linksboven).

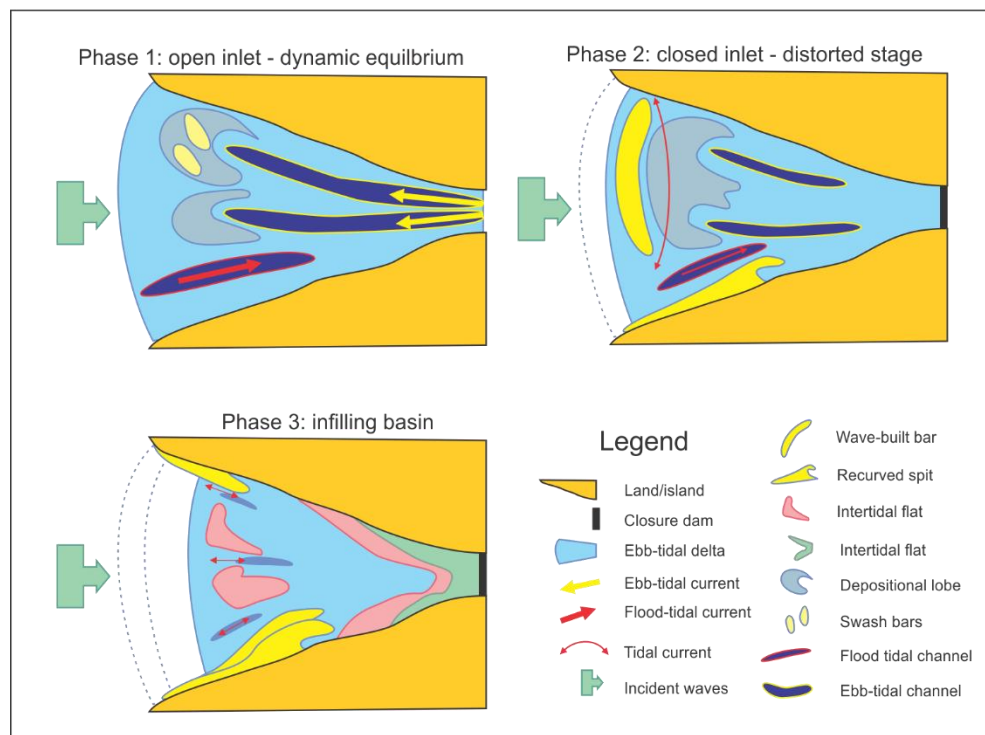
Vóór de afsluiting bestaat er de eb-stroming door het zeegat die sediment zeewaarts transporteert en banken creëert. Golfbreking op deze banken duwt deze dan weer landwaarts en op de schaal van de buitendelta vormt er zich een dynamisch evenwicht. Banken en geulen kunnen binnen dit evenwicht nog wel verplaatsen en migreren (bijv. als onderdeel van het sediment-bypassing mechanisme).

Stadium 2: Gesloten zeegat – Verstoorde situatie (Figuur 3.17, rechtsboven).

Afsluiting van het estuarium reduceert het getijprisma en met name de reductie in eb-uitstroom heeft een groot effect. Zeewaarts zandtransport in de geulen reduceert, terwijl het landwaarts transport door golven nog onverminderd kan plaatsvinden. Dit resulteert in een groot landwaarts transport op het front van de buitendelta en er vormen (grote) kust-parallelle banken (zoals de Bollen van de Ooster en de Hinderplaat in het Haringvliet estuarium). De intergetijdse banken op het afgeschermdde, landwaartse deel van de buitendelta verlagen en de getijgeulen vullen in met sediment (zand en mud).

Stadium 3: Opvullen van het achterliggende bekken (Figuur 3.17, linksonder).

De afgesloten buitendelta, achter de grote kustlangse bank, kan worden beschouwd als een klein bekken. In het afgeschermdde gebied zijn de geulen relatief diep ten opzichte van de getijprisma's. Dit geeft accommodatieruimte die kan opvullen met sediment. De getijuitwisseling is hier te beperkt om de oude geul-plaat topografie te behouden waardoor deze afvlakt. De grote kustlangse bank kan niet behouden worden en zal uiteindelijk in hoogte afnemen en doorbreken.



Figuur 3.17: Conceptueel model voor de ontwikkeling van de buitendelta's van de Haringvliet en Grevelingen.

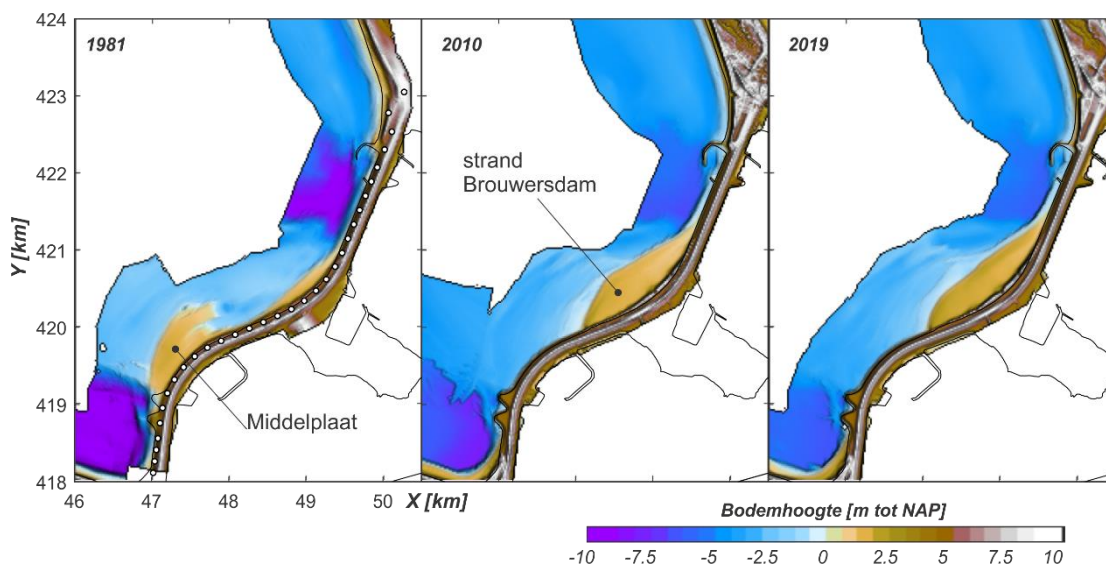
3.6 Ontwikkelingen langs de Brouwersdam

Een gedetailleerd beeld van de verandering in bodemligging langs de Brouwersdam kan worden verkregen door analyse van de Jarkus data. Dekkende Jarkus grids zijn aanwezig sinds 1981 (Figuur 3.19). Voor de individuele profielen zijn data sinds 1975 beschikbaar (Appendix A.3). Ook zijn er over de periode 1973-1980 luchtfoto's beschikbaar (Figuur 3.18).



Figuur 3.18: Luchtfoto's van de Middelplaat in de jaren 1973, 1976 en 1981 (uit Huibregtse, 2013).

De foto's en bodemkaarten illustreren twee ontwikkelingen. Ten eerste de opvulling van de geulen. In 1981 zijn zowel aan de noordzijde als aan de zuidzijde van de dam de geulen nog in de bodemligging te onderscheiden. In de 2010 en 2019 bodems zijn de hoogteverschillen uitgevlakt (Figuur 3.19 en Figuur 3.20). Naast geulopvulling is de noordelijke verplaatsing van de Middelplaat en de vorming van het strand Brouwersdam duidelijk te volgen. Na aanleg van de Brouwersdam is de Middelplaat gedeeltelijk landwaarts verplaatst waardoor er een groot droogvallend, zandlichaam bij de dam ontstaat. Deze bank vervormt en migreert noordelijk. In de luwte, bij strand Brouwersdam kan dan tijdelijk een groot strand ontstaan. Dit strand is echter niet stabiel, maar erodeert en migreert noordwaarts. Dit strand lag in 1981 tussen raai 2300 en 2420, maar is dan in 2010 al gelegen tussen raai 2100 en 2300. In de 2019 bodem ligt de plaat dan ongeveer op een gelijke positie, maar de zeewaartse zijde is dan sterk landwaarts verplaatst. Zoals geïdentificeerd in de expertsessie (Houtekamer en Van Kleef, 2016) kan dit een effect hebben op de Noordelijke doorlaat.

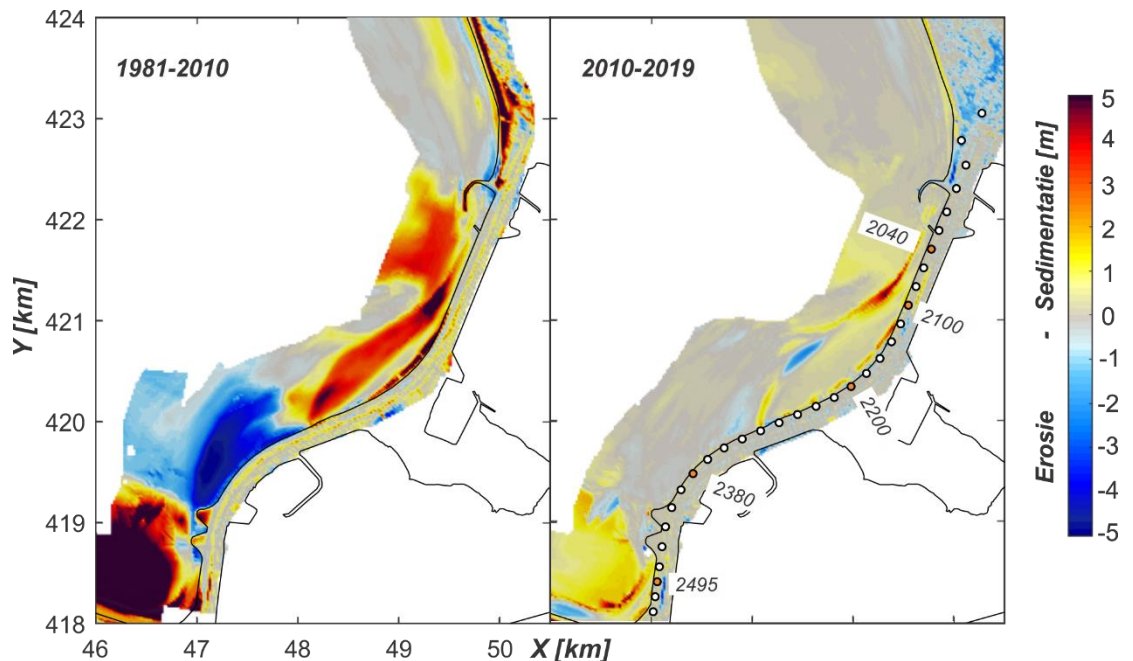


Figuur 3.19: Een overzicht van de sedimentatie-erosie patronen nabij de Brouwersdam over de periode 1981-2019, 2010-2015 en 2015-2019 aan de hand van de Jarkus grids.

De dwarsprofielen in Appendix A.3, Figuur A- 9 tot en met Figuur A- 13 vatten de veranderingen in hoogte in meer detail samen. Het meest noordelijke profiel, raai 2040 (Figuur A- 9) illustreert het opvullen van de voormalige geul Springersdiep. Sinds 1979 is de geul hier met 4 m aan sediment ingevuld. Deze opvulling vindt dan vooral vóór 2000 plaats. In de periode 2010-2019 ligt de opvulsnelheid op minder dan 0.10 m/jaar en bouwt de kust uit met 0.20 m/jaar.

Raai 2100 (Figuur A- 10) illustreert kust voortuitgang door het noordwaarts verplaatsen van het strand. Sinds 1979 is de kust hier 200 m zeewaarts uitgebouwd. Het voorliggende kleine geultje is daarbij ingevuld. De kustvoortuitgang gaat ook na 2010 nog door met een snelheid van 10 m/jaar. Het uitbouwende strand bereikt een hoogte van rond de 2 m NAP. De hoogte van de zeewaarts gelegen vooroever verandert hierbij nauwelijks. Raai 2300 (Figuur A- 11) geeft een beeld van het opruimen van het voorliggende strand. In dit deel van de Brouwerdam trekt de kust meer dan 500 m terug sinds 1985. De hoogte is hierbij met 3.3 m afgenomen. In de recente profielen domineert het aanbrengen van een suppletie de ontwikkeling. De kustlijn blijft tot 2017 stabiel in positie, verplaatst dan zo'n 185 m zeewaarts door de suppletie. Na suppletie trekt het strand echter weer sterk terug. Ook ten zuiden van het strand, tussen raai 2320 en 2420, domineert erosie de lange termijn ontwikkeling. In raai 2380, Figuur A- 12, is de kustlijn sinds 1979 met meer dan 500 m teruggetrokken. Het droge strand is daarbij geërodeerd (18 m). Na 2010 is deze erosie niet meer terug te zien. De recente data (2010-2019) geeft een bijna stabiel beeld.

Ten zuiden van de uitwateringssluis (raaien 2440-2525) domineert aanzanding de ontwikkeling. Dit proces wordt geïllustreerd door middel van raai 2495 in Figuur A- 13. Opvulling van het Brouwershavensche Gat vindt hier continue plaats. Gemiddeld ligt de snelheid op 0.50 m/jaar sinds 1979. De recente bodemontwikkeling vertoont echter een kleinere verandering die tussen 0.15 en 0.20 m/jaar ligt. De kustlijn bouwt dan met een kleine 4 m/jaar uit.



Figuur 3.20: Een overzicht van de sedimentatie-erosie patronen nabij de Brouwersdam over de periode 1981-2010, en 2010-2019 aan de hand van de Jarkus grids.

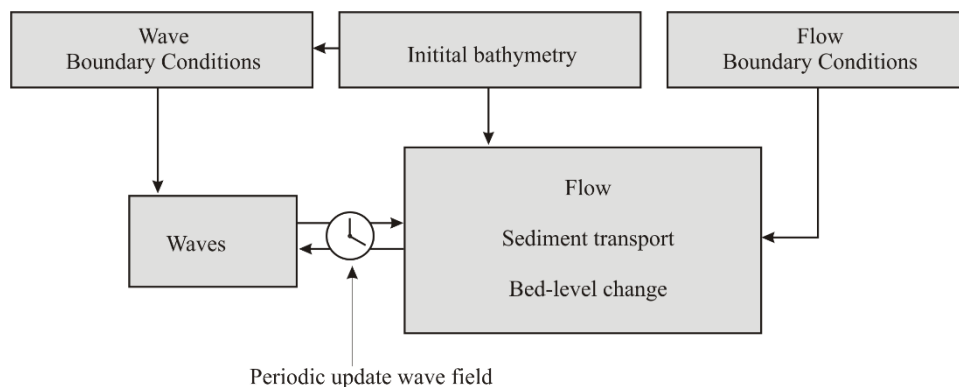
4 Modelling

4.1 Het Delft3D FM model voor de monding

Een belangrijke randvoorwaarde voor deze studie is dat het uitwisselingsdebiet door het doorlaatmiddel berekend kan worden met behulp van een 0D-Python script. Hierdoor is het niet nodig om de Voordelta en de Grevelingen in een gecombineerd model te omvatten en kan er worden gewerkt met een twee losse modellen. Aan beide modellen wordt dezelfde tijdserie van het debiet door het doorlaatmiddel opgelegd, waardoor consistentie gegarandeerd is. Het model(instrumentarium) voor de monding bestaat uit een hydrodynamisch model voor stroming en golven, een morfostatische modelwijze voor sedimenttransport en een Lagrangiaanse afschatting van de beïnvloeding van de sedimenttransporten door middel van SedTRAILS. In de Grevelingen wordt een stromings- en sedimenttransportmodel toegepast.

4.1.1 Basis

De berekeningen worden uitgevoerd met een Delft3D Flexible Mesh (FM) stromings- en sedimenttransportmodel van de Grevelingenmonding. Het model bestaat uit de gekoppelde D-FM Online Morfologie en de D-Waves module (zie Figuur 4.1 voor een principe schets). De basis van het model wordt gevormd door de D-Flow module. Deze module berekent de waterbeweging door getij en meteorologische forcering door het oplossen van de ondiep water vergelijkingen. Door het opleggen van randvoorwaarden bij de bodem (diepte en ruwheid), de laterale randen (bijv. snelheid, waterstand, debiet) en op het oppervlak (wind) kunnen de vergelijkingen worden opgelost.



Figuur 4.1: Schematisch overzicht van Delft3D

Het effect van golven, bijv. golfkrachten door golfbreking en de vergroting van de bodem schuifspanning, kan in de berekening worden meegenomen door te koppelen met de golven module D-Waves. D-Waves gebruikt het SWAN golfmodel om de golven op te lossen. SWAN (Simulating WAVes Nearshore) is een tweedimensionaal, spectraal golfmodel ontwikkeld door de TU Delft. Het golfmodel is ontwikkeld om 2D golfvelden te voorspellen op basis van verschillende fysische processen, waaronder golfgroei door wind; shoaling en refractie door stroming en diepte; niet-lineaire golf interacties, dissipatie van golfenergie door het breken van golven in diep (white-capping), ondiep water (diepte geïnduceerd breken) en bodemwrijving. Door het spectraal oplossen in richting en frequentie van de golfvelden is het model bij uitstek geschikt om realistische schattingen van de golfparameters te maken in complexe kustgebieden. De resultaten van de golf simulatie, zoals golfhoogte, periode en massa fluxen worden daarbij opgeslagen op het stromingsrooster en in de berekening van de stroming en transporten meegenomen. Deze communicatie tussen stroming en golven gebeurt niet op de rekentijdstap van het stromingsmodel maar over het algemeen in een interval tussen de 10 en 60 minuten.

De in Delft3D FM aanwezige Van Rijn (2007a,b,c) sedimentformuleringen worden gebruikt voor de online berekening van de sediment transporten. Iedere rekentijdstep worden de transporten berekend en omgezet naar een bodemhoogte verandering (morfologisch rekenen). In de Van Rijn formulering worden zowel de bodemtransporten als de suspensieve transporten berekend en bij elkaar opgeteld om zo een schatting van het totale transport te krijgen. De bodemtransporten representeren de transporten die op de bodem plaatsvinden en zijn gebaseerd op een parametrische formulering die ook het effect van golven meeneemt. De suspensie-transporten representeren de transporten in de waterkolom en worden berekend met de advectie-diffusie vergelijking. Lesser et al. (2004) geeft een uitleg hoe de formuleringen zijn geïmplementeerd in Delft3D 4, deze aanpak is ook voor Delft3D FM geldig. Een betrouwbare voorspelling maken van de bodemverandering is geen triviale zaak en vergt een uitgebreide kalibratie en validatie van het morfologische model. Zo'n aanpak valt buiten de scope van dit onderzoek.

Om de effecten van het doorlaatmiddel in kaart te brengen kan ook een alternatieve aanpak gevolgd worden. Het is ook mogelijk wel de sediment transporten te berekenen, maar de uitwisseling met de bodem niet uit te voeren. Deze modelaanpak wordt morfostatische rekenen genoemd. De sedimenttransporten verkregen door deze methode zijn momentane sedimenttransporten. In werkelijkheid zou de convergentie of divergentie van de transporten een bodemaanpassing veroorzaken. Hierdoor varieert de bodem en dus ook de transporten door de tijd.

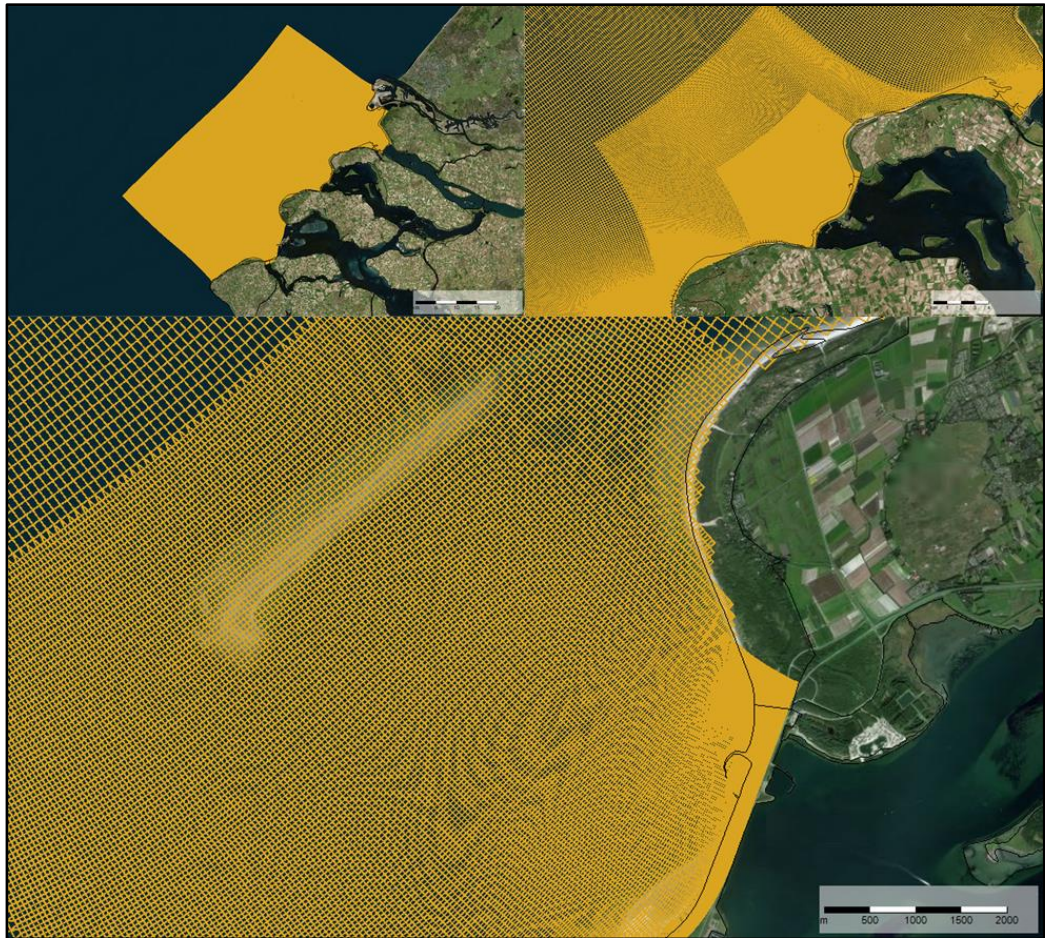
Door in het model de bodem constant te houden, kan juist de verandering in sedimenttransport door veranderingen in hydrodynamische forcering van verschillende locaties van het doorlaatmiddel nauwkeurig in kaart worden gebracht. Deze methode maakt het ook mogelijk om lange-termijn transportschattingen te verkrijgen zonder dat hier zeer rekenintensieve modelsommen voor gemaakt moeten worden. Hiervoor worden de transporten over de verschillende golfcondities berekend en de resultaten gewogen (met de kans van voorkomen) bij elkaar opgeteld. Op deze manier kunnen op eenvoudige en efficiënte wijze schattingen van de transporten worden verkregen voor bijv. de jaarlijkse of 5-jaarlijkse of 10-jaarlijkse condities. Het enige verschil is hier de wegingsfactor die mogelijk iets afwijkt over de verschillende periodes. Met behulp van deze schattingen kan dan een expert-judgement gebaseerd oordeel worden gegeven over de mogelijke effecten van het doorlaatmiddel op de morfologie.

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

4.1.2 Rekenroosters voor stroming en golven

In deze studie worden de simulaties uitgevoerd met het Delft3D Flexible Mesh (FM) stromings- en sedimenttransportmodel van de Grevelingenmonding (Figuur 4.2). De basis van dit FM model is het Delft3D 4 (gestructureerde) model zoals gedocumenteerd in De Boom (2016), wat weer een uitsnede is uit het WAQUA-Oosterschelde model (Van der Kaaij, 2015). Zie Appendix B.1 voor een inventarisatie van eerder uitgevoerde studies. Ter beperking van de rekentijd is het rekenrooster afgekapt ter hoogte van de Oosterschelde Stormvloedkering. Het rekenrooster heeft een resolutie van 50 m op de Voordelta en 350 m in de diepere Noordzee. Een beperking van het Delft3D 4 model is dat het alleen met gestructureerde (vierkant of rechthoeken) roosters kan werken en er strenge numerieke eisen zijn op overgangen van lage naar hoge resolutie. In een Flexible Mesh (FM) rekenrooster is dit niet het geval. Dit rooster kan naast vierkanten en rechthoeken ook vormen zoals driehoeken bevatten. Deze eigenschap maakt het mogelijk efficiëntere rekenroosters te construeren met hogere resolutie in het interessegebied. Het gestructureerde rekenrooster is daarom eerst omgezet naar een FM rekenrooster. Het rooster is hierbij verder geoptimaliseerd in resolutie, door middel van 2

verfijningen wordt een roosterafstand van 30 m bereikt in de monding. De resolutie neemt af richting de modelranden zodat nauwkeurige, maar tevens ook efficiënte modelsimulaties gemaakt kunnen worden. De modelresolutie is niet voldoende om het doorlaatmiddel in detail in te bouwen. Het doorlaatmiddel wordt opgelegd daarom als een randvoorwaarde. Het nauwkeurig doorrekenen van stromingen in het doorlaatmiddel is in de huidige modelopzet niet mogelijk (en niet nodig door koppeling met de debietrijdsseries uit eerdere studies).

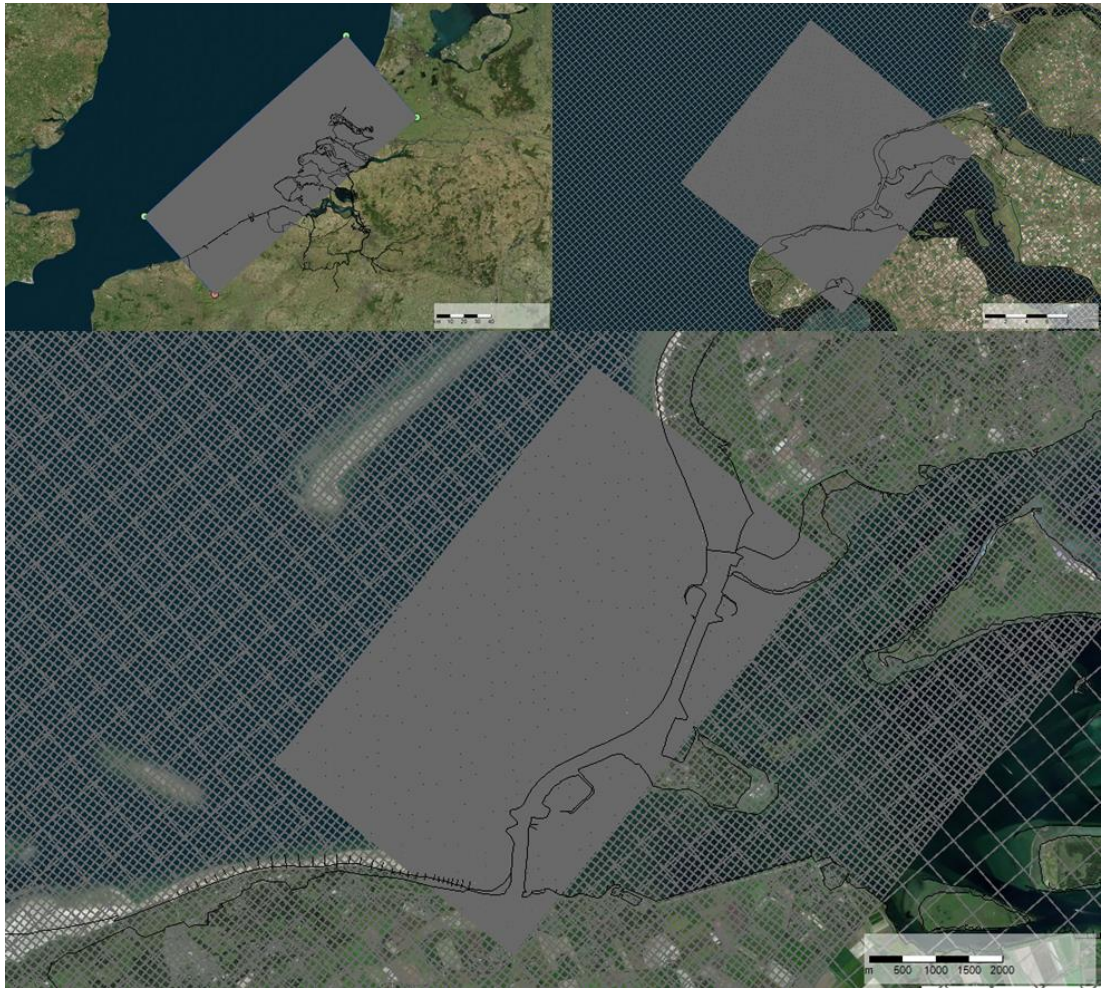


Figuur 4.2: Een overzicht van de gebruikte stromingsroosters voor het FM-model van de Grevelingenmonding.

De waterbeweging wordt dieptegemiddeld opgelost (2DH). In de monding weegt de toename in rekentijd van een 3D simulatie niet op tegen de verwachte verbetering van de modelresultaten. De interessegebieden bevinden zich langs de Noordzeekust en de bodem bestaat hier uit zand. De transporten worden vooral gedreven door het getij- en de golf forcing. Dichtheidseffecten zijn hiervoor minder belangrijk, waardoor de 2DH benadering voldoende nauwkeurig is.

Golven worden niet rechtstreeks berekend op het FM stromingsrooster, maar op een eigen domein. Als basis van het golfmodel wordt een rooster gebruikt dat de gehele voordelta beslaat (Figuur 4.3, linksboven). Dit rooster is veel groter dan het stromingsmodel zodat verstoringen (randeffecten) uitgedempt zijn voordat ze het interessegebied bereiken. Randeffecten zijn een bekend verschijnsel in SWAN en ontstaan doordat langs de rand niet het volledige richtingspectrum kan worden opgelost. Een eenvoudige oplossing is het grootste golfmodel dusdanig groot te maken zodat randeffecten het stromingsmodel niet bereiken. Door gebruik te maken van een lage resolutie van ongeveer 500 m blijft de rekentijd van dit grote golfmodel beperkt. Binnen dit grote model zijn twee detailmodellen van de Grevelingen monding genest. Het kleinste model heeft dan een resolutie vergelijkbaar met het

stromingsrooster. Deze resolutie zorgt ervoor dat golfgedreven stromingen op de ondieptes van de buitendelta waar golven breken nauwkeurig worden opgelost. Het middendomein dient alleen ter overbrugging van de overgang van een grof naar een fijn rooster.

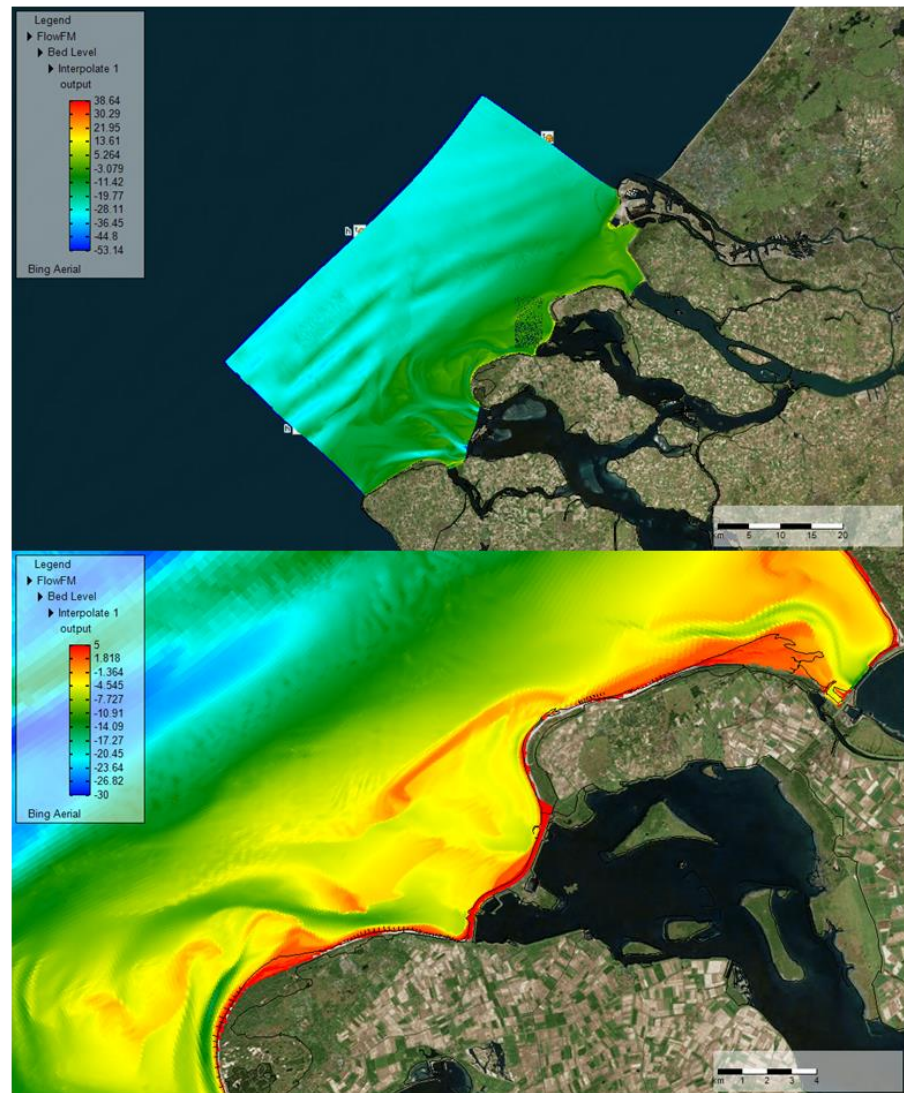


Figuur 4.3: Een overzicht van de gebruikte roosters voor de golfmodellering.

Voor een nauwkeurige weergave van de golfstroom interactie wordt het golfmodel elke 30 minuten opnieuw berekent. Elke 30-minuten is er dus een uitwisseling tussen het golf- en stromingsmodel waarbij het stromingsmodel de waterstanden, stromingen etc. doorgeeft aan SWAN. SWAN berekent vervolgens het bijbehorende golfveld (stationair) en de golfinformatie wordt weer teruggegeven aan FLOW en meegenomen in de volgende 30 minuten van de stromingsberekening. De golfcondities zijn gebaseerd op een morfologische schematisatie zoals uitgewerkt in Hoofdstuk 2.1.4.

Zowel het stromings- als golfmodel maakt gebruik van gelijke bodemdata. De validatie simulaties zijn hierbij uitgevoerd op een representatieve 2006 bodem om aan te sluiten op de studie van De Boom (2016). De effecten van het doorlaatmiddel zijn doorgerekend op de meest recente, 2019, bodem. De rekenroosters zijn van dusdanige resolutie dat de banken en geulen van de monding in detail worden gerepresenteerd (Figuur 4.4). De modelsommen gaan uit van een bodemsamenstelling met onbeperkte hoeveelheid sediment met een mediane (d_{50}) korrel diameter van 200 μm . Het model berekent zelf de sedimentgradering (d_{10} en d_{90}) uit behorende bij deze d_{50} . Een korrel diameter van 200 μm wordt gezien als representatief voor de monding. In werkelijkheid zal er een ruimtelijke sortering van het sediment aanwezig zijn. In de geulen is de korrel diameter over het algemeen wat groter en op de platen en banken iets kleiner. Vroom et al. (2018) geeft bijvoorbeeld aan dat het zandpakket in het voormalig

Springersdiep bestaat uit fijn tot matig grof zand ($d_{50}=110-320$ micron), vaak met silt- en kleilagen en met veel schelpen/schelpgruis. Bij een onderlinge vergelijking van simulaties waarin steeds dezelfde korreldiameter wordt gebruikt, is dit echter van ondergeschikt belang. Deze simulaties zijn dan echter niet geschikt om realistisch uit te rekenen hoe bijvoorbeeld de erosie van de sliblagen in het Springersdiep plaatsvindt. Hiervoor zijn dan aanvullende simulaties met specifieke instellingen representatief voor deze sliblagen benodigd.



Figuur 4.4: Een overzicht van de 2019 model bodem zoals aanwezig in het model.

De positionering van het doorlaatmiddel is gebaseerd op een expertsessie waarbij verschillende mogelijke locaties zijn beschouwd (zie Appendix B, *Figuur B- 9*). Het noordelijke doorlaatmiddel is daarbij gekozen net ten zuiden van de al aanwezige werkhaven (positie 5, in *Figuur B- 9*). Naast deze ligging zijn gevoeligheidssimulaties gemaakt voor locaties 3 en 8. In het zuiden is het doorlaatmiddel gekozen direct naast de Brouwerssluis. Deze locatie ligt het verst weg van de kust van Schouwen. Voor deze locatie zijn gevoeligheidssommen uitgevoerd met een loodrechte en een meer noordelijk gerichte uitstroom van het doorlaatmiddel.

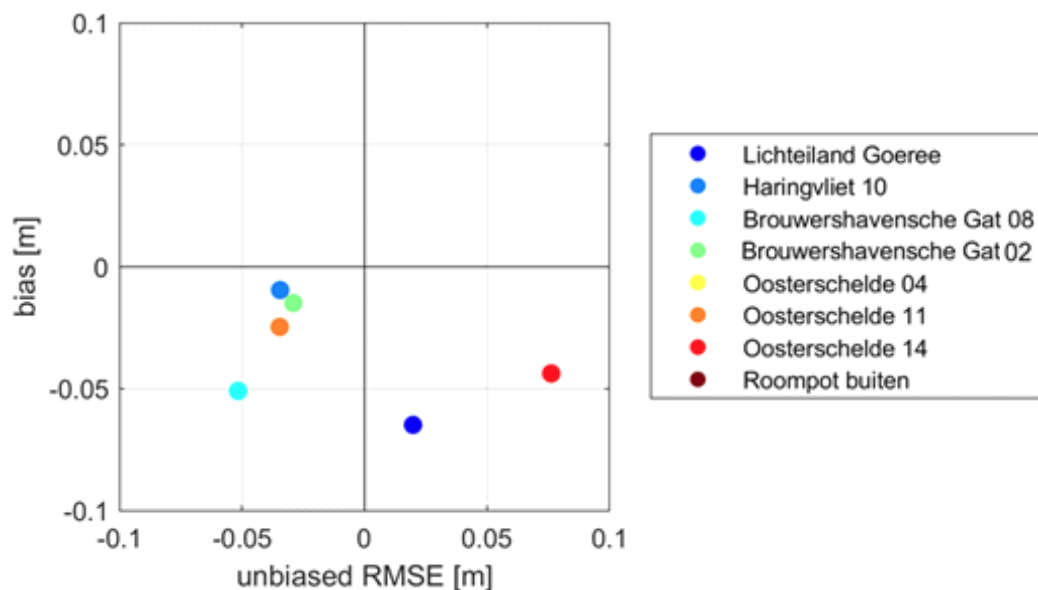
4.1.3 Validatie en kalibratie van de getij randvoorwaarden

Na afsluiting van het Grevelingen estuarium is de enige forcering van de Grevelingenmonding het Noordzee getij. Door de vorm van de Noordzee loopt de vloedgolf van zuid naar noord langs de Nederlandse kust. Tijdens de vloed stroomt het water in noordelijke richting en tijdens eb stroomt het water in zuidelijke richting, omdat de waterverplaatsing tijdens de vloed iets groter is dan tijdens eb wordt een netto noordwaartse reststroom gegenereerd.

Het gemiddelde getijverschil neemt in noordelijke richting af. Nabij Vlissingen is het getijverschil zo'n 3.86 m bij Vlissingen, in de Grevelingen monding ligt dit gemiddeld op 2.5 m en dit neemt dan af tot 1.74 m bij Hoek van Holland.

Om een correcte weergave van de waterbeweging in het gebied van interesse te verkrijgen is het essentieel het Noordzee getij nauwkeurig op te leggen. Een accurate randvoorwaarde voor de open-zee randen is verkregen door het Grevelingenmodel te nesten in een grootschalig model van de gehele Noordzee (DCSM-ZUNO model). Door het opleggen van een Manning ruwheid van $0.024 \text{ s/m}^{1/3}$ wordt een goede overeenkomst in waterstand tussen model en meting behaald (Figuur 4.5). Alle meetstations hebben een fout (root mean square error - RMSE) kleiner dan 10 cm. Direct in het interessegebied liggen zowel de bias als de RMSE tussen de 3 en 5 cm. De lage bias laat zien dat de getijbeweging goed gerepresenteerd wordt, er is geen grote structurele afwijking aanwezig (zie ook Appendix B, Figuur B- 6 en Figuur B- 7).

Het is goed om te realiseren dat de exacte fout van het basismodel eigenlijk van ondergeschikt belang is. De respons van het doorlaatmiddel ten opzichte van een T0 simulatie wordt geanalyseerd. De relatieve respons tussen de modellen zal niet of nauwelijks beïnvloed worden door de RMSE afwijking. Het is alleen belangrijk dat de grootschalige processen goed opgelost worden. Een RMSE en bias kleiner dan 10 cm zijn voldoende nauwkeurig om grootschalig de getijvoortplanting en waterstanden te voorspellen.



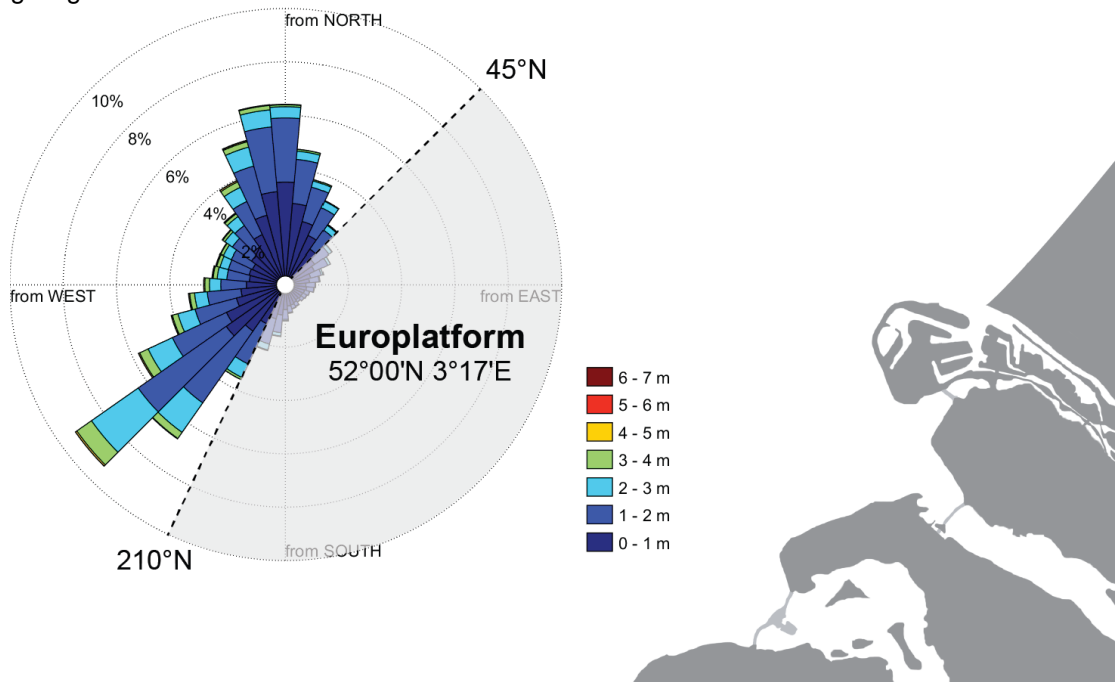
Figuur 4.5: Een overzicht van de fout in waterstand tussen meting en modelberekening voor verschillende meetstations. Aanvullende figuren worden weergegeven in Appendix B.2. 1.

Een hydrodynamisch representatief getij is door De Boom (2016) afgeleid op basis van de waterstanden in het Brouwershavensche Gat. Op basis van een statistische analyse is bepaald dat de periode 18-24 Juni de jaargemiddelde getijslag het beste representeert. Binnen deze springtij-doodtij cyclus is het 5de getij dan de beste benadering van het representatieve getij.

4.1.4 Golven

Randvoorwaarden van het golfmodel worden opgelegd aan de zeewaartse zijde van het grootste golfrooster. De golfcondities worden hier opgelegd door middel van een golfhoogte, -periode en richting. Gemeten tijdseries van getij en golven zijn niet direct geschikt voor het toepassen in numerieke modellen. Het volledig berekenen van transportpatronen, representatief voor de langetermijntrends, vereist zeer lange modelsimulaties. De modelsimulaties moeten immers een grote en representatieve spreiding van getij, wind en golfcondities doorrekenen. Met proces-gebaseerde modellen zoals Delft3D zijn dergelijke simulaties eigenlijk niet mogelijk gezien de benodigde rekeninspanning. Een benadering van representatieve transportpatronen kan echter wel gemaakt worden door gebruik te maken van morfologische schematisaties (zie De Vriend et al., 1991; Lesser, 2009).

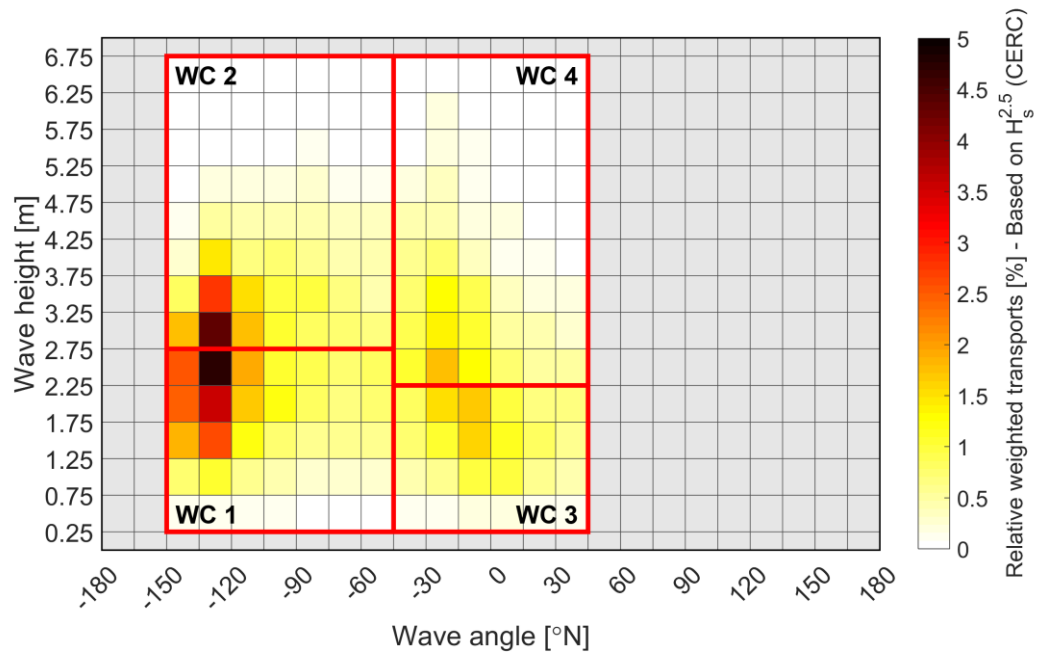
Het afleiden van een morfologisch representatief golfklimaat is geen triviale zaak. In morfologische simulaties zijn de rekentijd en het aantal golfcondities direct aan elkaar gekoppeld. Meer golfcondities betekent een aanzienlijk langere simulatie. De uitdaging in het afleiden van het morfologische golfklimaat ligt dan ook in het vinden van het minimaal aantal representatieve golfklassen. Een morfologisch klimaat onderverdeeld in 4 golfklassen is afgeleid in de studie van Groenewegen (2019). In deze afleiding worden de data van het Europlatform gebruikt (Figuur 4.6). Dit station is ongeveer 50 km noordelijk van de Brouwersdam gelegen, maar heeft als voordeel dat alle benodigde parameters daadwerkelijk hier gemeten zijn. De analyse is uitgevoerd op data uit de periode 1979-2001. Deze periode is lang genoeg om een representatief golfklimaat af te leiden dat ook nog voor de huidige situatie geldig is.



Figuur 4.6: Golfroos van het Europlatform.

Ter bepaling van het morfologisch equivalent golfklimaat worden de gemeten tijdseries onderverdeeld in klassen met in 0,5 m interval in golfhoogte en 15° in richting. In iedere klasse worden de golven gewogen bij elkaar opgeteld rekening houdend met hun morfologische impact. Hiervoor wordt een vereenvoudigde CERC-transport relatie gehanteerd op basis van $H_s^{2.5}$. Golven met een richting tussen Zuidzuidwest (210°) en Noordoost (45°) zijn meegenomen in de analyse. De redenering hierachter is dat bij oostelijke, afluiddige wind, er nog geen golven opgewekt zijn in de Grevelingenmond. Dit resulteert in 169 golfcondities. Uit deze 169 golfcondities wordt een vereenvoudigd golfklimaat opgebouwd dat bestaat uit 4 klassen (Figuur 4.7 en Tabel 4.1). Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen golven uit

het noorden en zuidwesten en een gemiddelde en storm conditie. De exacte indeling van de klassen is gemaakt door de klassen zo in te delen dat deze een ongeveer gelijke bijdrage aan de sedimenttransporten geven.



Figuur 4.7: Een overzicht van de berekend transporten per golfhoogte – richtingsklasse. De rode vlakken illustreert de indeling van de 4 gekozen klassen van het morfologische golfklimaat. Bron: Groenewegen (2019).

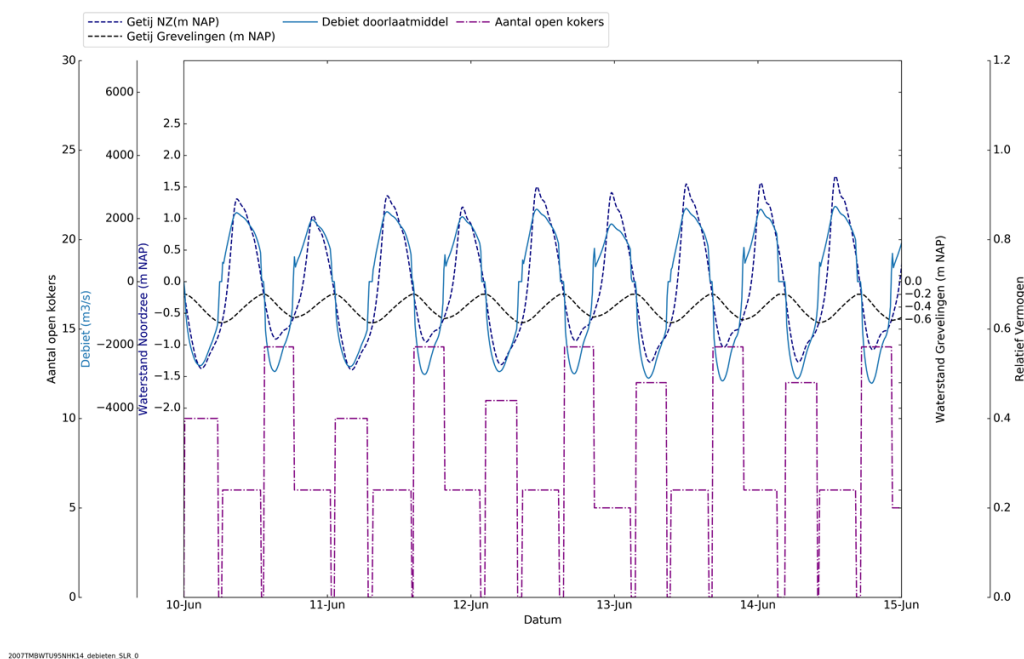
Tabel 4.1: Morfologisch golfklimaat gebaseerd op Europlatform (1981-2001). Bron: Groenewegen (2019).

Conditie	H_{sig} [m]	H_{dir} [°]	$T_{H_{1/3}}$ [m]	W_{vel} [m/s]	W_{dir} [°]	% voorkomen
1	1.50	249.60	4.27	8.28	231.4	18.1
2	3.39	249.92	5.81	15.42	245.63	39.31
3	1.17	358.46	4.52	5.79	175.45	4.03
4	3.01	348.59	5.86	12.13	243.92	34.99
(getij)	-	-	-	3.92	164.32	3.57

4.1.5 Implementatie van het doorlaatmiddel in het model

0D-Python schematisatie

De berekende waterstand direct zeewaarts van de doorlaten vormt de basis voor de bepaling van de debieten door het doorlaatmiddel (Figuur 4.8). Op basis van een 0D-python script worden vervolgens de debieten door het doorlaatmiddel bepaald. In de bepaling van deze debieten wordt rekening gehouden met het aantal geopende kokers, de maximale waterstand op het meer en de maximaal toegestane getijslag in het Grevelingenmeer. In deze berekening worden ook gelijk de debieten in de Brouwerssluis en de Flakkeese Spuisluis bepaald. Deze debieten worden op de locatie van het doorlaatmiddel en de Brouwerssluis als een debietrand opgelegd in het model.



Figuur 4.8: Voorbeeld van de berekende debieten door het doorlaatmiddel.

Ten behoeve van de modellen zijn debiettijdseries gegenereerd voor het scenario 40/-30 (codering TMBW, Maarse 2019) met 12 kokers en een afvoer coëfficiënt van 1.1 (C_{loss} van 0.909) en voor 14 kokers en een afvoer coëfficiënt van 0,95 (C_{loss} van 1,053). De tijdseries met 14 kokers zijn gebruikt in de uitgevoerde analyses. In het Grevelingenmeer is een startpeil (initiële conditie) van NAP -0.425 m opgelegd. Dit is afgeleid van het maximum peil en minimum peil: NAP -20 cm en NAP -65 cm. Door het model voldoende lang in te spelen heeft dit initiële startpeil geen effect op de berekeningen.

Kalibratie van de uitstroomsnelheden bij het doorlaatmiddel

De berekende debieten zijn nog niet direct geschikt om de stromingen door het doorlaatmiddel correct uit te rekenen. De debieten door het doorlaatmiddel volgen uit de 0D-python script tijdseries. Deze worden als een randvoorwaarde (debiet) op de juiste locatie in het model opgelegd. In het model kunnen niet rechtstreeks de kokers worden opgelegd en is een debietrand met een bepaalde diepte en breedte opgelegd. Het hier gekozen doorstroom oppervlak bepaalt dan de uitstroomsnelheid van het doorlaatmiddel. Als richtlijn voor de uitstroomsnelheid is een schatting toegeleverd door Rijkswaterstaat gebruikt: "Aan het einde van de strekdammen (280 m zeewaarts vanaf het doorlaatmiddel) bedraagt de gemiddelde snelheid 2,2 m/s over een diepte van 11,94 (=13,0-1,06) en breedte van ca. 139 meter". Na kalibratie van de randen worden vergelijkbare snelheden in het doorlaatmiddel bereikt. In Appendix B.2.2., Figuur B- 10 en Figuur B- 11 worden de resulterende snelheidsvelden getoond. De tijdserie (onderste deelfiguur) geeft een beeld van de snelheden en waterstanden direct voor het doorlaatmiddel.

Naast een kalibratie van de uitstroomsnelheid is ook een schatting van de bodemligging direct zeewaarts van de bestorting van het doorlaatmiddel benodigd. De ontwerpdiepte van de doorlaten ligt op NAP -13m. Dit is lager dan de huidige bodemligging in het gebied. Het is dan ook de verwachting dat er zich snel een ontgrondingskuil zal vormen in de bodem. De modelbodem van de T1 simulatie is daarom aangepast met een schatting van de omvang van deze ontgrondingskuil (Appendix B.2.2). De schatting van de ontgrondingskuil is gebaseerd op een getijsimulatie inclusief het doorlaatmiddel maar zonder aanpassing van de bodem. De snelheden tijdens maximale uitstroom zijn hier bepaald en de omhullende van de 2 m/s en 1 m/s snelheidscontour zijn gebruikt om de modelbodem aan te passen. Binnen de 2 m/s omhullende wordt de bodemdiepte gelijkgesteld aan de diepte van de teen van de bestorting. De 1 m contourlijn wordt gebruikt als overgangszone om de ontgrondingskuil vloeiend in de T0 bodem over te laten lopen. Zie Appendix B, Figuur B-12 voor een uitwerking van het zuidelijke doorlaatmiddel en Figuur B-13 voor het noordelijke doorlaatmiddel.

Uit evaluatie van de modelresultaten met en zonder aanpassing blijkt dat het wel of niet meenemen van de ontgrondingskuil op de “far-field effects”, op de schaal van de monding, geen wezenlijk effect heeft. Lokaal, “near-field effects” worden de lengte en omvang van de uitstroomjet wel beïnvloed.

4.2 Het Grevelingen model

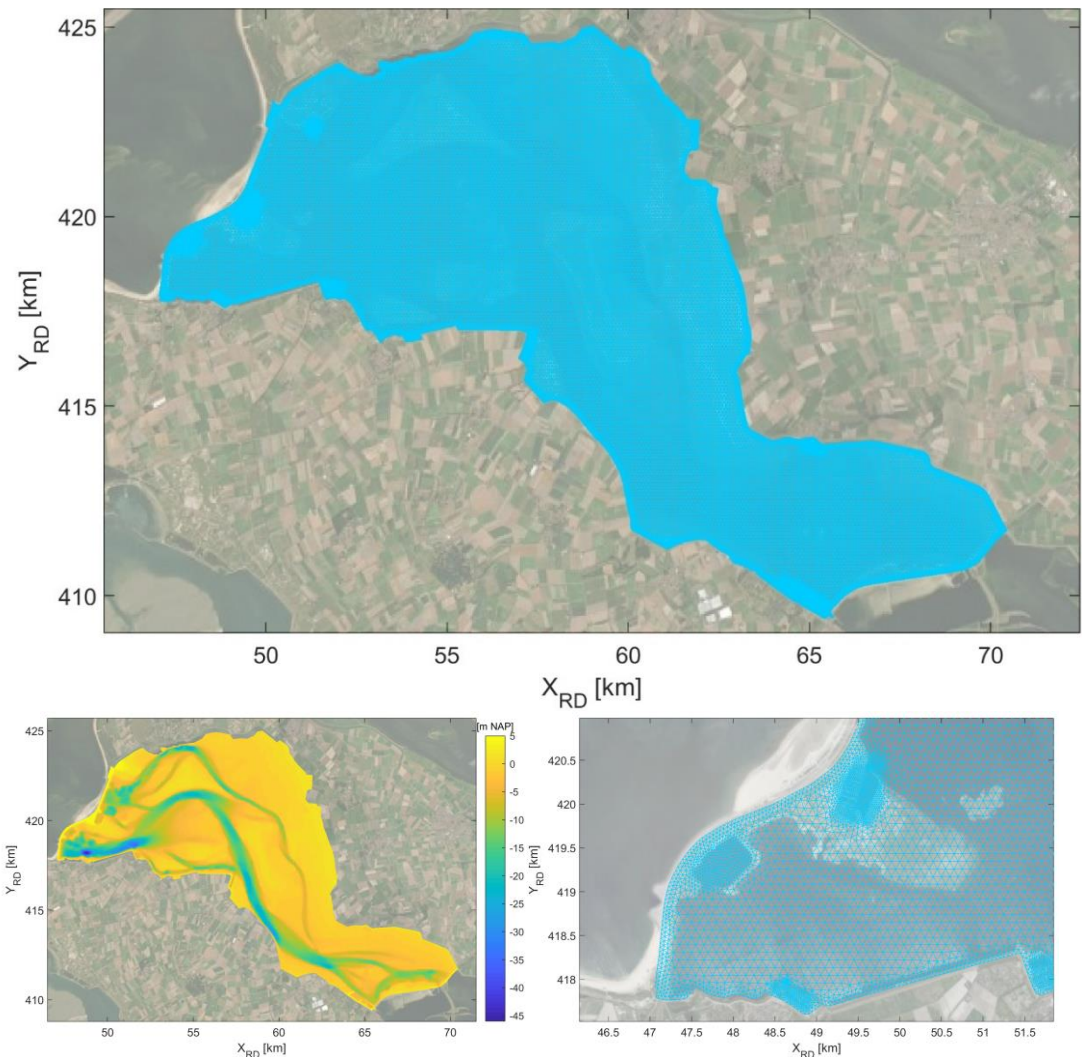
Het model gebruikt voor doorrekening van het Grevelingenmeer is gebaseerd op het zesde generatie D-HYDRO model ontwikkeld voor Rijkswaterstaat (Groenenboom et al., 2020). Dit 3D hydrodynamisch model is in staat om saliniteit, temperatuur en stormopzet in het Grevelingenmeer te berekenen afhankelijk van de gebruikte forcering.

In het kader van deze studie is de diepte-gemiddelde (2Dh) model variant gebruikt. Met dit dieptegemiddelde model zijn stromingen en sedimenttransport doorgerekend. Sedimenttransport instellingen zijn identiek zoals gebruikt in de monding (Van Rijn transport formulering en een zand fractie met d_{50} van 200 μm). Als forcering zijn hier alleen de debieten uit de 0D-python schematisatie gebruikt. Wind- en golfforcering zijn niet meegenomen in de simulaties.

Een overzicht van het rekenrooster wordt getoond in Figuur 4.9. Het binnengebied van het rekenrooster is gevuld met volledig uniforme driehoekige rekencellen met een resolutie van 100 m. De rand van het modeldomein bestaat uit driehoekige cellen met een resolutie van 50 m waarbij de modelrand aansluit op de dijken/dammen en op andere D-HYDRO netwerken. In totaal bestaat het rekenrooster uit 44.804 bodempunten en 23.109 waterstands-/rekenpunten. De modelbodem in het originele model bestaat uit een combinatie van lodingen uit de periode 2014-2018. Het model is afgeregeld middels een ruimtelijk variërend ruweheidsveld met waarden tussen de 0,020 – 0,022.

Een uitgebreide validatie en kalibratie van het 3D stromingsmodel wordt gepresenteerd in Groenenboom et al. (2020). Binnen deze studie is zo'n onderzoek verder niet uitgevoerd.

De randvoorwaarden gebruikt in deze studie zijn afgeleid met het 0D model en bestaan uit debiet tijdseries van het beschouwde doorlaatmiddel, de Brouwerssluis en de Flakkeese Spuisluis.



Figuur 4.9 (boven): Volledige rekenrooster van het D-HYDRO Grevelingenmodel. Rechtsonder: detailbeeld van het rooster nabij het zuidelijk deel van de Brouwersdam en linksonder: modelbathymetrie van het Grevelingenmeer.

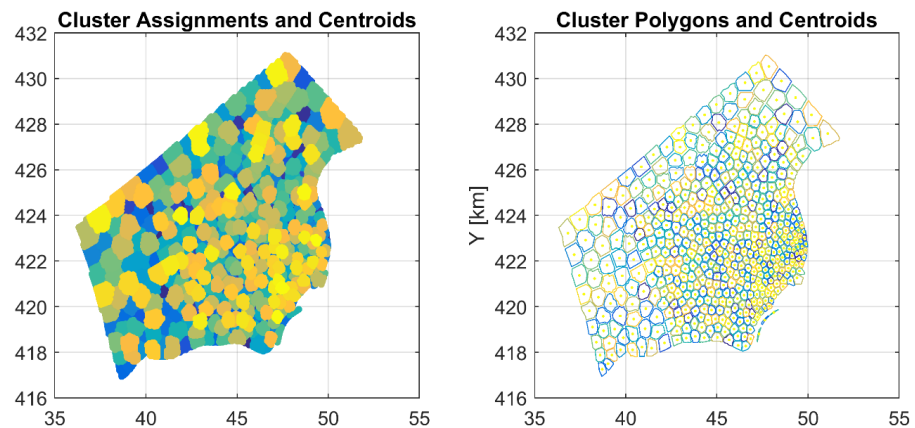
4.3 De SedTRAILS tool

Op basis van de berekende sedimenttransporten van het Delft3D model kan meer inzicht worden verkregen in het morfologische systeem en de impact of versterking van de verschillende varianten van het doorlaatmiddel op dit systeem. Een veel gebruikte analysemethode is het afleiden van de residuele transporten. Veranderingen in de residuele patronen geven dan inzicht in de toekomstige morfologische veranderingen. Naast de berekening van de residuele transporten wordt de SedTRAILS methode gebruikt om de sedimenttransporten in de monding verder in kaart te brengen. *SedTRAILS*, (*Sediment TRANsport vlsualization & Lagrangian Simulator*) is geen nieuwe of apart uit te voeren modelsimulatie maar een nabewerking op de resultaten van de al uitgevoerde sedimenttransportmodellering. Op basis van de in Flexible Mesh berekende sedimenttransportvectoren worden dan transportpaden berekend. In Appendix B.2.3., Figuur B- 14 wordt een voorbeeld van de methode getoond (zie Elias et al. 2020 voor meer uitleg).

De berekende transportpaden illustreren hoe sediment zich (over langere tijdschalen) door het systeem verplaatst. Deze paden maken het dan mogelijk fenomenen zichtbaar te maken als:

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

Met reguliere Delft3D modellering zouden deze vragen niet direct kunnen worden beantwoord. Er zouden dan aanvullende “particle-tracking” simulaties, met software zoals Delft3D PART, moeten worden gemaakt. Een nadeel van deze modellen is echter dat ze veel rekentijd kosten en een transportformulering voor zand niet geïmplementeerd is. Dit maakt het lastig om de resultaten van het PART en FM model onderling te vergelijken. Omdat SedTRAILS de al berekende transportvectoren gebruikt speelt dit probleem hier niet.



Figuur 4.10: Toegepaste clustering voor het verkrijgen van de initiële locaties.

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

In de uitgevoerde SedTRAILS berekening zijn 500 sedimentbronnen doorgerekend. Deze bronnen liggen verspreid over de gehele monding. De locaties zijn bepaald door een clustering op basis van de diepte en helling te gebruiken. Deze clustering zorgt ervoor dat de bronnen evenwichtig verdeeld worden over de verschillende morfologische elementen (Figuur 4.10).

4.4 Een overzicht van de aanpak en modelsimulaties

De in deze studie gevolgde modelaanpak wordt geïllustreerd in Figuur 4.11. De modellering van de monding bestaat uit een 4-tal stappen:

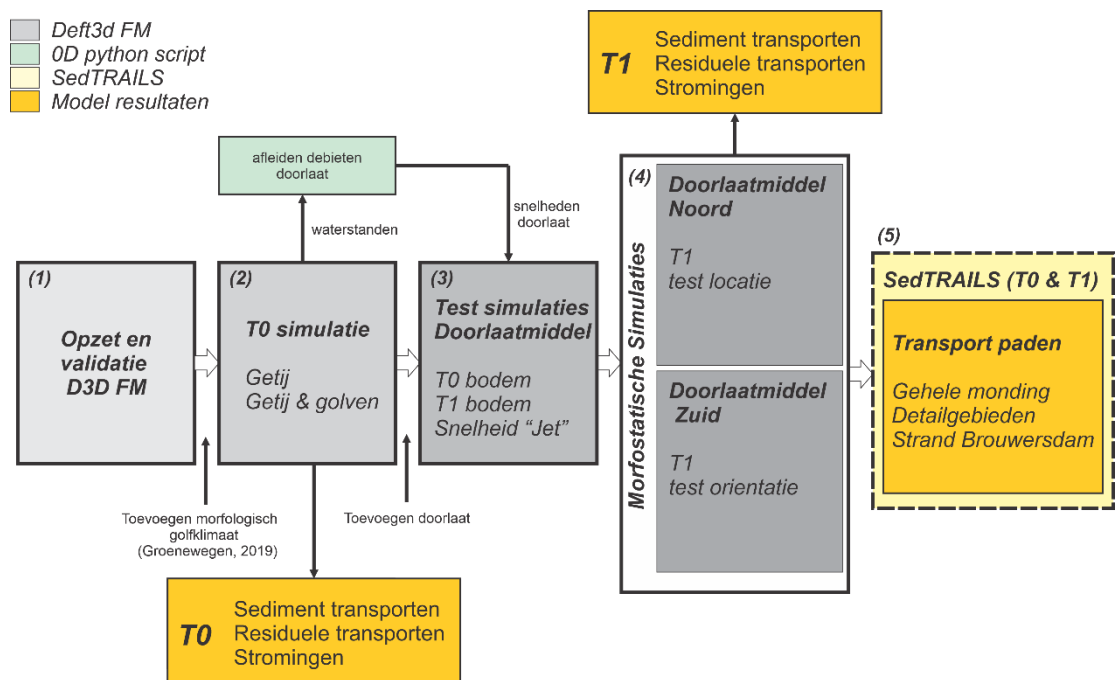
Stap I: Opzet en validatie van de modellen.

De basis van de modelsommen wordt gevormd door een grootschalig model van de gehele monding. Dit model is gebruikt de resultaten van De Boom (2016) als basis en is gevalideerd met berekende waterstanden in verschillende meetstation.

Stap II: Berekenen van de T0

Het gevalideerde stromingsmodel vormt de basis van de T0 simulatie op de 2019 bodemschematisatie. Het model wordt hier met en zonder golven gedraaid. De waterstanden van de getijgedreven simulatie vormen de input voor de berekening van de debieten door het doorlaatmiddel.

De invloed van golven wordt meegenomen door gekoppelde getij-golf simulaties voor de 4 representatieve golfklassen te maken. Per golfconditie wordt hierbij het morfologische getij doorgerekend. De berekende sedimenttransporten worden dan geschaald met de kans van voorkomen van de golfconditie. Door het gewogen optellen van iedere golfconditie volgt dan een schatting van het jaarlijks gemiddelde sedimenttransport voor de T0 (de referentie simulatie). De jaarlijks gemiddelde transporten vormen de basis voor de bepaling van de T0 transportpaden met behulp van SedTRAILS (stap 5).



Figuur 4.11: Overzicht van de gevolgde modelaanpak.

Stap III: Testsimulaties doorlaatmiddel

Voor uitvoering van de uiteindelijke berekeningen van het doorlaatmiddel is een tussenstap gemaakt waarin het model gekalibreerd is op de processen in het doorlaatmiddel. De toevoeging van het doorlaatmiddel is een iteratief proces, waarin keuzes gemaakt zijn in:

- Locatie doorlaatmiddel.
- Modelschematisatie doorlaatmiddel (van debiet naar snelheid).
- Bodemligging in relatie tot de uitstroomjet.

Na evaluatie van de testsimulaties volgen een definitieve keuze van het modelontwerp voor doorlaat op de Noordelijke en op de Zuidelijke locaties.

Stap IV: Sedimenttransport simulaties doorlaat

Het afgeregelde model is gebruikt om de jaargemiddelde transporten voor de noordelijke- en zuidelijke variant door te rekenen (de T1 simulaties). De T1 simulaties worden doorgerekend voor getij en voor het morfologische golfklimaat voor het noordelijke doorlaatmiddel (N1) en het zuidelijke doorlaatmiddel (Z1).

Naast deze T1 simulaties zijn diverse gevoeligheidssommen uitgevoerd, waaronder:

- noordelijk geroteerde uitstroom doorlaatmiddel Zuid,
- noordelijk en zuidelijk verplaatste doorlaatmiddel Noord.

Stap VI: Toepassing SedTRAILS

Met behulp van SedTRAILS worden de *far-field* effecten van het doorlaatmiddel in kaart gebracht. De verplaatsing van de sedimentdeeltjes wordt voldoende lang gevolgd zodat transportpaden ontstaan die geanalyseerd kunnen worden. Deze lengte is bereikt door de berekende Deftt3D FM transporten 730 keer te herhalen. De *near-field* effecten van het doorlaatmiddel kunnen met SedTRAILS niet in kaart gebracht worden. Door de hoge uitstroomsnelheden en transporten worden de deeltjes vrijwel instantaan, in de eerste getijcyclus, weg getransporteerd. Zonder deeltjes kunnen de transportpaden niet gevisualiseerd worden.

5 Modelresultaten voor de Monding

De in dit hoofdstuk gepresenteerde analyses bestaan uit 2 delen. Het eerste deel van de analyse beschrijft de stromingen en transporten op basis van de T0 situatie. Een goed begrip van het functioneren van het systeem voor aanleg van het doorlaatmiddel is essentieel om de invloed van het doorlaatmiddel na aanleg goed te begrijpen. De analyse van de T0 bestaat daarom uit het beter begrijpen van de getijgedreven stromingen en transporten (H. 3.1.1), de invloed van golven (3.1.2), een analyse van jaarlijks-representatieve transporten op basis van de instantane en residuele transporten (3.1.3) en door middel van de transportpaden (3.1.4.).

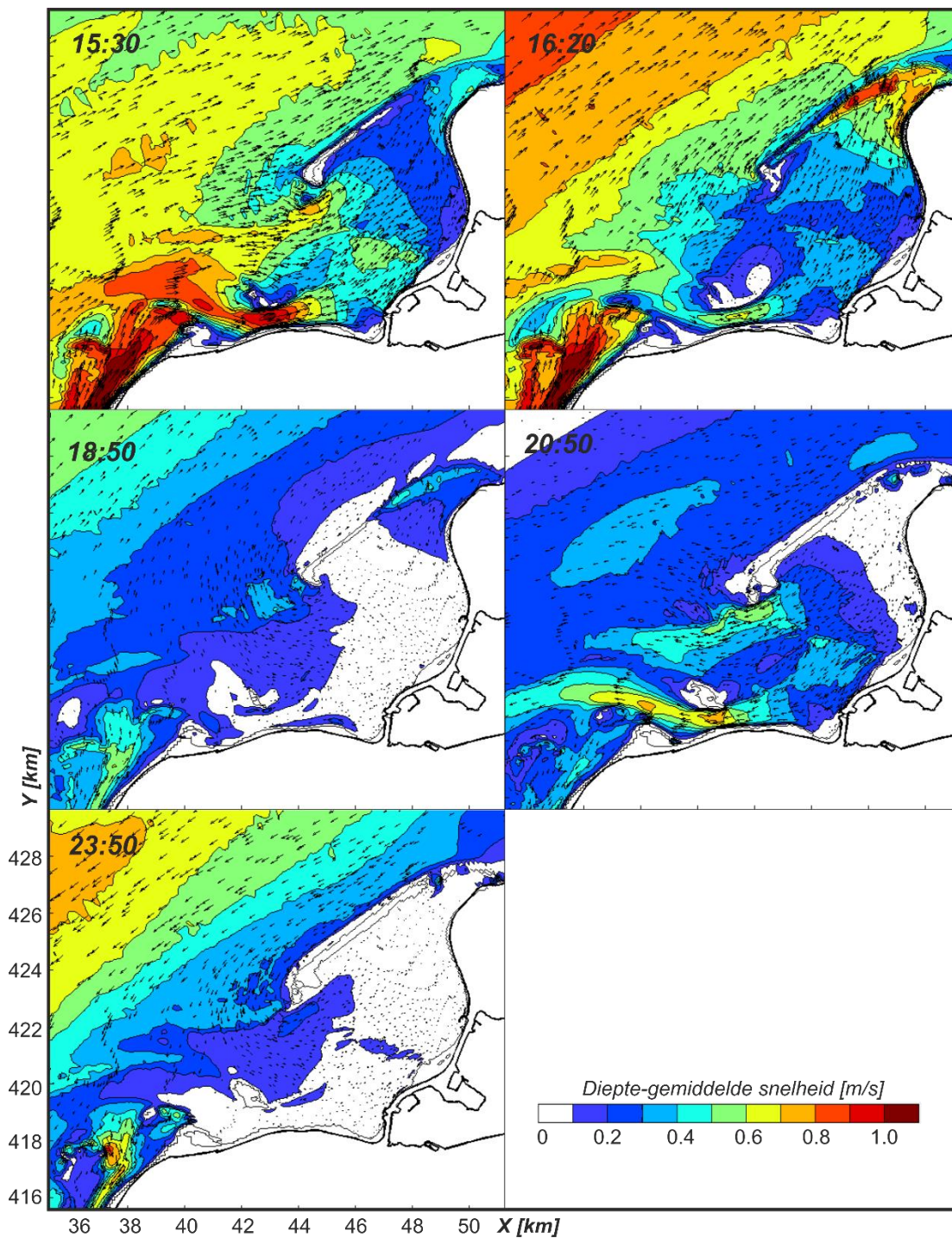
Het tweede deel richt zich op het doorrekenen van doorlaatmiddel Zuid doorlaat (Z1) en doorlaatmiddel Noord (N1); respectievelijk 3.2 en 3.3. Deze analyse richt zich vooral op het in kaart brengen van het verschil in stromingen, transporten en transportpaden relatief t.o.v. de T0. In hoofdstuk 3.4 wordt een detailanalyse van het Strand Brouwersdam gegeven.

Ten behoeve van de leesbaarheid worden niet alle figuren in het hoofdrapport getoond maar weergegeven in Appendix B en C.

5.1 Een analyse van de T0

5.1.1 Getijgedreven stromingen

De getijforcering is de belangrijkste aandrijver van de waterbeweging in de monding van de Grevelingen. Vóór afsluiting van de Grevelingen bestond het getij hier uit het kustlangse Noordzee getij en het kustdwarse getij dat in en uit het Grevelingen estuarium stroomt. De interactie tussen deze twee getijgolven resulteert in complexe stromingen en transporten, waardoor een ingewikkeld stelsel van geulen en platen ontstond. Na afsluiting van de Grevelingen is het Noordzee getij de enige aandrijver van de waterbeweging in de monding. Het Noordzee getij, zeewaarts van de monding genereert een relatief simpel stromingspatroon. Deze stroming is kustlangs en door de oriëntatie van de kustlijn noordoostelijk gericht tijdens vloed en zuidwestelijk tijdens eb. In de monding wordt het stromingspatroon al complexer doordat hier nog steeds geulen en platen aanwezig zijn die de stromingen beïnvloeden. De grootste invloed op de stroming ontstaat tijdens vloed (Figuur 5.1A). De stroming op de Noordzee is dan zuidwest - noordoost gericht. In het Brouwershavensche Gat volgt de stroming de geul oriëntatie en heeft een kustdwarse, west-oost, oriëntatie. Bij maximale vloedstroming (15:30) worden in het Brouwershavensche Gat lokaal stroomsnelheden van meer dan 1 m/s geobserveerd. De maximale stroomsnelheden treden op ter hoogte van Renesse waar de geul ingeklemd ligt tussen de Gloeiende Plaat en de kust en een minimale geuldoorsnede heeft. De stroomsnelheden nemen richting de Brouwersdam sterk af. Relatief hoge stroomsnelheden worden ook geobserveerd ten zuiden van de Bollen van de Ooster. In de voormalige geul Kous liggen de stromingen rond 0,6-0,7 m/s. Op het westelijk deel van de Middelpaat zijn de stromingen noordoostelijk gericht met stroomsnelheden tussen de 0,4 en 0,5 m/s. Direct voor het strand Brouwersdam is de stroomsnelheid lokaal iets hoger (0,5-0,6 m/s). Ten noorden hiervan, in de luwte van de Bollen van de Ooster zijn de stromingen beperkt (0,1-0,2 m/s). Eigenlijk blijven gedurende de gehele vloedperiode de stromingen in het gebied tussen Middelpaat, Bollen van de Ooster en de kust van Goeree beperkt. Alleen rond de kop van Goeree nemen de stromingen langs kust toe. Met toenemende waterstand nemen ook de stromingen over de Bollen van Kijkduin toe en zijn er tijdens hoogwater (16:20) stroomsnelheden tot 0,8 m/s aanwezig.



Figuur 5.1: Overzicht van het verloop van de stromingen in de monding van de Grevelingen voor 5 geselecteerde tijdstappen in het getij. In Appendix B.3 worden aanvullende figuren van de stromingen getoond.

Rond 18:50 treedt kentering van de stroming in het Brouwershavensche Gat op. De stromingen op de diepere Noordzee zijn dan nog noordelijk gericht. Er volgt dan een lange periode met kleine snelheden in de monding. Twee uur later worden de maximale ebstromingen in het Brouwershavensche Gat geobserveerd. Deze zijn met een snelheid tot 0,8 m/s lager dan die tijdens vloed. In de gehele monding zijn de ebsnelheden significant lager dan de vloodsnelheden. Op dit tijdstip zijn de stromingen in de Noordzee ook zeer beperkt. Pas rond 23:50 worden hier de maximale stroomsnelheden bereikt. In de monding zijn de stromingen dan nihil.

De belangrijkste inzichten uit deze modellering zijn:

- Snelheden tijdens vloed zijn hoger dan tijdens eb. De monding is vloed-gedomineerd.
- Grootste snelheden worden geobserveerd in het Brouwershavensche Gat, zeewaarts van Renesse.
- Stroomsnelheden langs de Brouwersdam en ten noorden van de Middelpaalt zijn beperkt.
- Netto is de stroming in de monding van zuid naar noord gericht.

5.1.2 Invloed van golven

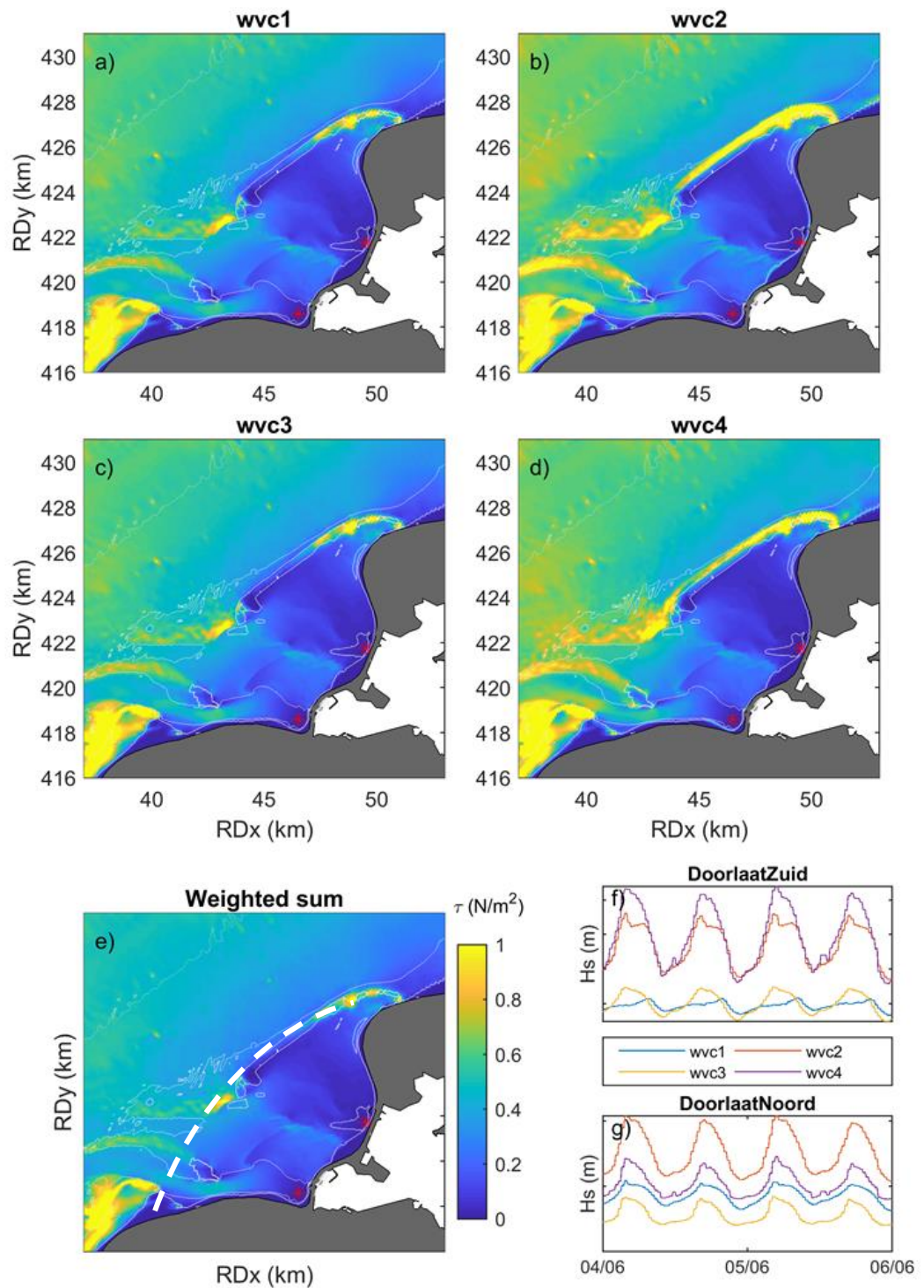
Golven zijn om een aantal redenen van belang. Het meest zichtbare effect van golven is het genereren van stroming en het opwoelen van sediment tijdens golfbreking. Deze golfbreking treedt op langs de eilandkusten en op ondieptes (zoals de Bollen van de Ooster) waar de waterdiepte kleiner is dan de kritische waterdiepte voor golfbreking. Een reductie van golven treedt ook op door bodemwrijving. Ten zuiden van de Bollen van de Ooster zijn grote bankcomplexen zichtbaar. Deze banken liggen wel onder water, maar veroorzaken veel bodemwrijving, waardoor de golven hier energie verliezen.

In Figuur 5.2 is het effect van de verschillende golfcondities gevisualiseerd aan de hand van de bodemschuifspanningen. In deze figuur zitten zowel de bodemschuifspanningen van het getij als van de golven. Het verschil tussen de figuren geeft een indicatie van het effect van golven. Onder hogere golven zijn de bodemschuifspanningen duidelijk hoger dan tijdens lagere golfcondities. Deze figuur geeft ook de afscherpende werking van de Bollen van de Ooster op het noordelijke deel van het mondingsgebied weer. De Bollen van de Ooster zijn een efficiënte golfbreker; zie de gele kleuren in Figuur 5.2, waardoor de golfenergie (en ook de bodemschuifspanning) in het achterliggende gebied tot vrijwel nul reduceert. In het gebied tussen de Bollen van de Ooster, de noordrand van de Middelpaalt en de kust is de bijdrage van golven aan de bodemschuifspanning vrijwel nul. Hier zullen golven dan ook nauwelijks bijdragen aan de sedimenttransporten.

Golfdissipatie en een vergroting van de bodemschuifspanning treden ook op de ondieptes ten zuiden van de Bollen van de Ooster en de Banjaard op. Doordat hier geen continue bank, maar verschillende bankcomplexen met tussenliggende diepere delen aanwezig zijn, treedt hier wel een kleine doordringing van de golfenergie op. Op de achterliggende banken (o.a. de Middelpaalt) is dan ook een kleine verhoging van de bodemschuifspanning te zien.

Op basis van deze resultaten kan geconcludeerd worden dat getij het dominante mechanisme is voor de directe verplaatsing van sediment in het landwaartse deel van de monding, ten oosten van de lijn die over de Bollen van de Ooster kan worden getrokken (zie Figuur 5.2e).

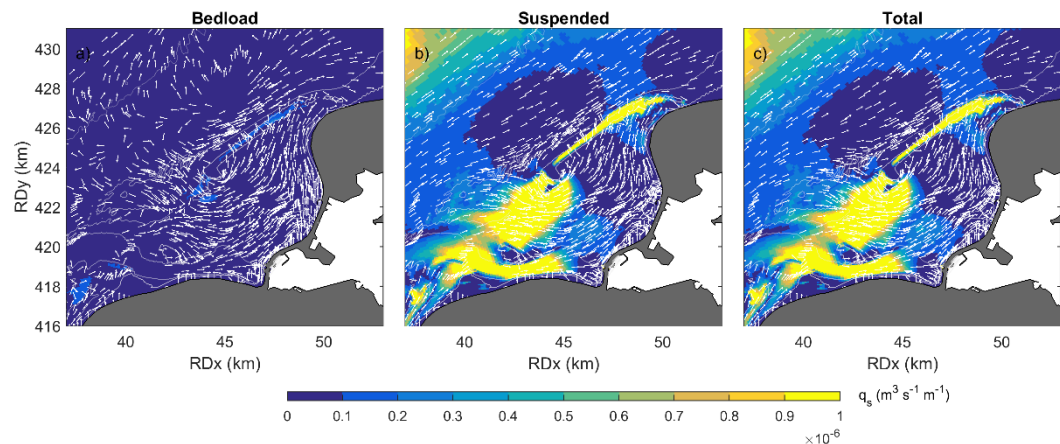
Hierbij moet opgemerkt worden dat deze analyse is uitgevoerd op basis van de morfologisch representatieve condities. Dit wil niet zeggen dat golven nooit een rol kunnen spelen in de monding. Incidenteel, bijvoorbeeld tijdens zeer grote stormen en hoge setup van de waterstand zullen golven wel degelijk kunnen doordringen tot in de monding en morfologische verandering veroorzaken. Dit effect wordt in de gevolgde aanpak niet meegenomen.



Figuur 5.2 (a-d): Overzicht van de invloed van de golven op de bodemschuifspanning voor de 4 golfcondities (wvc1: $H_{rms}= 1,5m$ en $H_{dir}= 250^\circ$; wvc2: $H_{rms}= 3,39m$ en $H_{dir}= 250^\circ$; wvc3: $H_{rms}= 1,17m$ en $H_{dir}= 358^\circ$; wvc4: $H_{rms}= 3,01m$ en $H_{dir}= 349^\circ$), (e) jaarlijks-gemiddelde bodemschuifspanning en (f) golfhoogte voor het noordelijke en zuidelijke doorlaatmiddel.

5.1.3 Sediment transporten

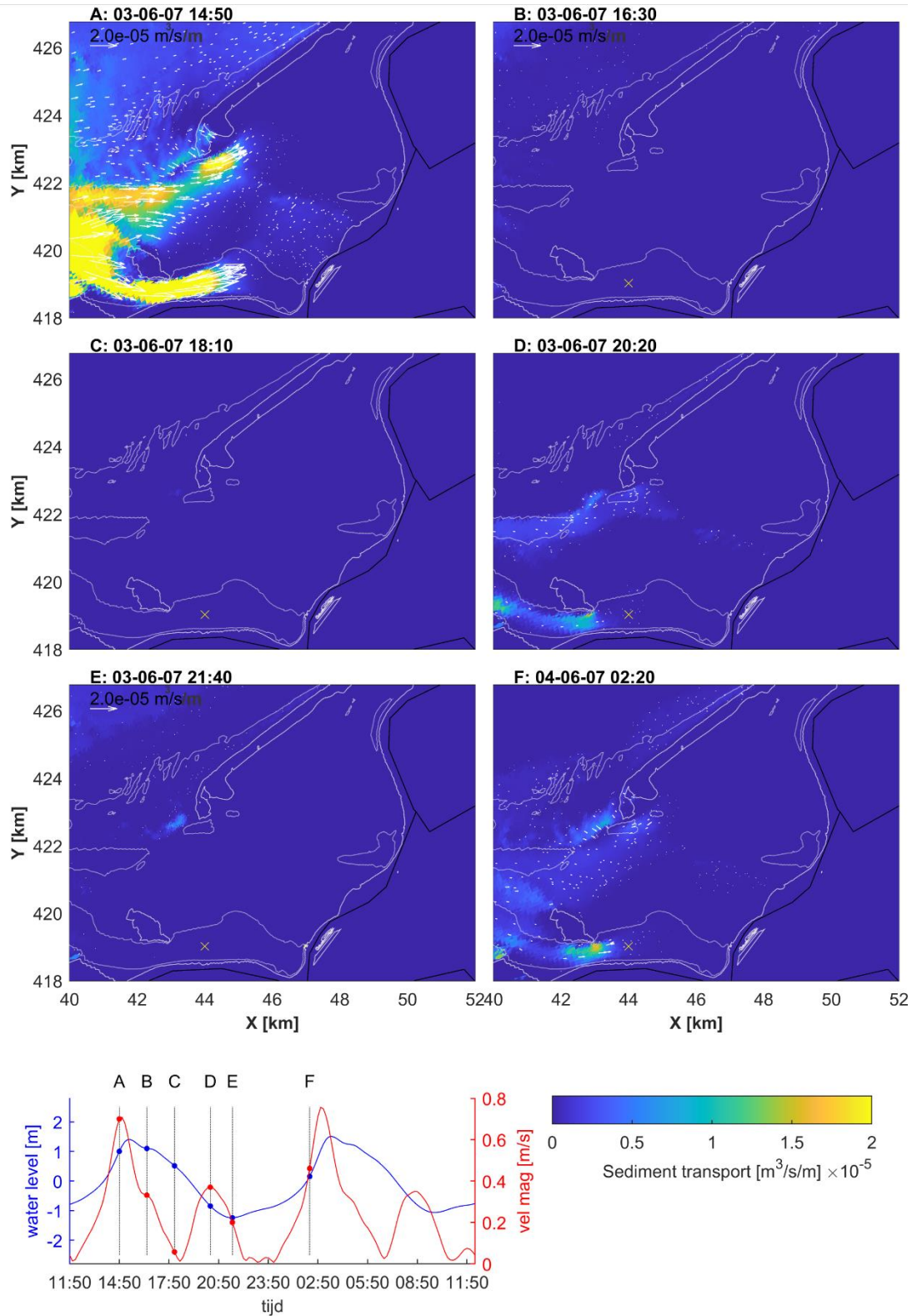
De Van Rijn transportformule wordt gebruikt om de sedimenttransporten uit te rekenen. Deze formule berekent zowel de transporten nabij de bodem (bed-load) als de transporten in de waterkolom uit (suspended load). Figuur 5.3 laat zien dat voor zand met een diameter van 200 μm de suspended-load transporten domineren. De bed-load transporten zijn kleiner dan 10% van de suspensietransporten. De transportvectoren sluiten aan bij de (vloed)stromingsvelden met netto een landwaarts transport via het Brouwershavensche Gat en over de Kous. In het Brouwershavensche Gat worden deze transporten gedomineerd door het getij. Op de naastliggende banken zijn ook golven van belang. Op de Bollen van de Ooster spelen zowel golven als getij een rol. Aan de zeezijde is een netto transport noordwaarts aanwezig. Op de bank zijn de residuele transporten zeewaarts gericht. Dit komt doordat er alleen tijdens hoogwater een door de vloedstroming geïnduceerd transport over de Bollen heen plaats vindt. Doordat er geen ebtransport optreedt ontstaat zo een relatief groot residueel transport. Transporten in de luwte van de Bollen van de Ooster zijn zeer beperkt.



Figuur 5.3 (van links naar rechts): Een overzicht van de residuele bed-load, suspended load en totale sediment transporten. Vectoren geven alleen de richting aan, de grootte is zichtbaar in via het kleurschema.

De instantane transporten worden gedomineerd door de vloedstromingen (Figuur 5.4). Tijdens de maximale vloedstromingen wordt het grootste sedimenttransport opgewekt (Figuur 5.4, A). In het Brouwershavensche Gat en op de ondiepten van Kous staat een landwaarts transport. Het landwaartse deel van de monding vertoont slechts een klein transport. Alleen op de Middelpaats is een netto noordelijk gerichte vector te onderscheiden. Transporten zijn minimaal tijdens het afgaande getij (B, C). Alleen bij maximale ebstroming (D) beginnen er weer transporten te ontwikkelen. Ook hier concentreren deze transporten zich in de uitstroom van het Brouwershavensche Gat en in de geul net ten zuiden van de Bollen van de Ooster. Op basis van deze transportbeelden en het netto transport kan geconcludeerd worden dat in de T0 simulatie de monding netto zand invangt, waarbij de grootste transporten optreden richting het Brouwershavensche Gat. Dit beeld correspondeert met de geobserveerde aanzanding van de geul.

De relatief grote stromingen en transporten door het Brouwershavensche Gat geven ook een verklaring voor de hier geobserveerde erosie van de naastgelegen kustlijn. Het Brouwershavensche Gat verzorgt voor een groot deel het vullen en ledigen van het mondingsgebied gelegen tussen de Bollen van de Ooster en de kust. In de geul staat nog steeds een relatief hoge stroomsnelheid die sediment effectief kustlangs kan afvoeren.

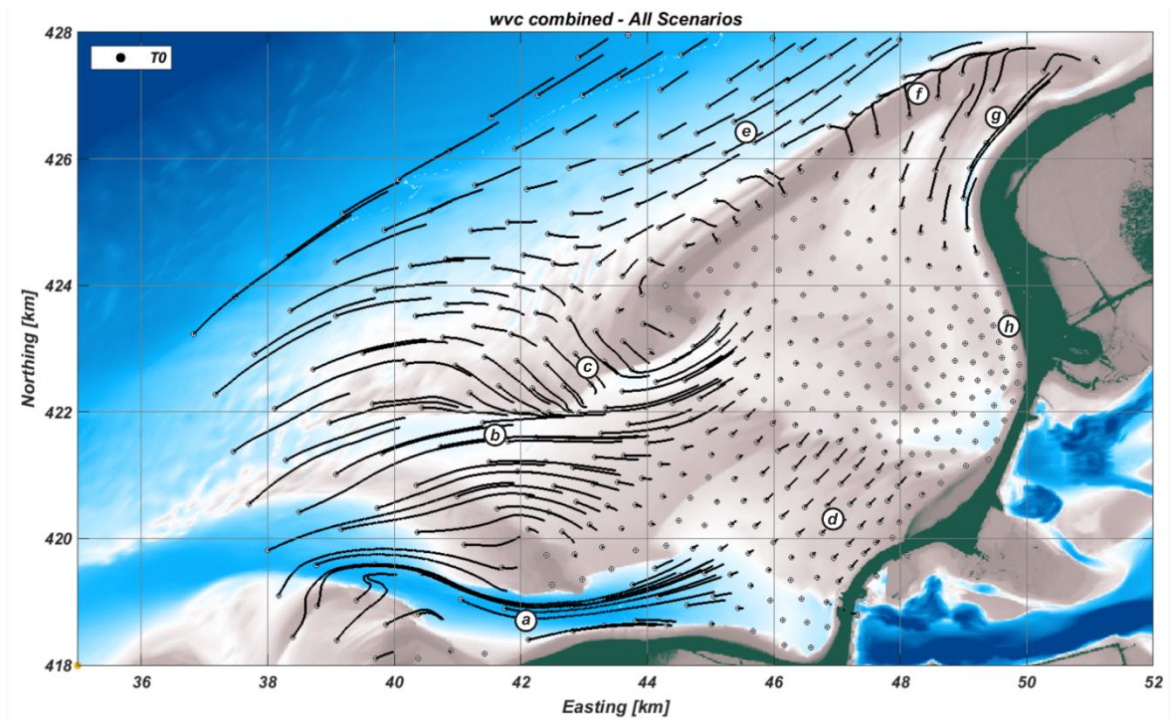


Figuur 5.4: Overzicht van het verloop van de instantane sedimenttransporten in de monding van de Grevelingen voor 6 geselecteerde tijdstappen in het getij (zie onderste deelfiguur). De tijdserie geeft het verloop van de waterstand en snelheid in het Brouwershavensche Gat (x-km: 44, y-km: 419).

5.1.4 Transportpaden

De monding van de Grevelingen is in principe al lange tijd in evenwicht met de hydrodynamische processen. Direct na afsluiting was dit zeker niet het geval en hebben zich grote initiële aanpassingen van de geulen en platen voorgedaan. Na deze initiële aanpassing is de monding min of meer in evenwicht met de processen. Dit wil niet zeggen dat er geen morfologische verandering optreedt. Er vindt nog steeds een aanpassing plaats, zoals landwaartse verplaatsing van de platen, alleen deze aanpassing gebeurt gelijkmatig en langzaam. De netto transporten domineren nu de ontwikkeling. Op basis van de netto transporten is het lastig de sedimenthuishouding goed te begrijpen. Hiervoor geven figuren zoals Figuur 5.3 en Figuur 5.4 te weinig inzicht.

De processen kunnen beter inzichtelijk gemaakt worden door een SedTRAILS analyse van de T0 simulatie (Figuur 5.5). Deze analyse gebruikt de jaargemiddelde sedimenttransporten als basis en visualiseert dan op basis van deze transporten hoe de sedimenttransporten er over langere termijn uitzien. De jaargemiddelde transporten bevatten de invloed van getij en de invloed van een gemiddeld golfklimaat. De lengte van de simulatie heeft geen kwalitatieve waarde. De SedTRAILS analyse wordt zo lang doorgezet dat er analyseerbare patronen uitkomen. Het verschil in lengte van de vectoren heeft wel een betekenis. Lange transportpaden betekent dat het sediment zich sneller verplaatst dan bij een korter transportpad.



Figuur 5.5: Sedimenttransport paden representatief voor de T0 situatie

Het T0 transportpatroon wordt weergegeven in Figuur 5.5 in onderstaande analyse refereren a tot en met h naar de labels in deze figuur. De transporten laten zien dat sediment transport op de Voordelta van zuidwest naar noordoost beweegt. Sediment wordt aangevoerd langs de kust van Schouwen het Brouwershavensche Gat in. In het Brouwershavensche Gat beweegt het sediment dan in oostelijk richting naar de Brouwersdam (a), waar het bijdraagt aan de invulling van deze geul. In het Brouwershavensche Gat treden de grootste stromingen en transporten op. Deze veroorzaken erosie van de aanliggende kustlijn. Sediment toevoer treedt ook op over de banken van de Kous / Gloeiende Plaat (b) en ten zuiden van de Bollen van de Ooster (c). Deze transportpaden corresponderen met de morfologische veranderingen die hier

optreden. Op de Middelplaat treedt er een noordelijk gericht transport op (d). Dit komt overeen met het in deze richting opschuiven van de Middelplaat.

De Bollen van de Ooster vormt een effectieve scheiding tussen de transporten op zee en in de monding. In het achterliggende mondingsgebied zijn de transporten beperkt. Aan de zeezijde vormt zich een noordoostelijk gericht transport langs de Bollen van de Ooster (e). Op het noordelijke deel van de Bollen van de Ooster worden de transportpaden complexer. In dit deel vindt zowel noordoostelijk gericht transport langs de Bollen plaats, maar ook een zeewaarts transport vanuit het bekken over de Bollen heen (f). Langs de kust van Goeree, nabij de Brouwersdam, zijn de transporten klein (h), maar deze nemen sterk toe vanaf de westkop (g) richting de kop van de Bollen van de Ooster. Hier vindt dan ook relatief veel erosie plaats en zijn suppleties nodig om de BKL te behouden. De SedTRAILS visualisatie laat goed zien dat de erosie tussen de Kop van de Bollen van de Ooster en de kustlijn niet direct samenhangt met de transporten door de Schaar (g). Alle deeltjes worden vanuit Schaar over de Bollen van de Ooster heen getransporteerd. De erosieproblematiek van de Schaar is een lokaal effect: door het samendrukken van de stroming ontstaat hier een ontgrondingsgeul.

5.2 Modelresultaten voor de T1 simulatie: doorlaatmiddel Zuid

5.2.1 Stromingen en sedimenttransport

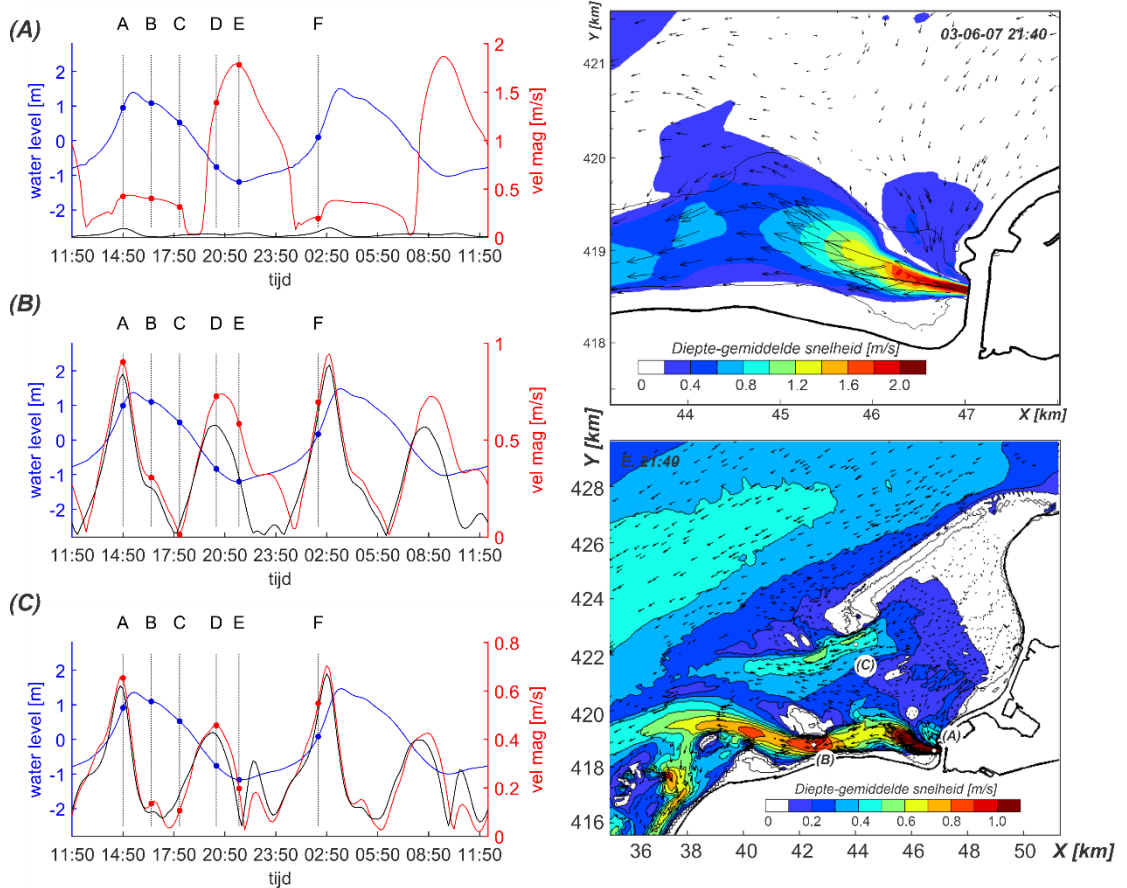
Het aanbrengen van het zuidelijke doorlaatmiddel geeft twee effecten die een invloed hebben op de sedimenthuishouding van de monding. Ten eerste ontstaat er een grote stroming en sediment transport direct voor het doorlaatmiddel. Deze stroming is het grootst bij maximale uitstroming door het doorlaatmiddel en strekt zich dan ver zeewaarts uit, het Brouwershavensche Gat in (Figuur 5.6 en Appendix B.4, Figuur B- 19 en Figuur B- 20). De stroming is maximaal ter plaatse van het doorlaatmiddel, behoudt een grote snelheid ($> 1,5$ m/s) over een afstand van ongeveer 800 m en neemt dan af naar snelheden tussen de 0,5 en 1,0 m/s in het zeewaartse deel van het Brouwershavensche Gat (op 1,5 km tot het doorlaatmiddel).

Ook buiten de uitstroomjet zijn er verschillen in het stromingsveld te onderscheiden. In het grootste deel van de monding zijn deze verschillen echter beperkt (Appendix B.4, Figuur B- 19, Figuur B- 21, Figuur B- 22 en Figuur B- 23). De grootste invloed is zichtbaar in het Brouwershavensche Gat (Figuur 5.6, Tijdsree B). Tijdens vloed zijn de stromingen hoger dan tijdens eb, maar de invloed van het doorlaatmiddel op de vloedstroming is beperkt ($< 0,1$ m/s). Tijdens eb zijn de stromingen kleiner, maar de verschillen groter. Door aanleg van het doorlaatmiddel zijn de snelheden gedurende de ebperiode hoger dan die in de T0 situatie. Deze vergroting van de stromingen geeft aan dat het merendeel van de ebdebieten door het Brouwershavensche Gat uitstroomt. De beïnvloeding op de schaal van de monding is beperkt. Alleen ten zuiden van de Bollen van de Ooster (Figuur 5.6, Tijdsree C en Appendix B.4, Figuur B- 19 en Figuur B- 22) is een beïnvloeding van de stromingen zichtbaar. Deze beïnvloeding geeft aan dat de stroming dus niet alleen beïnvloed wordt in de uitstroomjet, maar dat ook buiten deze jet veranderingen optreden.

De veranderingen in snelheden veroorzaken grote sedimenttransporten in het Brouwershavensche Gat. In de uitstroomjet treden de grootste zeewaarts gerichte transporten (Figuur 5.7, D-E). In de bodem was al een schatting van de ontgrondingskuil aangebracht, op basis van de grote zeewaartse transporten is het waarschijnlijk dat deze ontgrondingskuil nog verder zal eroderen. Op basis van de uitstrekking van de uitstroomjet zou de geulvorming zich tot x-km 45 kunnen doorzetten. Het is dan ook waarschijnlijk dat er erosie van het naastgelegen Recreatiegebied Strand Renesse zal optreden. Naast jetvorming en de daarbij behorende geulverdieping vergroot het doorlaatmiddel ook de ebdebieten die door het Brouwershavensche Gat zeewaarts stromen. Dit vergrote debiet zorgt voor een groter

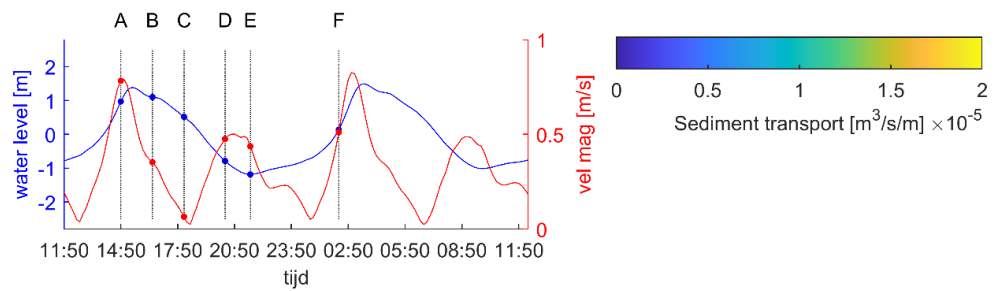
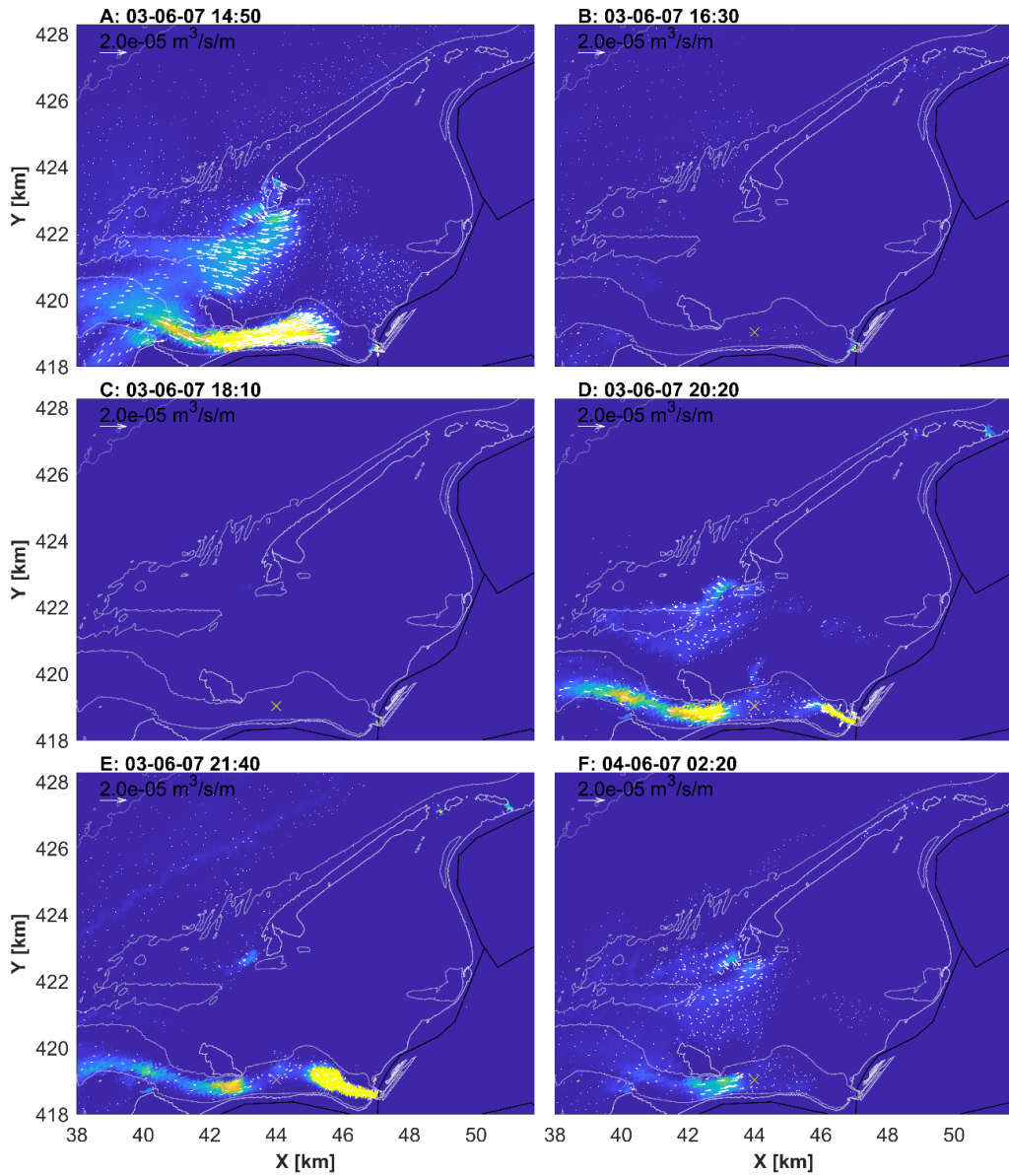
transporten rond x-km 42 (Figuur 5.7, D-E). Doordat het zuidelijke doorlaatmiddel direct aansluit op het Brouwershavensche Gat zorgt deze geul voor vrijwel de gehele uitstroming vanuit het doorlaatmiddel zeewaarts gaat en vindt er vrijwel geen uitwisseling plaats met het gebied ten noorden hiervan. Tijdens eb is de invloed van de Zuidelijke doorlaat dan ook beperkt.

Tijdens vloed (Figuur 5.7, A) wordt een groter deel van het mondingsgebied beïnvloed al zijn de transporten dan wel kleiner. In tegenstelling tot de ebstroming treedt er tijdens maximale vloedstroming geen extra transport op direct voor het doorlaatmiddel. De grootste verschillen treden hier in het zeewaartse deel van het Brouwershavensche Gat en in het gebied tussen de zuidelijke punt van de Bollen van de Ooster en het Brouwershavensche Gat op.



Figuur 5.6: Invloed van de uitstroombet op de stroomsnelheden in de monding. Rechtsboven: Maximale ebstroming door het zuidelijke doorlaatmiddel. Rechtssonder: Grootschalig beeld van de stroming in de monding, waarin A-C geeft de ligging van de meetpunten gebruikt in de tijdseries van snelheden en waterstanden aan de rechterzijde van de figuur. De zwarte lijn geeft de resultaten van de T0 simulatie en de rode lijn die van de Z1. In Appendix B.4 worden aanvullende stromingsfiguren weergegeven.

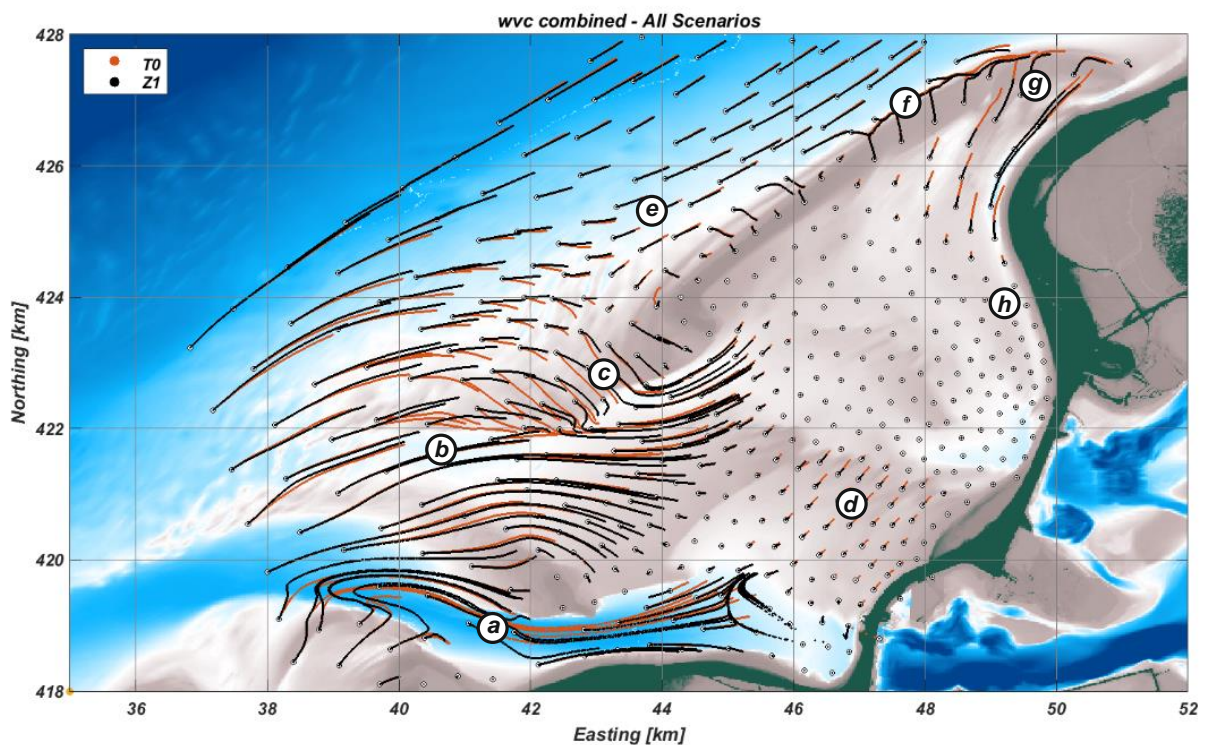
Een simulatie met een zelfde locatie van het doorlaatmiddel maar met een meer noordelijk gerichte uitstroom van het doorlaatmiddel resulteren niet in een significante verandering van de patronen. Ook in deze simulatie volgt de stroming het Brouwershavensche Gat waardoor er grotere stroomsnelheden langs de kust optreden.



Figuur 5.7: Verschil in sedimenttransport tussen de T0 en Z1 simulatie gedurende de getijperiode ingezoomd op de locatie van het doorlaatmiddel. Zie Appendix B.4 voor detailfiguren van de sedimenttransporten (Figuur B- 24 - Figuur B- 28).

5.2.2 Transportpaden

De SedTRAILS resultaten geven een goed beeld wat de beïnvloeding van de instantane transporten betekent voor de sedimenthuishouding van de gehele monding (Figuur 5.8). Een belangrijke observatie is dat de SedTRAILS resultaten ter plaatse van het doorlaatmiddel, in de uitstroomjet geen transportpaden weergeeft. Dit betekent niet dat er geen transport plaatsvindt, maar juist dat er een zeer groot netto transport optreedt. De deeltjes worden vrijwel direct zeewaarts getransporteerd, waarna ze ter hoogte van Renesse noordelijk afbuigen de Middelplaat op. Er blijven dan geen deeltjes over om de transportpaden weer te geven. In het Brouwershavensche Gat (a) is wel een beïnvloeding van de instantane transporten te observeren. In de T0 vindt er een duidelijk landwaarts transport plaats. Door aanleg van het doorlaatmiddel neemt dit landwaarts transport af. Er ontstaat een convergentiezone rond km 45, waar zeewaarts transport vanaf het doorlaatmiddelen landwaarts transport door het Brouwershavensche Gat samenkomen. Hier zou dan initieel drempelvorming kunnen optreden. Een duidelijk verschil treedt ook op de Middelplaat (d). De noordwaartse transporten die nog aanwezig waren zonder doorlaatmiddel worden sterk gereduceerd. Deze ontwikkeling laat zien dat het Brouwershavensche Gat belangrijker wordt in de getijuitwisseling. Dit reduceert de uitwisseling met het noordelijke deel van de monding via de Middelplaat.



Figuur 5.8: Sedimenttransport patronen representatief voor de jaargemiddelde condities voor de T0 situatie (rood) en het zuidelijke doorlaatmiddel (zwart).

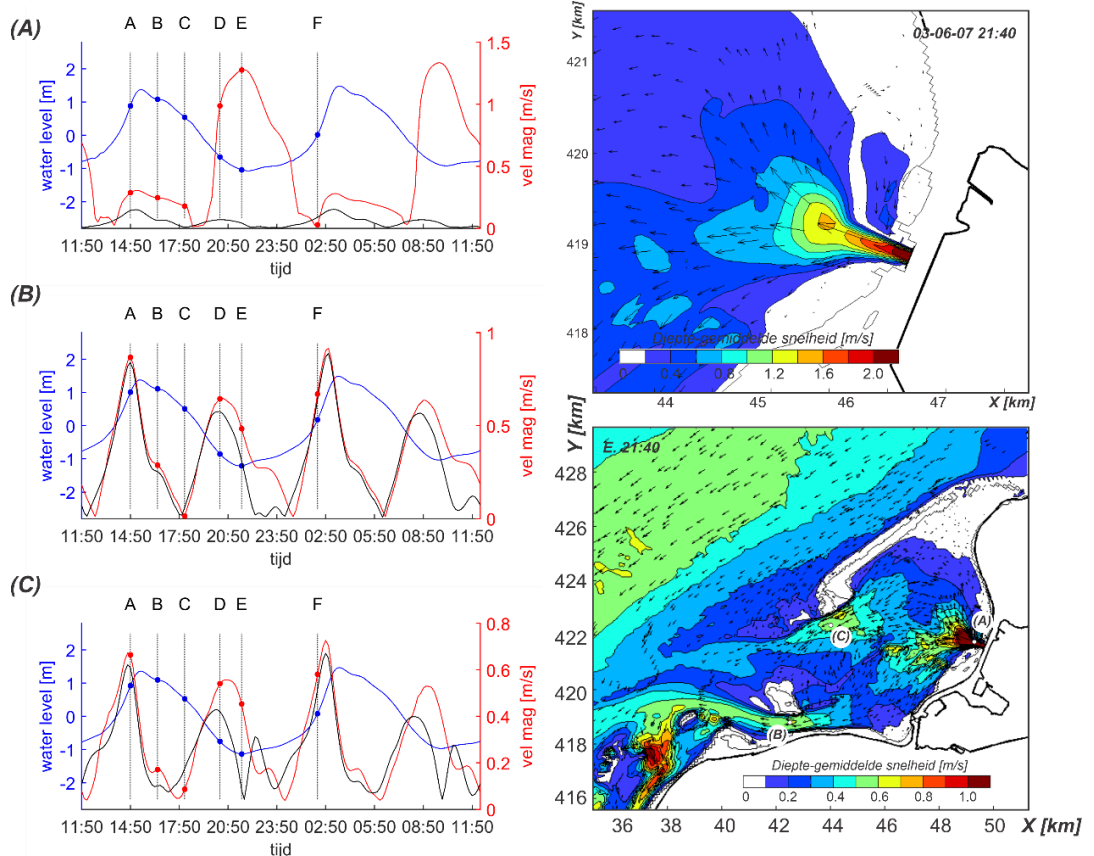
Op de Kous (b) treden kleine veranderingen in de transportgrootte op. De transportpaden zijn hier vrijwel identiek alleen met doorlaatmiddel vindt er wel iets meer landwaarts transport plaats. Deze verandering is waarschijnlijk niet een direct effect van de stroming door het doorlaatmiddel, maar is het resultaat van een kleine wijziging van de grootschalige getijbeweging door het aanbrengen van het doorlaatmiddel. Door toevoeging van het doorlaatmiddel verandert de getijbeweging in de gehele monding. Dit heeft dan vooral een effect bij het vullen en ledigen van het mondingsgebied. De grootste verschillen door dit effect treden op rond de zuidelijke punt van de Bollen van de Ooster (c). In de ondieptes ten zuiden hiervan blijft de grootte ongeveer gelijk, maar zijn de transportpaden iets zuidelijker gericht. Langs de Noordzeezijde van Bollen van de Ooster blijven de transporten noordelijk gericht. Hier zijn de verschillen beperkt. Op basis van deze kleine verschillen is het niet waarschijnlijk

dat de Bollen van de Ooster zullen veranderen na aanleg van het doorlaatmiddel. Ten zuiden van de Bollen, op de ondiepe platen (b, c) kunnen wel kleine wijzigingen optreden. Het vullen en ledigen van het bekken vindt meer via het zuidelijk deel van de monding plaats dan langs de Schaar en de westkop van Goeree (g). De transporten nemen hier dan ook in grootte af. Waarschijnlijk zal deze afname geen grote verschillen geven in de erosie die hier optreedt.

5.3 Modelresultaten voor de T1: doorlaatmiddel Noord

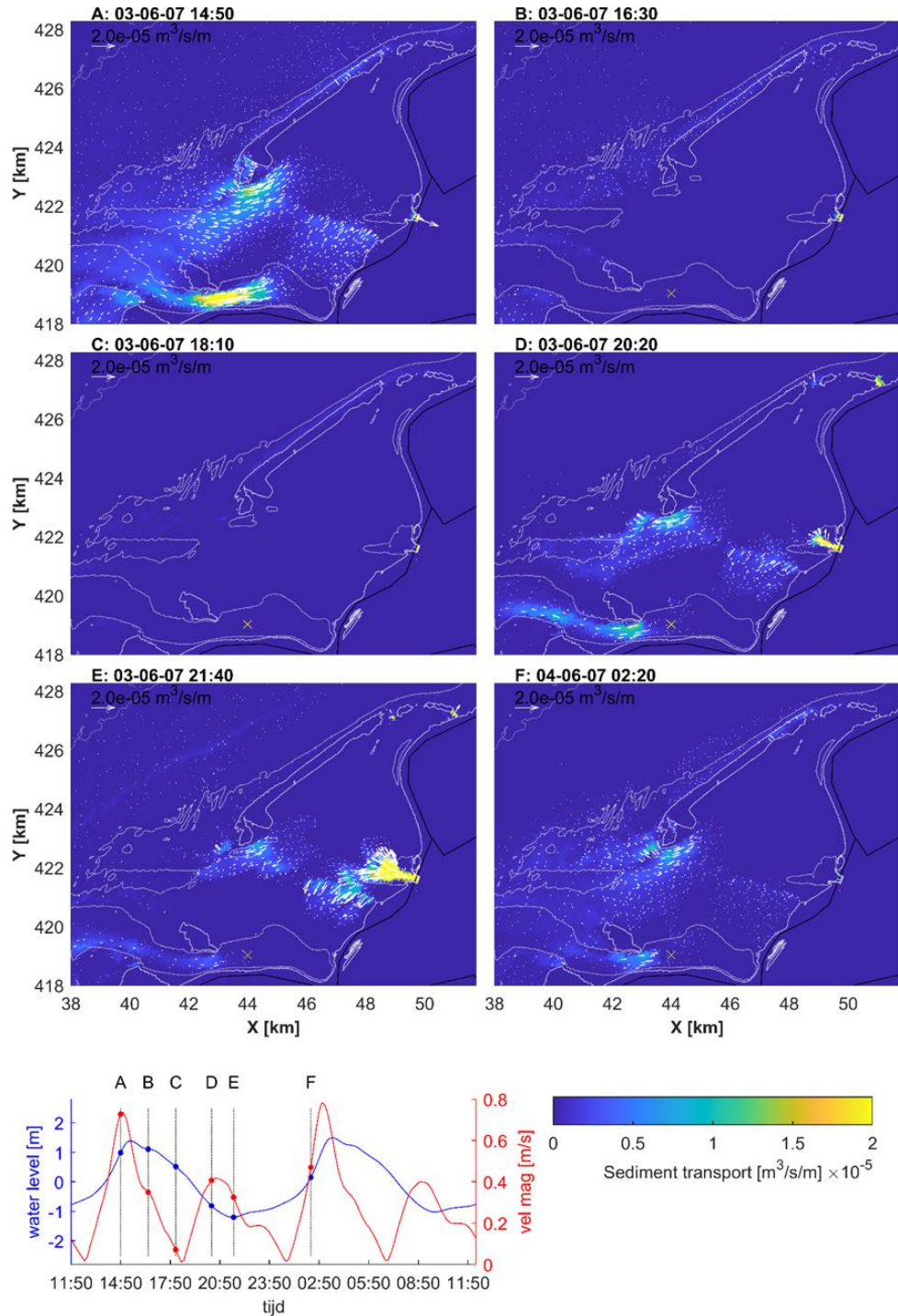
5.3.1 Stromingen en sedimenttransport

De effecten van het aanbrengen van het noordelijke doorlaatmiddel zijn in principe gelijk aan die van de zuidelijke doorlaat. Ten eerste ontstaat er een grote stroming en transport direct voor het doorlaatmiddel (Figuur 5.9, Appendix B.5 Figuur B- 29, Figuur B- 30). Deze stroming is het grootst bij maximale eb-uitstroming door het doorlaatmiddel en strekt zich dan zeewaarts uit (Figuur 5.9, boven). De stroming is maximaal ter plaatse van het doorlaatmiddel, behoudt een grote snelheid ($> 1,0$ m/s) over een afstand van ongeveer 900 m zeewaarts van de het doorlaatmiddel. Aan het einde van deze jet waaiert de stroming uit en neemt sterk af. De stroming ten noorden van het doorlaatmiddel (Goeree zijde) is daarbij wat lager dan de stroming ten zuiden van het doorlaatmiddel de Middelplaat op. Aan de noordzijde ontstaat wel een grote circulatie, maar de stromingen zijn te zwak om hier sedimenttransport te genereren (Figuur 5.10). Op de Middelplaat zijn de stromingen wel sterk genoeg en ontstaat er tijdens maximale eb een zuidelijk gericht transport (Figuur 5.9, rechtsonder). Over een afstand van ongeveer 1,5 km zijn de snelheden hoger dan 0,5 m/s.



Figuur 5.9: Invloed van de uitstroombet op de stroomsnelheden in de monding. Rechtsboven: Maximale ebstrooming door het noordelijke doorlaatmiddel. Rechtsonder: Grootchalig beeld van de stroming in de monding, waarin A-C geeft de ligging van de meetpunten gebruikt in de tijdseries van snelheden en waterstanden aan de rechterzijde van de figuur. In Appendix B.5 worden aanvullende stromingsfiguren weergegeven.

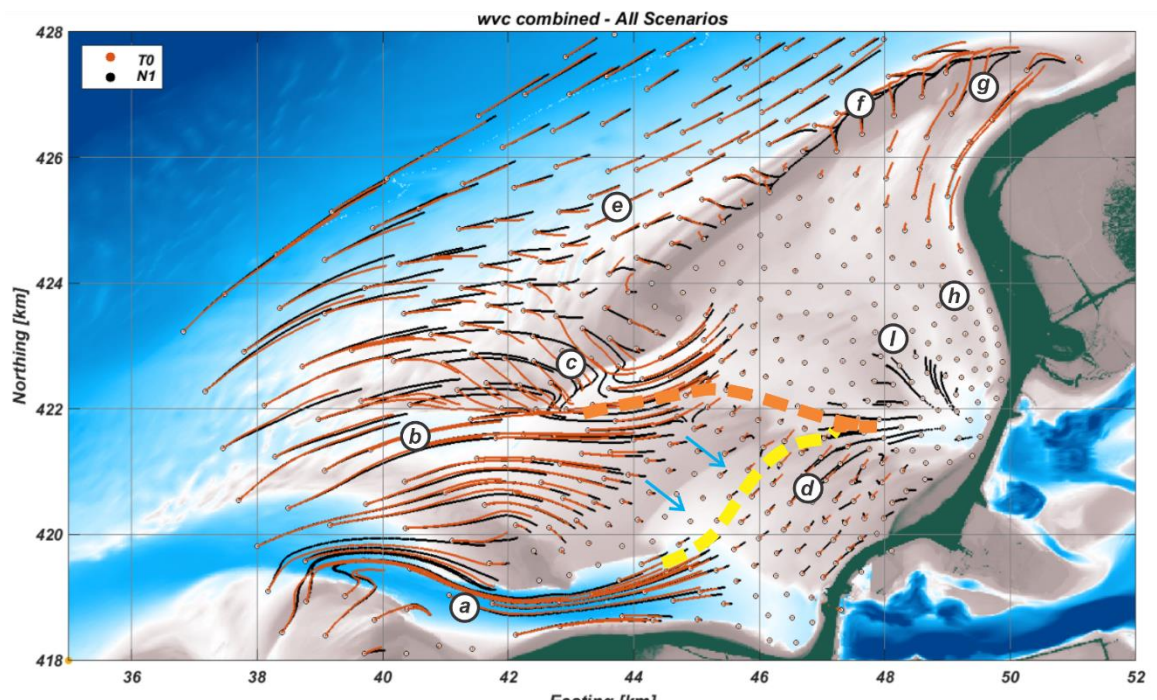
Ook buiten de uitstroomjet zijn er verschillen in het stromingsveld te onderscheiden. Naast beïnvloeding van de Middelplaat zijn kleine verschillen aanwezig ten zuiden van de Bollen van de Ooster (Figuur 5.9, tijdserie C; Appendix B.5, Figuur B- 33) en grotere verschillen in het Brouwershavensche Gat (Figuur 5.9, B; Appendix B.5, Figuur B- 32). Deze gebieden zijn eigenlijk vergelijkbaar met de gebieden die ook door het zuidelijke doorlaatmiddel werden beïnvloedt. Ook bij het noordelijke doorlaatmiddel lijkt het merendeel van het spuidebiet via de Middelplaat en het Brouwershavensche Gat te worden afgevoerd. De snelheden in het Brouwershavensche Gat zijn dan wel iets lager dan die bij de zuidelijke variant.



Figuur 5.10: Verschil in sedimenttransport tussen de T0 en N1 simulatie gedurende de getijperiode in de monding.

5.3.2 Transportpaden

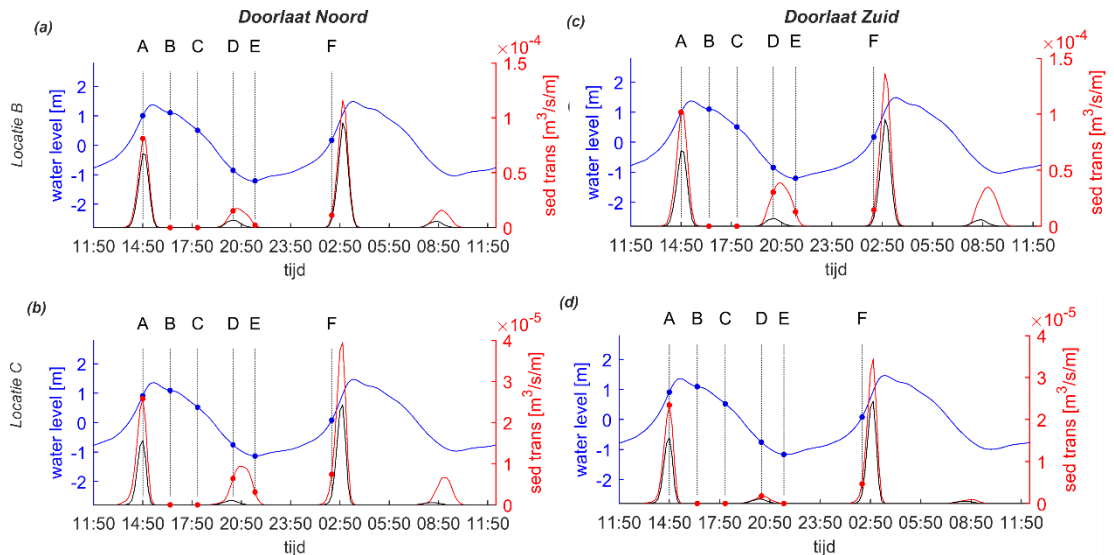
De geobserveerde veranderingen in instantane transporten zijn ook in de SedTRAILS resultaten herkenbaar. Nabij het doorlaatmiddel vindt een beperkt transport plaats de voorliggende bank Aardappelenbult (i) op. Waarschijnlijk zal een deel van het sediment hier dan ook naar toe verplaatsen en sedimenteren. Er is geen aanwijzing dat er geulvorming in deze richting optreedt. Ook treedt er geen transport op richting Schaar en de kust van Goeree (g). Transporten vanuit het doorlaatmiddel lijken vooral een effect te hebben op het zuidelijke deel van de monding. De transporten volgen initieel de oude geul Kous (b) en ook de transporten over de Middelplaat nemen toe (d). Op basis van deze patronen lijkt de vorming van een doorgaand transportpad tussen Brouwershavensche Gat en Kous een mogelijkheid (gele lijn). Dit transportpad zal in eerste instantie niet resulteren in duidelijke geulvorming, hiervoor zijn de snelheden en transporten te laag. Er zal hier wel een ondiep bankgebied aanwezig blijven. Op langere termijn is het waarschijnlijk dat de Gloeiende Plaat verder landwaarts migreert. Dit kan er dan voor zorgen dat stroming over de Middelplaat hydraulisch minder efficiënt wordt. Er kan dan een transportpad via Kous richting de zuidpunt van de Bollen van de Ooster ontstaan (oranje lijn).



Figuur 5.11: Sedimenttransport patronen representatief voor de jaargemiddelde condities voor de T0 situatie (rood) en doorlaatmiddel Noord (zwart).

5.4 Een samenvatting van de verschillen in sedimenttransport voor de twee locaties.

Naast transporten direct in de buurt van het doorlaatmiddel zijn voor beide varianten ook veranderingen in transporten zichtbaar rond de Bollen van de Ooster en in het Brouwershavensche Gat. Deze veranderingen zijn samengevat in Figuur 5.12 voor twee representatieve punten weergegeven (zie locatie in Figuur 5.9). Let op het verschil in grootte van de transporten. De transporten in het Brouwershavensche Gat (locatie B) zijn veel hoger dan de transporten ten zuiden van de Bollen van de Ooster (locatie C).



Figuur 5.12: Invloed van doorlaatmiddel Noord op het sedimenttransport in het Brouwershavensche Gat (locatie B) en ten zuiden van de Bollen van de Ooster (locatie C) voor het doorlaatmiddel Noord (a,b) en doorlaatmiddel Zuid (c,d). Zie locatie in Figuur 5.9.

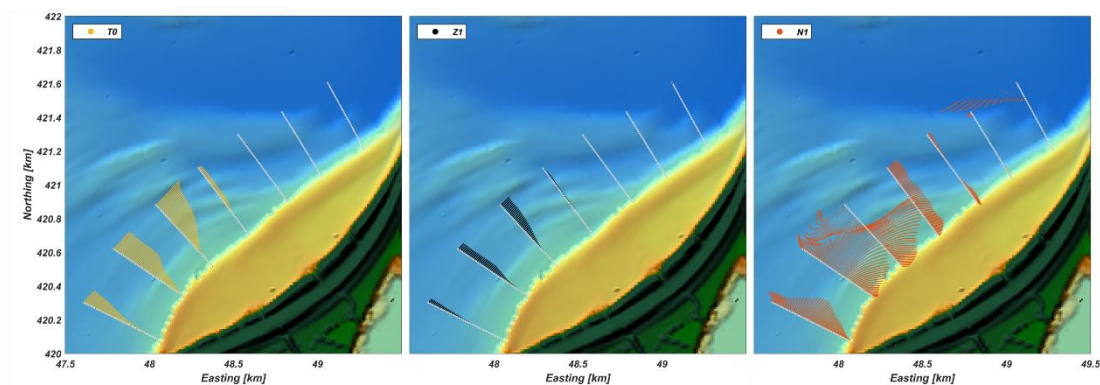
De tijdseries van sedimenttransport geven in alle deelfiguren een vergelijkbaar beeld met een grote piek in vloedgedomineerd sedimenttransport ((Figuur 5.12, tijdstip A) en een kleiner transport tijdens eb (tijdstip D). Deze asymmetrie zorgt voor een netto landwaarts transport in beide locaties (zie H3.1.4). Voor beide doorlaten geldt dat de stromingen toenemen na aanleg. De kleine toename van de vloedstroming (tijdstippen A en F) resulteert in een vrij grote toename van transport. Dit komt doordat de snelheden al hoog zijn en de sedimenttransporten ruwweg met een macht 5 reageren op de stromingssnelheid. Bij een hoge snelheid is er dus slechts een kleine toename van die snelheid nodig om de sedimenttransporten te vergroten. Bij beide doorlaten nemen de piek vloedtransporten toe. De vergroting van de vloedtransporten is bij de Bollen van de Ooster groter door het noordelijke doorlaatmiddel dan door de zuidelijke variant (Figuur 5.12b,d). In het Brouwershavensche Gat geldt het omgekeerde verhaal hier heeft doorlaatmiddel Zuid een groter effect dan doorlaatmiddel Noord (Figuur 5.12a, c).

De grootste relatieve toename van de transporten treedt op tijdens eb. Ook hier geldt dat het noordelijke doorlaatmiddel de grootste beïnvloeding uitoefent op de Bollen van de Ooster en het zuidelijke doorlaatmiddel op het Brouwershavensche Gat.

5.5 Invloed van het doorlaatmiddel op strand Brouwersdam

Een schatting van de effecten van het doorlaatmiddel op Strand Brouwersdam worden verkregen door een aanvullende SedTRAILS analyse. Vijfhonderd source points zijn hierbij geplaatst op de Middelplaat en langs het strand Brouwersdam en de verplaatsing is berekend op basis van de al aanwezige sediment transport resultaten. Deze resultaten geven niet direct een berekening van de sedimentatie of erosie maar op basis van de transportpaden kan wel inzicht worden verkregen hoe de processen eventueel veranderen na aanleg. Figuur 5.13 vat de inzichten samen door middel van een aantal geselecteerde raaien.

In de autonome situatie (T0) staat er een klein netto noordwaarts gericht transport over de Middelplaat en langs Strand Brouwersdam (Figuur 5.13, links). Dit transport neemt eerst toe en vervolgens weer af. Er wordt dus eerst sediment opgepikt en vervolgens weer afgezet in de diepere, noordelijke delen. Dit transport correspondeert met een netto noordelijke verplaatsing van de bank.



Figuur 5.13: Sedimenttransportpaden langs Strand Brouwersdam voor de T0, Z1 en N1 simulatie. In appendix B.4 worden aanvullende figuren getoond

Met aanleg van het zuidelijke doorlaatmiddel nemen de transporten af (Figuur 5.13, midden). De patronen blijven gelijk, maar de transporten langs de rand van het Strand Brouwersdam zijn waarschijnlijk iets lager dan in de T0 situatie. Het model suggereert dat er een grote afname in transportgrootte zal optreden. Deze afname is waarschijnlijk een overschatting, in werkelijkheid zullen de verschillen kleiner zijn. De simulaties zijn berekend met een jaargemiddeld representatieve forcering. Door de grote asymmetrie tussen vloed- en ebstroming speelt getij hierin een grote rol. Stranderosie van het Strand Brouwersdam zal ook sterk gedreven worden door golven tijdens extreme condities. Deze storm-gedreven erosie zal ook na aanleg van het doorlaatmiddel onveranderd doorgaan. Dit betekent dat de huidige morfologische ontwikkelingen zich ook na aanleg van het zuidelijke doorlaatmiddel zullen doorzetten. Zand verplaatst zich in de huidige situatie noordelijk langs de Brouwersdam en draagt dan bij aan het invullen van de voormalige getijgeulen. Dit invullen is niet direct zichtbaar langs de kustlijn waardoor het een verlies is van het strandareaal. Het zuidelijke doorlaatmiddel verandert dit proces niet. Het is dus waarschijnlijk dat de huidige veranderingen zich dan ook vrijwel onveranderd doorzetten.

Bij aanleg van het noordelijke doorlaatmiddel zijn de verschillen met de T0 veel groter en ontstaat een complex transportpatroon (Figuur 5.13, rechts). In de dwarsprofielen zijn de noordelijk gerichte transporten groter dan in de T0 en Z1 simulatie. Er zijn dus grotere langtransporten langs het strand Brouwersdam te verwachten. Dit is echter niet het gehele verhaal. Naast de grootte van de transporten wijken ook de patronen aanzienlijk af van de T0 situatie (zie Figuur 5.11 en Appendix B.6). Vanuit het doorlaatmiddel ontstaat een sedimenttransport in zuidelijke richting over het midden van de Middelplaat. Er ontstaat ook

een retourtransport langs het Strand Brouwersdam. Het is dus waarschijnlijk dat een deel van het sediment vanuit de geul juist richting de kust wordt teruggevoerd. Naast grotere verliezen treedt er ook een groter aanbod van sediment op. Hoe deze balans uitwerkt, of dit een netto groter verlies of juist een winst oplevert is op basis van deze simulaties niet te bepalen. Het is echter wel waarschijnlijk dat de aanleg van het noordelijke doorlaatmiddel kan bijdragen tot de vorming van een stabiel strand langs de Brouwersdam. Als onderdeel van het doorlaatmiddel wordt aan de zuidzijde een dam geconstrueerd die zeewaarts uitsteekt. Deze dam fungeert als een zandvang voor het netto noordwaarts transport en zal dit zand hier invangen. Soortgelijke processen vinden ook plaats bij de havenhoofden van bijvoorbeeld IJmuiden. Uiteindelijk ontstaat dan een opvulling tussen deze dam en de Brouwerdam. De grootte van deze opvulling hangt af van de lengte van de geleide dam. Het noordelijke doorlaatmiddel vormt in dit opzicht een kans om een stabiel Strand Brouwersdam te creëren. Dit strand is qua vorm en ligging dan wel duidelijk anders dan het huidige Brouwersstrand.

5.6 Zwemveiligheid

Op basis van de gemodelleerde snelheidsvelden kan een eerste (ruwe) inschatting gemaakt worden van de effecten van de doorlaten op de zwemveiligheid. Ten behoeve van deze analyse worden in Appendix B een overzicht van de snelheden voor verschillende fasen in het getij getoond. De snelheidsvelden laten eigenlijk alleen bij eb uitstroming een duidelijke toename van de stroomsnelheden zien. Deze toename concentreert zich vooral rond de uitstroom jet van de doorlaat (zie ook Figuur 5.6 en Figuur 5.9). Bij de zuidelijk doorlaat ontstaat een eb-jet die zich zeewaarts uitstrekt. Een duidelijke toename langs de stranden direct grenzend aan de doorlaat is hier niet te zien. De geleidedammen aan weerszijden van de doorlaten zorgen ervoor dat deze stromingen zich zeewaarts van de strandzone bevinden. Rond km.45 raakt de uitstroomjet de kust nabij het recreatiegebied Strand Renesse. Hier kunnen dan nog significant vergrote snelheden voorkomen. Zeewaarts hiervan nemen de stromingen wel iets toe, maar deze toename is beperkt.

Ter plaatse van de noordelijke doorlaat is er een duidelijke toename van de stroomsnelheden in de uitstroomjet. Ook hier lijkt de toename van de stroomsnelheden langs de stranden eerder beperkt. De geleide dammen zorgen ervoor dat de uitstroomjet zich zeewaarts bevindt van het strand. Bij deze analyse moet opgemerkt worden dat de lengte van de uitstroomjet waarschijnlijk niet goed gemodelleerd is. Er is een schatting van de bodem gemaakt. Gezien de hoge snelheden lijkt de diepte iets onderschat. Dit betekent dat er in werkelijkheid een diepere ontgrondingskuil vormt hierdoor neemt de lengte van de eb-jet dan ook af.

Conclusie.

De modelresultaten laten zien dat er een sterke ebjet ontstaat zeewaarts van de doorlaat. Hier nemen de stromingen dan ook sterk toe. Buiten deze directe invloedssfeer geven de resultaten geen directe indicatie dat stroomsnelheden langs de stranden sterk toenemen, waardoor zwemveiligheid nadelig beïnvloedt wordt.

Aanbeveling

Deze beknopte analyse is natuurlijk geen uitgebreide studie naar zwemveiligheid. Om dit goed uit te voeren zouden eerst een afwegingskader moeten worden opgesteld met toetsbare criteria. Wat is een significante beïnvloeding van de zwemveiligheid. Maximale stroomsnelheden die hoger zijn dan ?? m/s. Een toename van de autonome snelheden met meer dan ?? m/s.

5.7 Beantwoording van de modelleringsvragen.

In de “expertsessie morfologie” die plaatsvond op 20 April 2016. zijn voor- en nadelen per doorlaatmiddel bepaald. Deze voor- en nadelen vormen de basis voor de modelleringsvragen weergegeven in Tabel 5.1 en Tabel 5.2. In deze tabel zijn een aantal aanvullende voor- en nadelen met betrekking tot natuur en waterkwaliteit aspecten toegevoegd. In appendix B.7, Figuur B- 42 worden de locaties van de verschillende gebieden getoond.

Tabel 5.1: Een uitwerking van het zuidelijke doorlaatmiddel

Voordelen	Inzicht uit modellering
Sluit aan op bestaande diepe getijgeul: rustiger patroon van morfologische aanpassingen	Brouwershavensche Gat lijkt de rol van getijgeul geheel te vervullen. Weinig uitstroming via Middelplaat.
Kleinere kans op versterkte kusterosie door Schaar bij Goeree	Geen effect op de Schaar en de kustlijn van Goeree
Handhaving dan wel vergroting van de omvang van overstroomde zandbanken: Bollen van de Ooster blijven geschikt als rust- en foerageergebied voor zeehonden, zwarte zee-eenden en grote sterns	Waarschijnlijk geen waarneembaar verschil in morfodynamiek van de Bollen van de Ooster door doorlaatmiddel Zuid t.o.v. T0 dynamiek.
Handhaving dan wel vergroting van de omvang van slik- en zandplaten: Middelplaat (zie kaartje N2000) blijft geschikt als rustgebied voor zeehonden	Kleine verschillen in stromingen en sedimenttransporten op de Middelplaat. Waarschijnlijk geen waarneembaar verschil in morfodynamiek met de T0
Handhaving dan wel uitbreiding van het areaal aan pionierbegroeiingen, slijkgras, schorren en zilte graslanden, embryonale duinen	Alleen significante beïnvloeding van het Brouwershavensche Gat. Waarschijnlijk geen waarneembare verandering t.o.v. de T0 in deze gebieden.
Schelpdierbank (en) platte oester	Geen significante beïnvloeding van de kust ten noorden van het noordelijk Doorlaatmiddel waar deze voorkomen.
Nadelen	Inzicht uit modellering
Kleinere kans op vastgroei Bollen vd Ooster aan Goeree	Geen aantoonbaar effect
Kans op kusterosie door sterke uitstroom langs kust Schouwen (Noorderstrand, Renesse)	Kustlijnerosie kan toenemen. De bruto transporten in de geul nemen hier duidelijk toe. In potentie zijn dan ook grotere verliezen van de kustlijn mogelijk.
Kans op erosie door neer in hoek van kust Schouwen, mogelijk strekdam nodig	Uit de modellering volgt niet direct een neer waardoor kusterosie zou ontstaan
Door ontgronding import van slibrijk sediment naar Grevelingenmeer. Meer slib dan bij Noord	Waarschijnlijk. Uitstroomjet vorming zal intieel veel sediment verplaatsen. Netto zal het merendeel van het slib zal zeewaarts worden getransporteerd, maar tijdens instroming zal ook transport naar het meer optreden. Niet toetsbaar of dit meer of minder is dan bij het noordelijke doorlaatmiddel.
Bestorten ontgrondingskuil is moeilijker door slibrijke ondergrond	Niet toetsbaar binnen deze studie
Minder ruimte voor ontgrondingskuil: eerder bestorting nodig	Niet toetsbaar binnen deze studie
Door kleilagen in bodem kans op onregelmatige, onvoorspelbare erosie	Niet toetsbaar binnen deze studie
Verstoring Brouwershavensche Gat als winterrustgebied voor de roodkeelduiker (geen toename vertroebeling)	Vergroting van debieten door Brouwershavensche Gat. Dit zou potentieel een vertroebeling kunnen geven.

Tabel 5.2: Een uitwerking van het noordelijke doorlaatmiddel

Voordelen	Inzicht uit modellering
Kans op vastgroei Bollen vd Ooster aan kust Goeree.	Lijkt de processen hier slechts beperkt te beïnvloeden. Het doorlaatmiddel zal hier niet maatgevend in zijn.
Sterke uitstroom is van kust af gericht; geen kans op directe kusterosie.	Vorming van een zeewaartse uitstroomjet, geen retourstroming die sedimenttransport genereert zichtbaar in de gemodelleerde transporten.
Sediment naar Grevelingenmeer is wel minder slibrijk, minder vertroebeling	Studie van Vroom (2018) laat zien dat slib aanwezig is. Hier geldt een gelijke redenering als voor het zuidelijke doorlaatmiddel. Een vergelijking van hoeveelheid tussen noord en zuid kan niet gemaakt worden.
Handhaving dan wel vergroting van de omvang van overstroomde zandbanken: Bollen van de Ooster blijven geschikt als rust- en foerageergebied voor zeehonden, zwarte zee-eenden en grote sterns	Waarschijnlijk geen waarneembaar verschil in morfodynamiek van de Bollen van de Ooster door doorlaatmiddel Noord t.o.v. de T0 dynamiek
Handhaving dan wel vergroting van de omvang van slik- en zandplaten: Middelplaat blijft geschikt als rustgebied voor zeehonden	Kleine verschillen in stromingen en sedimenttransporten op de Middelplaat. Waarschijnlijk geen waarneembaar verschil in morfodynamiek t.o.v. de T0
Handhaving dan wel uitbreiding van het areaal aan pionierbegroeiingen, slijkgras, schorren en zilte graslanden, embryonale duinen	Alleen significante beïnvloeding van het Brouwershavensche Gat. Waarschijnlijk geen waarneembare verandering t.o.v. de T0 in deze gebieden.
Schelpdierbank(en)	Geen beïnvloeding van de schelpdierbanken.
Nadelen	Inzicht uit modellering
Grotere kans op versterkte kusterosie door Schaar bij Goeree	Uit de modellering volgt geen negatief effect voor de Schaar bij Goeree.
Kans op erosie door neer in hoek van kust Goeree	Uit de modellering volgt geen negatief effect voor de Schaar bij Goeree.
Verhindert migratie Middelplaat in noordelijke richting: strekdam en suppleties nodig	Er ontstaat een netto zuidelijk gericht transport op het zeewaartse deel van de Middelplaat. Direct langs de Brouwersdam blijft wel een noordwaarts gericht transport bestaan. Een strekdam ter voorkoming van sedimentatie in het doorlaatmiddel lijkt daarbij wenselijk.
Gevaar badgasten voor gevaarlijke stroming	Niet getoetst binnen modellering.
Door ontgroning veel sediment naar Grevelingenmeer	Het merendeel van het sediment verplaatst zeewaarts. Sedimenttransport richting Grevelingenmeer is mogelijk.
Aanzanding van de toegangsgeul tijdens stormen	Dit is niet uit te sluiten. De modelresultaten geven geen bewijs dat dit jaargemiddeld optreedt. De buitendelta vormt dan een efficiënte afscherming. Individuele stormen zijn in deze aanpak niet beschouwd
Verstoring Brouwershavensche Gat als winterrustgebied voor de roodkeelduiker (geen toename vertroebeling)	Vergroting van debieten door Brouwershavensche Gat. Dit zou potentieel een vertroebeling kunnen geven. Het effect van het noordelijke doorlaatmiddel is kleiner dan die van het zuidelijke doorlaatmiddel.

6 Modelresultaten voor de Grevelingen

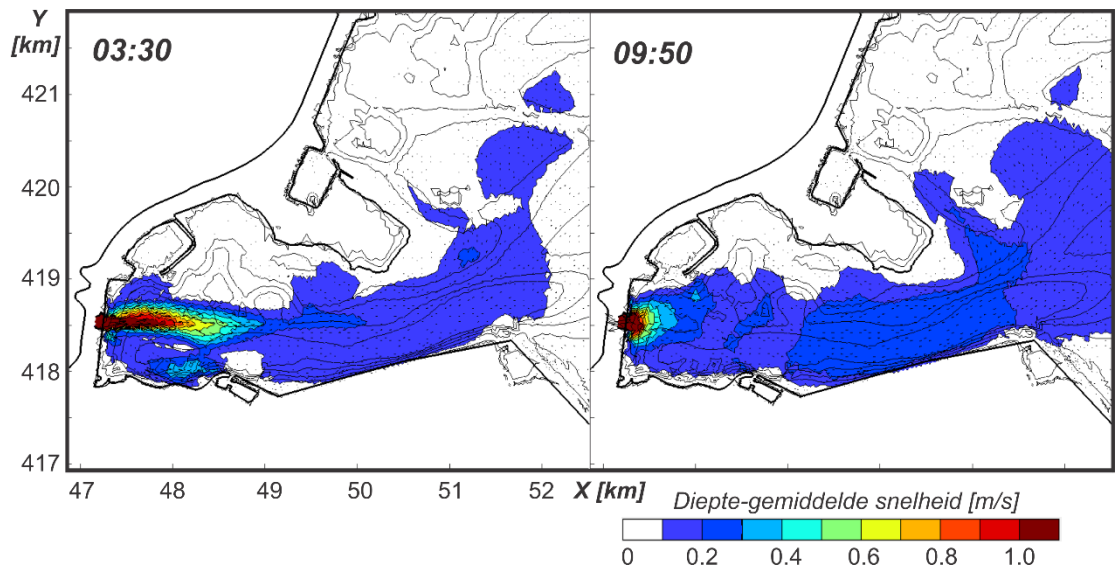
De modelsimulaties van het meer zijn minder omvangrijk uitgevoerd dan die voor de monding. Deze simulaties bevatten alleen de forcering vanuit het doorlaatmiddel. Wind en golven zijn hierbij buiten beschouwing gelaten. De modelsimulaties zijn dieptegemiddeld uitgevoerd. Voor het transport van zand lijkt deze aanpak toereikend, maar deze resultaten moeten niet gebruikt worden voor de beoordeling van processen waar 3D effecten een dominante rol spelen.

6.1 Doorlaatmiddel zuid

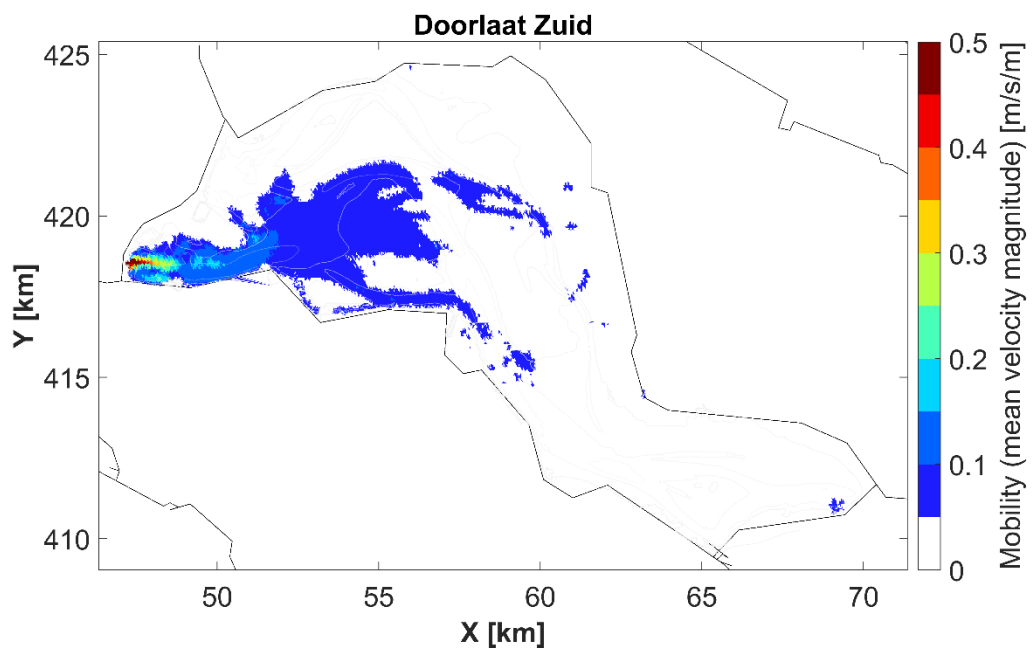
6.1.1 Snelheden en transporten

Figuur 6.1 geeft een overzicht van de stromingen ten gevolge van doorlaatmiddel zuid. De gepresenteerde resultaten zijn het eindresultaat van een serie modelsimulaties waarin het debiet gelijkwaardig is opgelegd (berekend met het 0D python script), maar waarin de diepte van het oplegpunt is gevarieerd om een toenemende uitstroomsnelheid in het doorlaatmiddel te creëren. In de getoonde resultaten ligt de uitstroomsnelheid van het doorlaatmiddel op meer dan 4 m/s. Deze snelheid is iets lager dan de circa 5,2 m/s die verwacht wordt in de kokers bij maximaal verval. Voor de hier getoonde simulaties lijkt dit verschil minder van belang. In alle simulaties vindt echter een vrijwel instantane dissipatie van de stromingen plaats zodra de stroming het doorlaatmiddel verlaat. De gevormde uitstroomjet is dan eigenlijk onafhankelijk van de oplegsnelheid in het doorlaatmiddel en voor alle uitgevoerde gevoeligheidssimulaties vrijwel identiek.

Op basis van de hier uitgevoerde modelering kunnen onderstaande conclusies worden getrokken. Tijdens maximale uitstroming vormt zich een rechte uitstroomjet het Grevelingenmeer in (Figuur 6.1, 03:30). De snelheden liggen op 4 m/s in het doorlaatmiddel, maar reduceren sterk zodra de uitstroomjet het doorlaatmiddel verlaat. De uitstroomjet heeft dan stroomsnelheden van maximaal 1,0 m/s op een afstand van 700 m van het doorlaatmiddel en stroomsnelheden tot 0,5 m/s treden op tot een afstand van 1200 m. Op een afstand van 1700 m tot het doorlaatmiddel liggen de snelheden dan lager dan 0,2 m/s. Bij instroming blijft de versnelling beperkt tot direct voor het doorlaatmiddel. Snelheden tot 1,0 m/s treden op over een afstand van 100-200 m. Snelheden groter dan 0,2 m/s over een afstand van 500 m. De grootschalige beïnvloeding van de snelheden worden weergegeven in Figuur 6.2. Deze figuur laat zien dat de er snelheden tussen de 0,1 en 0,2 m/s optreden tot ongeveer X-km 52 (splittingspunt Oude Brouwershavensche Gat en Rede Brouwershaven). Kleine snelheden (< 0,1 m/s) treden op tot het einde van de Hompelvoet/Paardenplaat.

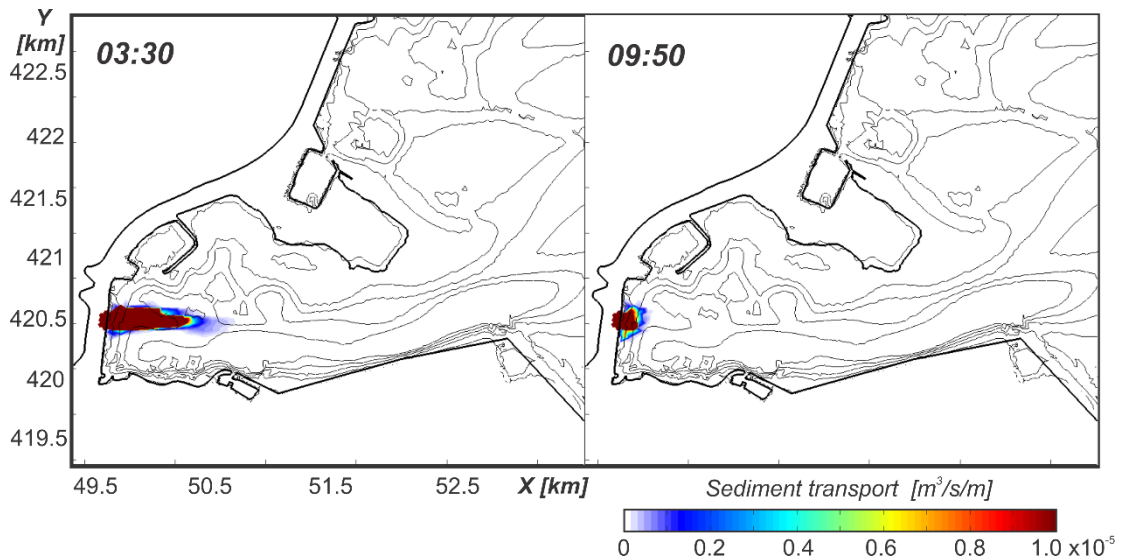


Figuur 6.1: Maximale uitstroming (links) en instroming van het zuidelijke doorlaatmiddel (zie Appendix C.1, Figuur C-2 voor aanvullende tijdstippen).



Figuur 6.2: Overzicht van de gemiddelde stroomsnelheid magnitude als indicator voor mogelijke beïnvloeding van de sedimenttransporten.

Het stromingsbeeld komt ook terug in de sedimenttransporten. Voor de zandfractie zijn alleen de hoge stromingen nabij het doorlaatmiddel van belang. Alleen tijdens maximale stromingen worden sedimenttransporten (van zand) geobserveerd in het Grevelingenmeer (Figuur 6.3 en Appendix C.1, Figuur C-4). De sedimenttransporten zijn maximaal ter plaatse van de uitstroomjet en nemen dan snel in grootte af. Het uitgestrekte gebied met snelheden in de orde van 0,1 tot 0,2 m/s is niet in staat zandtransport te initiëren.



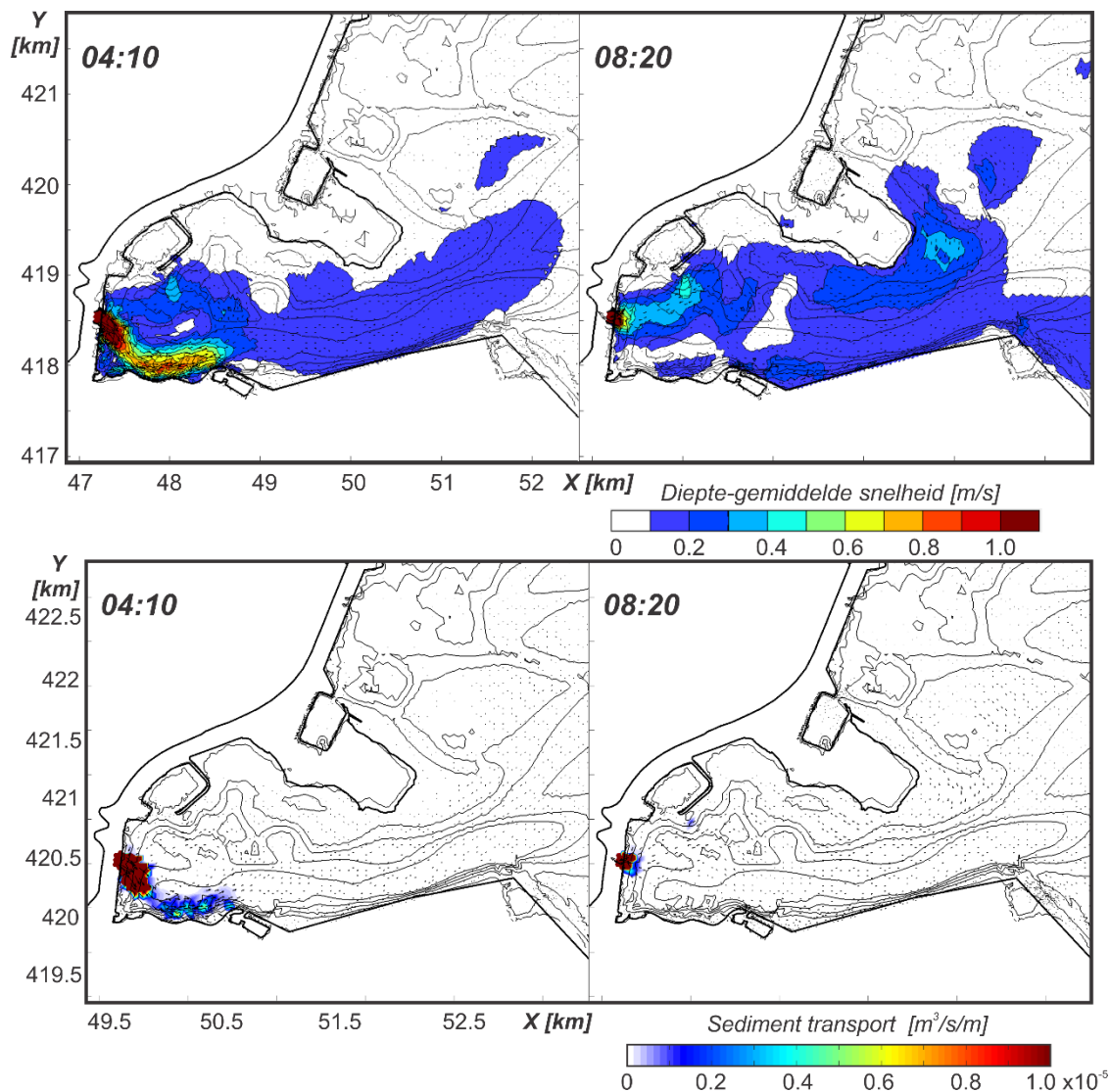
Figuur 6.3: Sediment transporten bij maximale uitstroming (links) en instroming van het zuidelijke doorlaatmiddel.

Op basis van de geobserveerde snelheden en transporten kan geconcludeerd worden dat er geen grootschalig sedimenttransport van de zandfractie zal optreden bij aanleg van het zuidelijke doorlaatmiddel. Alleen ter plaatse van de uitstroomjet zal er een geul vormen, door deze geul vorm te geven bij aanleg kan de erosie hier beperkt worden. Transporten tussen de Hompelgeul en het Oude Brouwershavensche Gat lijken zeer beperkt. Geulvorming of significante erosie van de zandfractie lijkt hier dan ook niet van toepassing.

6.1.2 Orientatie en ligging van het zuidelijke doorlaatmiddel

De berekende uitstroomjet blijkt gevoelig te zijn voor de exacte locatie en uitstroomrichting het meer in. In Figuur 6.4 worden de snelheden en transporten getoond voor een doorlaatmiddel dat haaks op de Brouwersdam staat. De oriëntatie van de uitstroming is dan iets meer zuidelijk gericht dan in de eerder beschreven simulatie. Het resultaat is dat de stromingen vrijwel direct het diepe deel van het Springersdiep volgen. De uitstroomjet strekt zich dan minder ver uit, maar er zijn wel grotere stroomsnelheden langs de zuidelijke kust van Schouwen aanwezig.

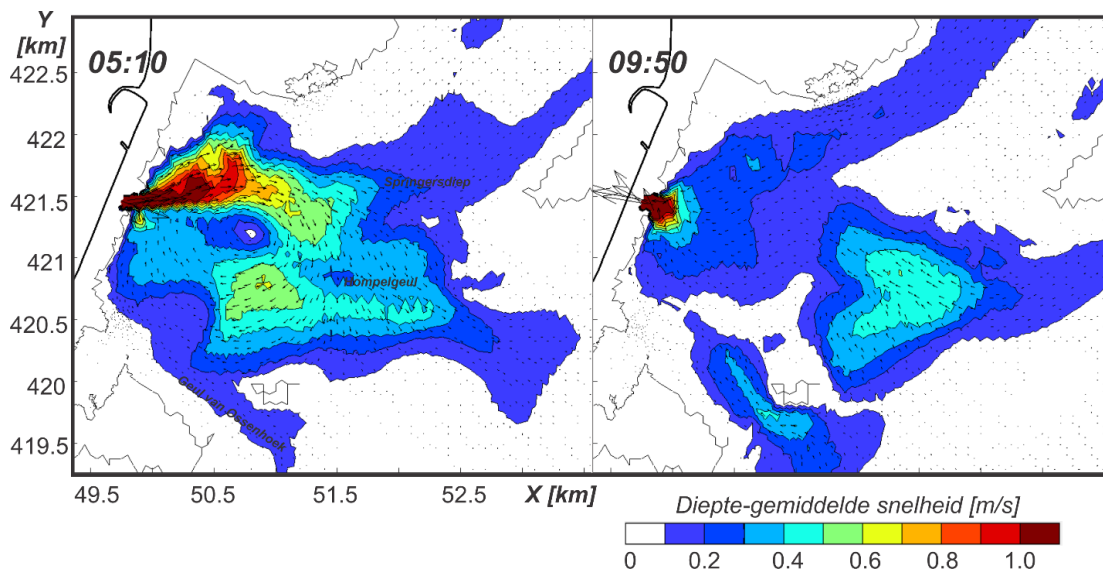
De gevoeligheid van het model is gerelateerd aan de onderliggende bodem. Op de locatie van het doorlaatmiddel bevindt zich een ondiepe richel. Als de uitstroming precies overeenkomt met de oriëntatie van deze ondiepte vindt er een vrijwel rechte uitstroming plaats en zijn de dieptegemiddelde stromingen hoger.



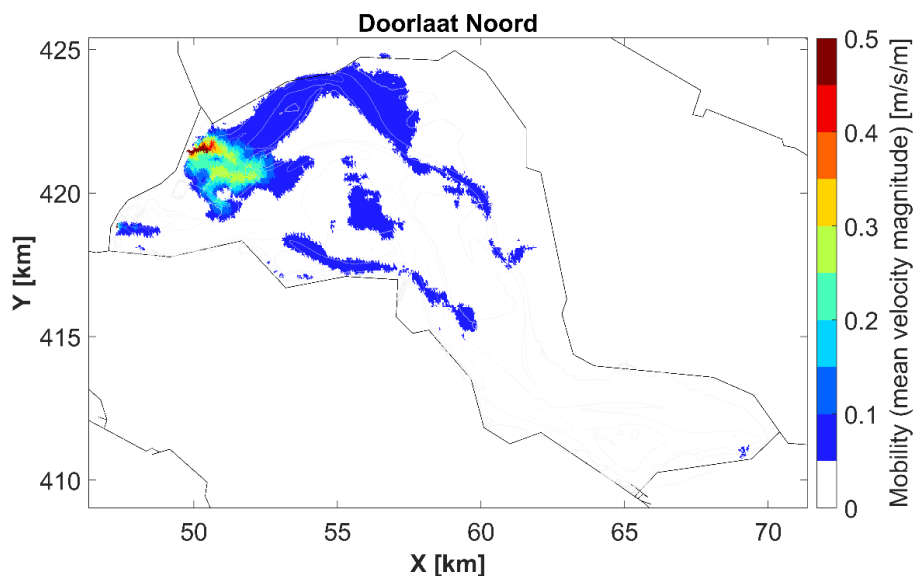
Figuur 6.4 boven: Snelheden bij maximale uitstroming (links) en instroming (rechts) van het zuidelijke doorlaatmiddel en (onder) sediment transporten bij maximale uitstroming (links) en instroming (rechts).

6.2 Doorlaatmiddel noord

Figuur 6.5 geeft een overzicht van de maatgevende stromingen ten gevolge van het doorlaatmiddel Noord. In het doorlaatmiddel worden stromingen van 4 m/s bereikt. Deze reduceren sterk zodra de uitstroom het doorlaatmiddel verlaat. Over een afstand tot 150 m worden snelheden tussen de 1,8 en 2 m/s geobserveerd. De uitstroom heeft dan stroomsnelheden van maximaal 1,0 m/s op een afstand van 575 m van het doorlaatmiddel en stroomsnelheden tot 0,5 m/s treden op tot een afstand van 800 m. Tijdens instroming treden er alleen hoge snelheden op in de directe nabijheid van het doorlaatmiddel (100 m). Een stroming tot 0,5 m/s wordt ook geobserveerd in de verbindingsgeulen de Hompelgeul en het Oude Brouwershavensche Gat. Stroomsnelheden tot 0,1 m/s worden over een groter gebied geobserveerd (Figuur 6.6). In het Springersdiep treden deze op tot de Slikken van Flakkee (km 60). Ook in de zuidelijke hoofdgeul treden kleine snelheden op. In vergelijking met het zuidelijke doorlaatmiddel (Figuur 6.2) lijkt de beïnvloeding hier over een groter gebied plaats te vinden.

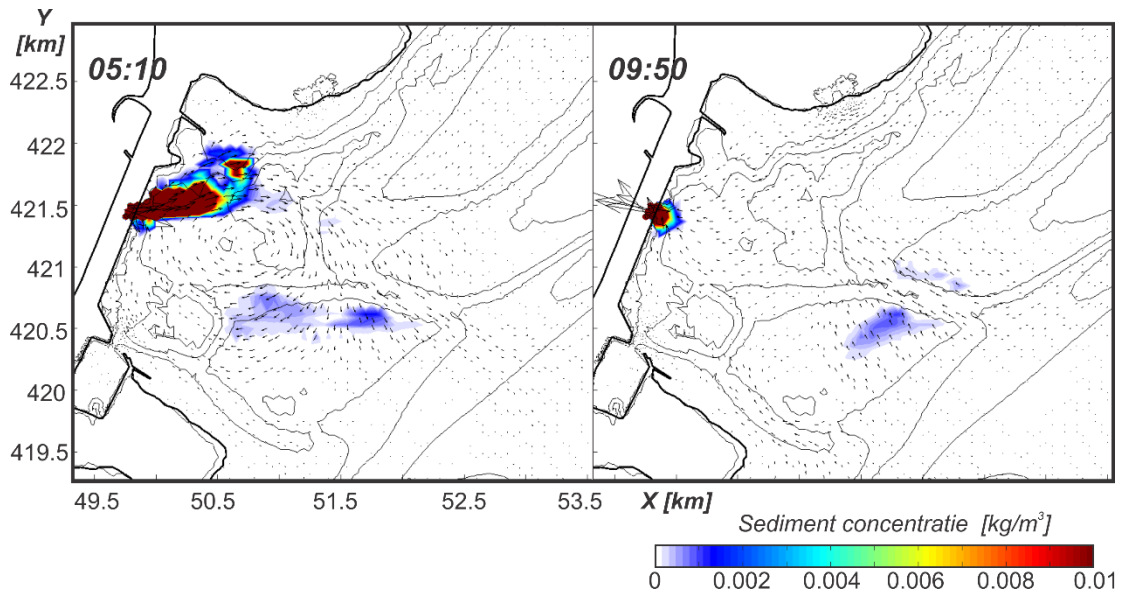


Figuur 6.5: Maximale uitstroming (links) en instroming van het noordelijke doorlaatmiddel (zie Appendix C.2, voor aanvullende figuren).



Figuur 6.6: Overzicht van de gemiddelde stroomsnelheid magnitude als indicator voor mogelijke beïnvloeding van de sedimenttransporten.

Op basis van de geobserveerde snelheden en transporten kan geconcludeerd worden dat er geen grootschalig sedimenttransport van de zandfractie zal optreden. Alleen ter plaatse van de uitstroomjet zal er een geul vormen. Zodra deze gevormd is zullen de morfologische veranderingen waarschijnlijk beperkt zijn. Transporten door de Hompelgeul lijken beperkt. Geulvorming of significante erosie van de zandfractie lijkt hier dan ook niet van toepassing.

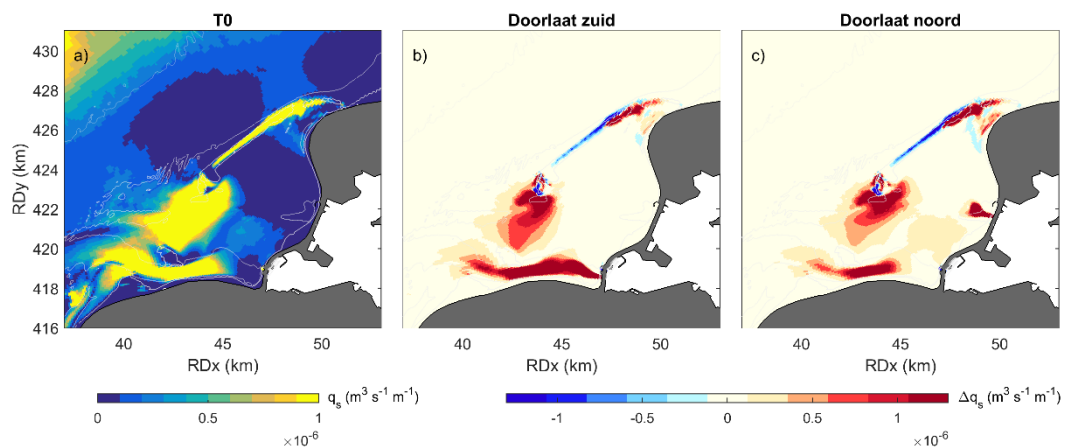


Figuur 6.7: Sediment concentraties tijdens maximale uitstroming (links) en instroming (rechts) van het noordelijke doorlaatmiddel.

7 Synthese; Ontwikkeling Grevelingenmondning

7.1 Een vergelijking van de effecten van het noordelijke en zuidelijke doorlaatmiddel op de monding.

Op basis van de uitgevoerde modellering kan geconcludeerd worden dat vooral de vloedcomponent van het getij belangrijk is voor de sedimenthuishouding van het mondingsgebied. De vloedstromingen zijn veel hoger dan de ebstromingen en landwaarts gerichte sedimenttransporten ontstaan in het Brouwershavensche Gat en ten zuiden van de Bollen van de Ooster. Aan de noordzijde van de Bollen van de Ooster overheersen zeewaarts transporten (Figuur 7.1a). In de luwte van de Bollen van de Ooster, ten noorden van de Middelplaat ontstaat een afgeschermd gebied waar golfenergie en getijstromingen beperkt zijn en waar sediment kan bezinken.



Figuur 7.1: Berekende jaargemiddelde sedimenttransport voor (a) T0, en het verschil in sedimenttransport tussen (b) T0 en doorlaatmiddel Zuid en (c) T0 en doorlaatmiddel Noord.

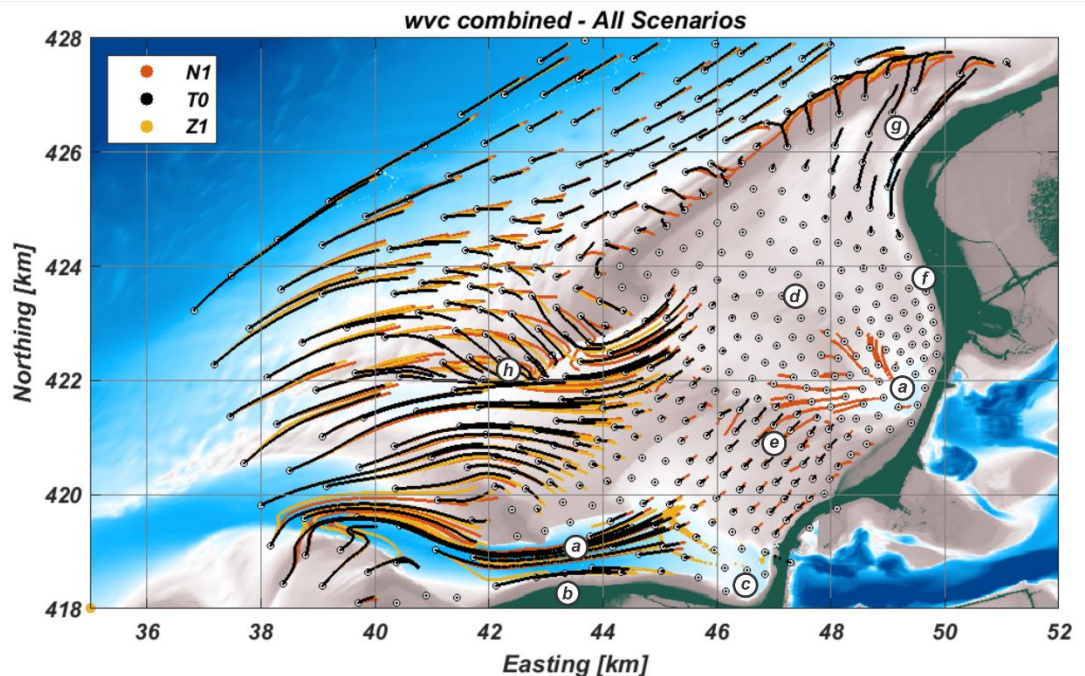
De uitgevoerde modellering geeft inzicht in wat de effecten van extra kustdwarse stroming zijn op de sedimenttransporten. Deze effecten zijn samengevat in Figuur 7.1 en Figuur 7.2. Bij beide varianten van het doorlaatmiddel ontstaat een uitstroomjet, waardoor de bodem direct voor het doorlaatmiddel zal eroderen en er geulvorming zal ontstaan. Aangezien er zowel bij het noordelijke als bij het zuidelijke doorlaatmiddel sliblagen voorkomen zal uitschuring van deze sliblagen waarschijnlijk zijn. Dit proces zal vergrote slibconcentraties geven tot een nieuwe evenwichtsgeulligging wordt bereikt. Tijdelijk kan dit nadelige gevolgen hebben in de monding maar ook voor het Grevelingenmeer. Omdat de uitstroomjet veel groter is dan de stroming bij instroming zal het merendeel zeewaarts worden verplaatst. Toch zal tijdens instroming er ook wel een deel richting de Grevelingen verplaatsen.

Naast deze directe effecten van de uitstroomjet vindt er ook op de schaal van de monding een beïnvloeding van de sedimenttransporten plaatst (Figuur 7.1b,c en Figuur 7.2). In onderstaande analyse verwijst [a tot en met h] naar de bijbehorende labels in Figuur 7.2. De uitstroming van zowel het noordelijke als het zuidelijke doorlaatmiddel zorgt voor een vergroting van de debieten door het Brouwershavensche gat ([a]), waardoor snelheden en transporten hier toenemen. Deze toename is groter bij het zuidelijke doorlaatmiddel (Figuur 7.1b) dan bij de noordelijke variant (Figuur 7.1c). De toename in snelheden en transporten in het Brouwershavensche Gat kan de kusterosie van de naastgelegen kustlijn van Schouwen verder vergroten [b]. Bij aanleg van het noordelijke doorlaatmiddel zal de overgang van de kust van Schouwen naar de Brouwersdam [c] een gebied blijven met geringe transporten en stroming. Het is de verwachting dat dit dan ook zal blijven aanzanden.

De sedimenttransporten in het gebied ten noorden van de Middelplaat, in de luwte van de Bollen van de Ooster [d] lijken niet te worden beïnvloed. Bij het zuidelijke doorlaatmiddel zal de opvulling van het gehele gebied hier onveranderd doorgaan. Bij de noordelijke variant wordt het gebied nabij het doorlaatmiddel natuurlijk wel sterk beïnvloed. Ook is het waarschijnlijk dat er erosie of geulvorming op de Middelplaat kan optreden [e]. De stroming vanuit het doorlaatmiddel buigt zuidwaarts over de Middelplaat heen en stroomt door het Brouwershavensche Gat uit.

De kustlijn van Goeree [f] lijkt in beide varianten niet beïnvloed te worden. Zowel bij het noordelijke als zuidelijke doorlaatmiddel veranderen de transporten hier niet. Op kop van Goeree en de noordelijke punt van de Bollen van de Ooster worden wel verschillen in transporten t.o.v. de T0 geobserveerd (Figuur 7.1b,c). Op basis van de SedTRAILS resultaten kan echter niet geconcludeerd worden dat er hier dan ook grote veranderingen gaan optreden. De transportpaden vertonen overeenkomstige kenmerken. Het is niet waarschijnlijk dat opbreken van de Bollen van de Ooster versterkt wordt door het aanbrengen van een doorlaatmiddel. De verschillen in stromingen zijn hier te gering. Ook aan de zuidzijde van de Bollen van de Ooster worden verschillen in transport geobserveerd (h). Ook hier geldt de conclusie dat er wel een kleine beïnvloeding van de stroming en transporten optreedt. Hierdoor treden er kleine wijzigingen op in de individuele transportvectoren, maar het grootschalige beeld verandert niet. De dynamiek van individuele platen en geulen kan iets wijzigen, maar de algehele trend van landwaartse migratie in dit gebied zal niet veranderen. Ook lijkt de aanstroming richting de Bollen van de Ooster niet wezenlijk te wijzigen, waardoor grootschalige veranderingen ten gevolge van het doorlaatmiddel niet waarschijnlijk zijn.

Voor de huidige morfologie lijkt het onwaarschijnlijk dat het doorlaatmiddel een grootschalige verandering van de geulen en platen initieert. De aanpassing van het mondingsgebied t.g.v. de afsluiting van het estuarium zal zich doorzetten. Uiteindelijk zal afhankelijk van de gekozen locatie van het doorlaatmiddel wel een nieuw evenwicht worden bereikt. In Paragraaf 7.2 is dit verder uitgewerkt.



Figuur 7.2: Berekende transportpaden op basis van SedTRAILS voor de T0 en het noordelijke en zuidelijke doorlaatmiddel.

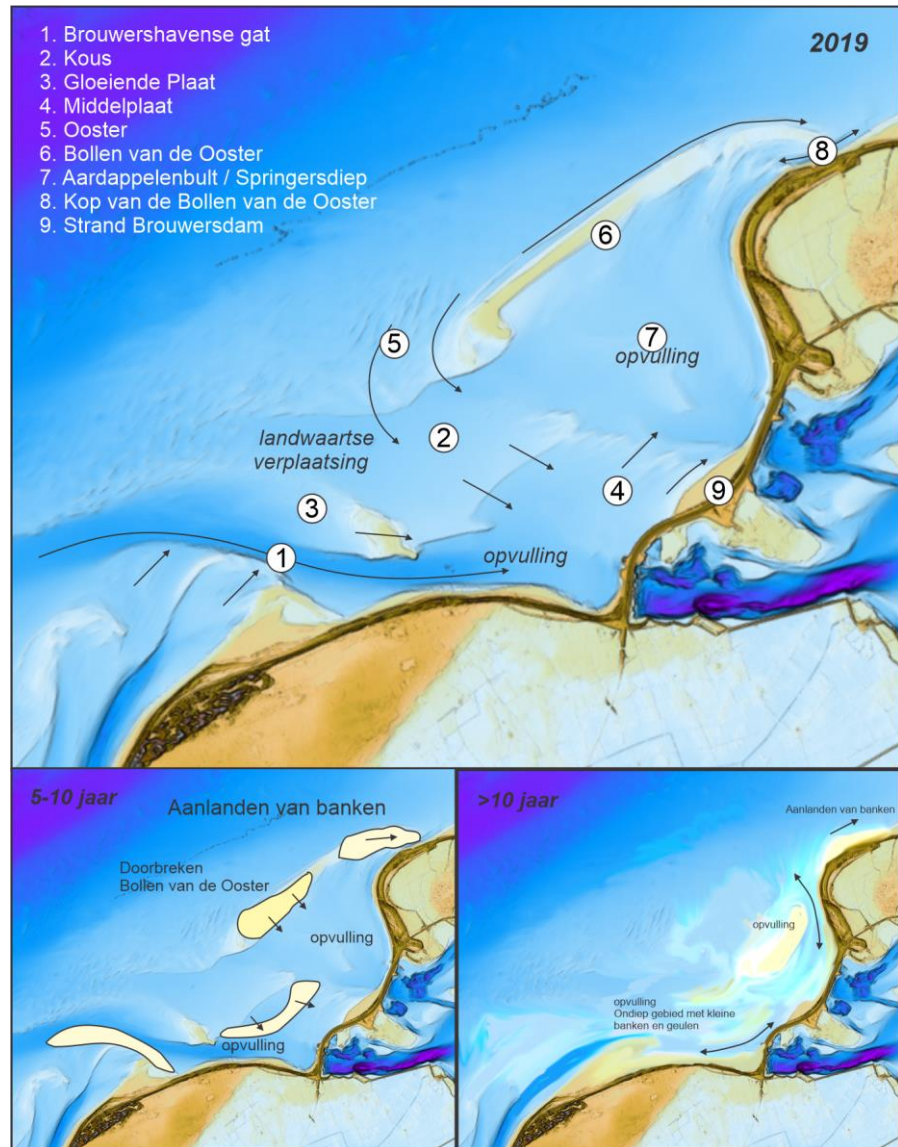
7.2 Een doorkijk naar de toekomst

7.2.1 Natuurlijke veranderingen (T0)

Door het aanbrengen van een doorlaatmiddel door de Brouwersdam zullen er morfologische veranderingen gaan optreden. Het is echter ook belangrijk te realiseren dat ook zonder doorlaatmiddel grote veranderingen zullen optreden. Het huidige gedrag van de monding wordt samengevat in Figuur 7.3. In de monding wordt sediment landwaarts verplaatst. Deze verplaatsing is nog steeds een na-ijlend effect van de afsluiting van de Grevelingen in 1971 (Elias et al. 2016; Van der Spek en Elias, 2021). Zo wordt zand vanaf de Ooster onder invloed van golven landwaarts verplaatst. Dit heeft geresulteerd in de vorming van de Bollen van de Ooster, landwaartse verplaatsing van de kleinere bankcomplexen zoals Gloeiende Plaat en nabij Kous, aanzanding op de Aardappelenbult en doorgaande opvulling van de voormalige geulen zoals Brouwershavensche Gat, Kous en Springersdiep. Het merendeel van deze processen gebeurt geleidelijk en zal zich in de toekomst dan ook wel doorzetten.

De toekomstige ontwikkeling van de Bollen van de Ooster is lastig voorspelbaar. Het is waarschijnlijk dat de Bollen van de Ooster in de toekomst zal doorbreken, wanneer dit gebeurt is echter niet te voorspellen. Van der Spek en Elias (2020) trekken hiervoor een vergelijking met het opbreken van de Hinderplaat. De Hinderplaat vormde lange tijd een stabiele langgerekte bank in het Haringvliet estuarium. Na opbreken ontstaan dan een dynamisch systeem met kleinere geulsystemen en de opgebroken bank migreerde dan snel richting de kust van Voorne. Een soortgelijke respons is hier op de middellange termijn ook waarschijnlijk. Een deel van de banken zal dan aanlanden op de kop van Goeree en hier tijdelijk de kust voeden. De Bollen van de Ooster zal na zo'n eerste doorbraak niet gelijk verdwijnen. Het zandvolume dat aanwezig is, is hiervoor te groot. Het proces van vormen en opbreken van de Bollen van de Ooster zal zich een aantal keer herhalen. Uiteindelijk op lange termijn zal de bank zich wel gaan samenvoegen met de Aardappelenbult. Er ontstaat dan een groter bankcomplex dat richting de kust migreert. Er zijn al lange tijd aanwijzingen dat een doorbraak van het noordelijke deel van de Bollen gaat plaatsvinden. Hier zijn periodiek al kleine doorsnijdingen van de bank aanwezig, maar tot een volledige breuk hebben die nog niet geleid. Voorspellen wanneer zo'n doorbraak optreedt is eigenlijk niet mogelijk. Het meest waarschijnlijke scenario is dat dit gebeurt tijdens een (zware) storm met een voor de Bollen van de Ooster ongunstige golfaanval en setup van het getij.

Ook in het zuidelijk deel van de monding doen zich grote veranderingen voor. Vanuit de Oosterscheldemonding (Banjaard) dringen banken steeds verder noordwaarts op. Deze banken beïnvloeden de uitstroom van het Brouwershavensche Gat. Het landwaartse deel van de geul vertoont een opvulling wat de geul verkleint. Met zanddruk aan de uitstroomzijde en opvulling aan de binnenkant is het de vraag of deze geul op langere termijn behouden kan worden. Op korte termijn (5-10 jaar) zal de geul niet direct verdwijnen, maar op de middellange termijn (> 10 jaar) is dit wel mogelijk.



Figuur 7.3: Verwachte morfologische veranderingen in de Grevelingen monding op basis van autonome kustprocessen (T0) en toekomstverwachtingen voor de korte en lange termijnontwikkeling.

7.2.2 Ontwikkelingen met een zuidelijk doorlaatmiddel.

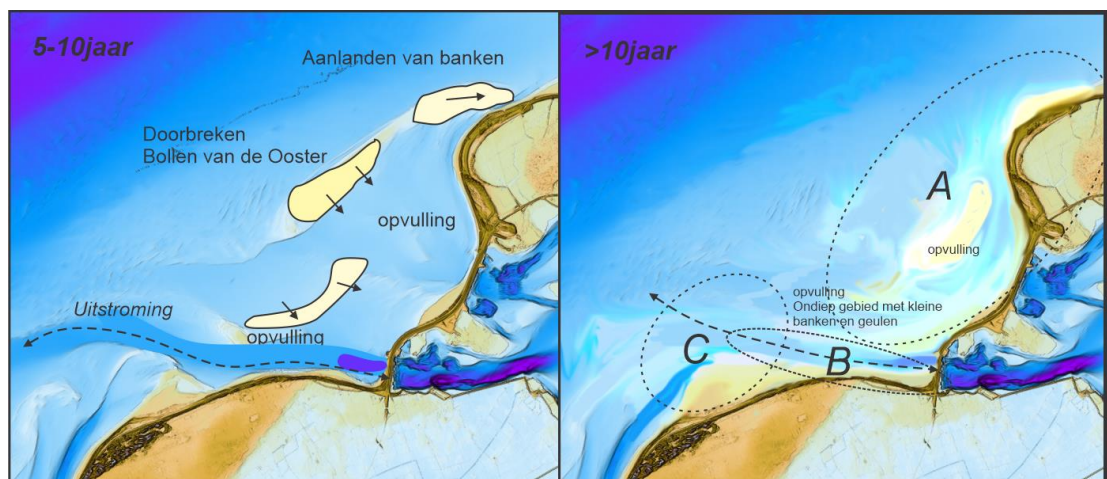
Op basis van de modelsimulaties met een zuidelijk doorlaatmiddel kan geconcludeerd worden dat dit doorlaatmiddel alleen een direct effect heeft op het Brouwershavensche Gat. Vrijwel het gehele debiet wordt via het Brouwershavensche Gat af- of aangevoerd. Initieel geeft dit vrijwel geen veranderingen in de morfologische veranderingen t.o.v. de T0 simulatie. Het opvullen van het Brouwershavensche Gat was al een geleidelijk proces. Door de grotere stroming door de geul zal dit waarschijnlijk iets vertragen, maar een groot verschil in morfologische respons zal dit nog niet geven. Alleen direct voor het doorlaatmiddel ontstaat een veel diepere geul. Aangezien de veranderingen en stromingen in het noordelijke deel van de monding (alles ten noorden van het Brouwershavensche Gat) beperkt zijn, zal hier geen verschil in morfologische respons optreden (in Figuur 7.4, links).

Op langere termijn zijn de effecten groter omdat met een doorlaatmiddel het Brouwershavensche Gat ook op lange termijn behouden blijft als geul (gebied B in Figuur 7.4, rechts). Dit geeft hier dan een aanzienlijke verandering t.o.v. de autonome ontwikkeling. Ten noorden van de Middelplaat zal de autonome ontwikkeling zich vrijwel onveranderd doorzetten (gebied A). De Middelplaat zal in beide gevallen verder in hoogte toenemen. Omdat de

zuidzijde van de Middelplaat begrensd wordt door de geul zal de bank zich langs de noordzijde van de geul landwaarts verplaatsen. Hierdoor zal de hoogte waarschijnlijk meer toenemen dan in de T0 situatie, omdat in de T0 zal een deel van het landwaarts transport over de Middelplaat bijdragen aan het opvullen van het Brouwershavensche Gat.

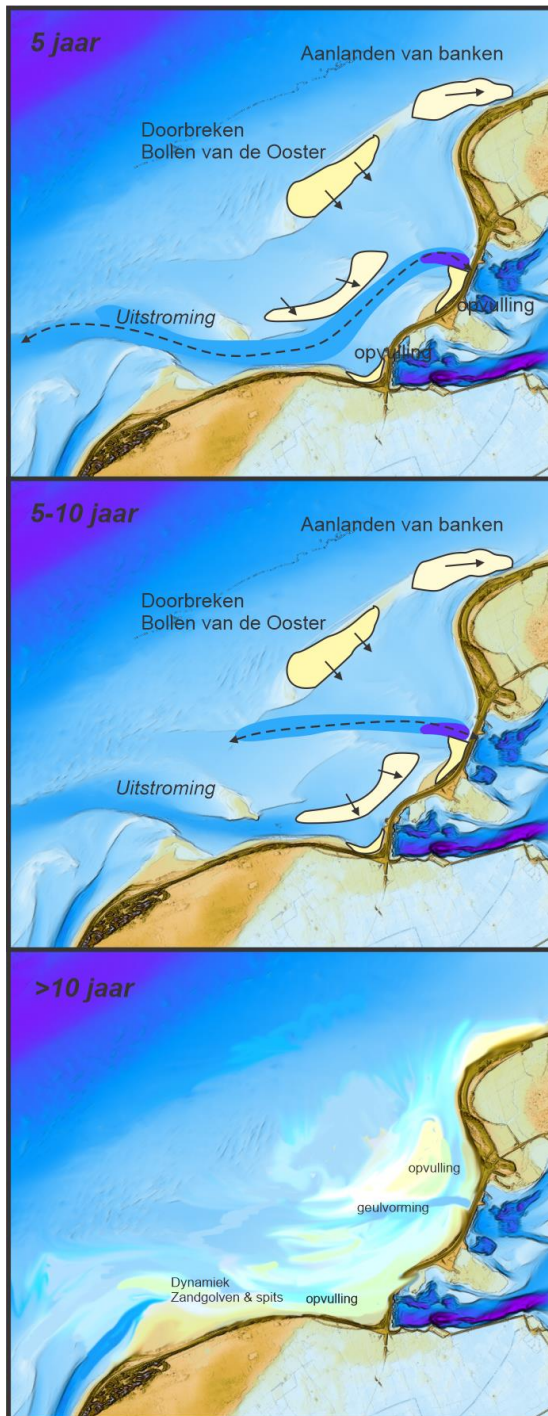
Veranderingen zullen ook optreden nabij de uitstroom van het Brouwershavensche Gat (gebied C). In dit gebied zit een grotere onzekerheid in de voorspelling. Er zullen banken en geulen vormen maar de exacte ligging en dynamiek is onzeker. Deze dynamiek hangt af van de kustlangse zandtoevoer vanaf de Banjaard versus de kustdwarse afvoer van sediment door het Brouwershavensche Gat.

Op lange termijn speelt ook zeespiegelstijging een rol in de morfologische ontwikkeling. Het resultaat van 40 cm zeespiegelstijging is dat het verval tussen de monding en het meer afneemt bij uitstroming richting de monding. Hierdoor nemen ook de afvoerdebieten en stromingen af. Het is niet de verwachting dat dit resulteert in een verandering van de gemodelleerde verdeling van de snelheden en transporten in de monding. Ook de kleinere debieten zullen via het Brouwershavensche Gat afgevoerd worden. In deelgebied A zijn dan ook geen veranderingen t.o.v. de autonome situatie zichtbaar. In gebied B zal de geulvorming nog steeds optreden, alleen kan deze iets kleiner in omvang worden. De grootste onzekerheid zal ook hier liggen in gebied C.



Figuur 7.4: Morfologische veranderingen in de Grevelingen monding (T0)

7.2.3 Ontwikkelingen met een noordelijk doorlaatmiddel.



Figuur 7.5: Morfologische veranderingen in de Grevelingen monding op korte, middellange en lange termijn

Op korte termijn zal de respons van het noordelijke als zuidelijk doorlaatmiddel niet veel afwijken, de beïnvloeding van de sedimenttransportpatronen is voor grote delen vergelijkbaar (Figuur 7.5a). Het grootste verschil zal plaatsvinden op de Middelplaat. De uitstroming vanuit de Noordelijke Doorlaat zal het landwaarts transport over de Middelplaat vertragen en (tijdelijk) voor geulvorming zorgen. Via de Middelplaat stroomt het water dan uit via het Brouwershavensche Gat. De ontwikkeling zal hier vrijwel gelijk zijn met het zuidelijke doorlaatmiddel. Een verschil zal wel zichtbaar zijn in de overgang van Schouwen naar de Brouwersdam. In dit luwte gebied kan aanzanding optreden. Ook aan de zuidzijde van het doorlaatmiddel is aanzanding te verwachten in de luwte van het zuidelijke geleidewerk.

Op middellange termijn (5-10 jaar) lijkt een zuidelijke geul niet de meest efficiënte route voor uitwatering van het doorlaatmiddel. De zanddruk van de landwaarts migrerende bankencomplexen zullen deze geul steeds verder landwaarts verplaatsen, waardoor deze hydraulisch minder efficiënt wordt. Het is dan ook de verwachting dat de uitwatering van het doorlaatmiddel uiteindelijk via de Kous en de zuidzijde van de Bollen van de Ooster zal optreden (Figuur 7.5b). Op deze tijdschaal zal de Bollen van de Ooster wel al doorbroken zijn. Het doorlaatmiddel zal hier weinig effect op hebben gehad.

Na vorming van een nieuwe zeewaartse uitstroming gaat de ontwikkeling van de monding sterk afwijken van die van het zuidelijke doorlaatmiddel. Een belangrijk verschil is daarbij het verder opvullen van het Brouwershavensche gat. Deze geul zal op termijn verdwijnen (>> 10 jaar), waardoor de ontwikkelingen langs de kust van Schouwen anders gaan plaatsvinden.

8 Conclusies

De synthese gepresenteerd in voorgaand hoofdstuk geeft een uitgebreide verhandeling van de effecten van de twee doorlaatmiddelen en op de monding en een vertaling van de inzichten naar de mogelijk toekomstige ontwikkeling. In dit hoofdstuk worden puntsgewijs de belangrijkste inzichten samengevat voor een aantal kernpunten.

Morfologische veranderingen

- Er is een zeer beperkte beïnvloeding van de getijbeweging en golven. Op grotere schaal zijn de veranderingen in transporten daarom beperkt. Het autonome gedrag blijft overheersen.
- Grote veranderingen zijn waarschijnlijk in de directe nabijheid van zowel het noordelijke als zuidelijke doorlaatmiddel. Bij uitstroom ontstaat een uitstroomjet waardoor een ontgrondingskuil ontstaat.
- Beide doorlaatmiddelen stromen uit via het Brouwershavensche Gat. Hier nemen de stroomsnelheden en transporten toe.

Erosie van Eilandkusten & Strand Brouwersdam

- Beide doorlaten laten geen beïnvloeding van de kust van Goeree zien. Het is niet de verwachting dat de sedimenttransporten hier wezenlijk veranderen na aanleg.
- Grotere stromingen en transporten langs de kust van Schouwen kunnen hier de kusterosie negatief beïnvloeden. Het zuidelijke doorlaatmiddel heeft hier een groter effect dan het noordelijke doorlaatmiddel.
- Erosie van strand Brouwersdam zal bij het zuidelijke doorlaatmiddel doorgaan. Het noordelijke doorlaatmiddel kan een stabiel strand creëren door opvulling aan de zuidzijde van het doorlaatmiddel.

Bollen van de Ooster

- De Bollen van de Ooster worden niet direct beïnvloed door aanleg van het doorlaatmiddel. Ook onder de autonome ontwikkeling zijn grote veranderingen in de Bollen van de Ooster te verwachten. Het is ook de verwachting dat de Bollen van de Ooster zal opbreken voordat de langetermijn-veranderingen van het doorlaatmiddel een effect hebben.

Natuur en waterkwaliteit

- Beide doorlaten lijken de voor de natuur belangrijke platen en arealen niet rechtstreeks te beïnvloeden. Hier blijft de autonome ontwikkeling de veranderingen bepalen.

Grevelingenmeer.

- Beide doorlaten geven alleen sedimenttransport in de uitstroomjet die ontstaat bij uitstroming. Grootschalige sedimenttransporten worden niet voorspeld.
- De uitstroomjet en doorwerking hiervan op de stroming strekt zich bij het noordelijke doorlaatmiddel verder uit dan bij de zuidelijke variant.

Toekomstige ontwikkeling

- Initieel hebben de doorlaten geen direct effect op de morfodynamiek, maar op lange termijn is er wel een verschil in ontwikkeling tussen de het noordelijke en zuidelijke doorlaatmiddel te verwachten.
- Bij een zuidelijke doorlaatmiddel blijft het Brouwershavensche Gat gehandhaafd. Ten noorden hiervan zal de landwaartse verplaatsing van de buitendelta, het autonome gedrag, vrijwel ongehinderd doorgaan.
- Bij een noordelijke doorlaatmiddel zal op termijn waarschijnlijk een centrale uitstroomgeul vormen. Het Brouwershavensche Gat kan dan (verder) verzanden en aanslibben. De monding zal dan een andere ontwikkeling vertonen dan met de zuidelijke variant.

9 Referenties

de Boom, 2016. Modelling hydrodynamics and sediment transport in the Grevelingen outer delta in response to human interventions, MSc Thesis, Utrecht University, Department of Physical Oceanography.

Deltares (2020): Studie met IPCC klimaatscenario's en het DCSM FM 100m model; Effect van zeespiegelstijging op getij langs de Nederlandse kust, Jelmer Veenstra, Firmijn Zijl en Martin Verlaan, PowerPoint presentatie, 4 november 2020.

Elias, E.P.L., 2021. Morfologische analyse effecten doorlaat Brouwersdam. Draft rapport Deltares, 71 p.

Elias, E.P.L., Pearson, S., 2020. SedTRAILS - Sediment TRANsport visualization & Lagrangian Simulator. A novel method to visualize and analyse sediment transport pathways sedtrails. Report 236-003-ZKS-0002, Deltares, Delft, 37 p.

Elias E.P.L. (2015). Verkenning morfologische effecten (geulwand)suppletie Bollen van de Ooster. Rapport Deltares 1220040-000-ZKS-005, Delft, 53 p.

Elias, E. P. L., Van Der Spek, A. J. F. (2014). Grootschalige morfologische veranderingen in de Voordelta 1964 – 2013. Werkdocument, 1207724-001, Deltares, Delft.

Elias, E. P. L., Van Der Spek, A. J. F., & Lazar, M. (2017). The “Voordelta”, the contiguous ebb-tidal deltas in the SW Netherlands: Large-scale morphological changes and sediment budget 1965-2013; Impacts of large-scale engineering. *Geologie En Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences*, 96(3), 233–259. <https://doi.org/10.1017/njg.2016.37>.

Groenenboom, J., van der Heijden, L., Markus, A.A., Laan, S.C., (2020) Ontwikkeling zesde-generatie modelschematisatie D-HYDRO Grevelingen. Modelbouw, kalibratie en validatie. Rapport 11205259-006-ZKS-0007, Deltares, Delft, 155 p.

Groenewegen, M.Q.T. (2019). Morphological development of the Bollen van de Ooster. A potential hazard for Goeree-Overflakkee?, MSc. Study, Delft University of Technology.

Houtekamer en Van Kleef, 2016a: Verslag Expertsessie Effecten van een doorlaat Brouwersdam op de morfologie van de Voordelta, 20 april 2016, In opdracht van Rijkswaterstaat Zee en Delta, 27 mei 2016.

Houtekamer en Van Kleef, 2016b: Verslag Expertsessie Effecten van een doorlaat Brouwersdam op de slibhuishouding van de Grevelingen, Rotterdam, 25 mei 2016, In opdracht van Rijkswaterstaat Zee en Delta, 20 juni 2016.

Houtekamer en Van Kleef, 2016c: Verslag expertsessie Effecten van een doorlaat Brouwersdam op de natuur van de Voordelta, 30 mei 2016, In opdracht van Rijkswaterstaat Zee en Delta.

Janssen, M.H.P., (2011). Morfologische beoordeling oevererosie en slibsedimentatie Grevelingen. Rapport SDM113-4/abdm/011, Witteveen+Bos, Rotterdam.

Janssen, M.H.P., (2012). Morfologische analyse Voordelta. Rapport SDM113-4/abdm/010, Witteveen+Bos, Rotterdam.

De Jong en Van Maldegem, 2010: Invloed getij op oevers Grevelingen, Huidige ontwikkeling en prognoses voor scenario's T50, T70 en T100, Dick de Jong & Dirk van Maldegem, Rijkswaterstaat Dienst Zeeland, 8 september 2010.

Van Kessel, M.R.A. Verheul, M.A. de Lucas Pardo en M.E. Ibanez (2016). Resultaten bodemonsteranalyse Grevelingen en Volkerak-Zoommeer. Rapport 1220952, Deltares, Delft.

Lesser, G.R., J.A. Roelvink, J.A.T.M. van Kester, and Stelling, G.S., 2004, Development and validation of a three-dimensional morphological model: Coastal Engineering, v. 51, p. 883–915.

Lesser, G.R., 2009, An approach to medium term coastal morphological modelling. PhD Dissertation, Delft Technical University, Delft, Netherlands, 239 p.

Maarse, M., Nolte, A., Kleissen, A., Becker, B. (2019). Optimalisatie van peilbeheer Getij Grevelingen door aansturing van het doorlaatmiddel in de Brouwersdam. Rapport 11203818-001-ZKS-0003, Deltares, Delft.

Nolte, A.G., Lagendijk, O.G. (2016). Grevelingenmeer van Stagnant naar Beperkt Getij. Synthesedocument 'Beschikbare kennis en resterende kennisvragen met betrekking tot het effect van introductie beperkte getijslag op het natuurlijk systeem van Grevelingenmeer en Voordelta'. Rapport 1230426-000-ZKS-0003, Deltares, Delft.

Nolte, A.J., en Spiteri, C., (2011): Effect van herintroductie van getij op waterkwaliteit en ecologische toestand van het Grevelingenmeer, Scenarioberekeningen ten behoeve van de MIRT-Verkenning, A, Rapport 1201650-000-ZKS-0033, Deltares, Delft.

Spiteri, C. Nolte, A.J. (2010). Validatie van het 3D model van het Grevelingenmeer voor hydrodynamica, waterkwaliteit en primaire productie. Rapport 1201650-000, Deltares, Delft.

Van Rijn, L.C., 2007a, Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport: Journal of Hydraulic Engineering, v. 133, p. 19.

Van Rijn, L.C., 2007b, Unified view of sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport: Journal of Hydraulic Engineering, v. 133, p. 22.

Van Rijn, L.C., 2007c, Unified view of sediment transport by currents and waves. III: Graded beds: Journal of Hydraulic Engineering, v. 133, p. 15.

Van der Kaaij, T. (2015). Resultaten WAQUA Oosterscheldemodel. Delft, The Netherlands.

Van der Spek, A.J.F., 1987. Inventariserend morfologisch onderzoek Voordelta; Beschrijving van de ontwikkeling van de buitendelta's van Haringvliet en Grevelingen. Report GWAO-87.105, Rijkswaterstaat, Tidal Waters Division, Middelburg.

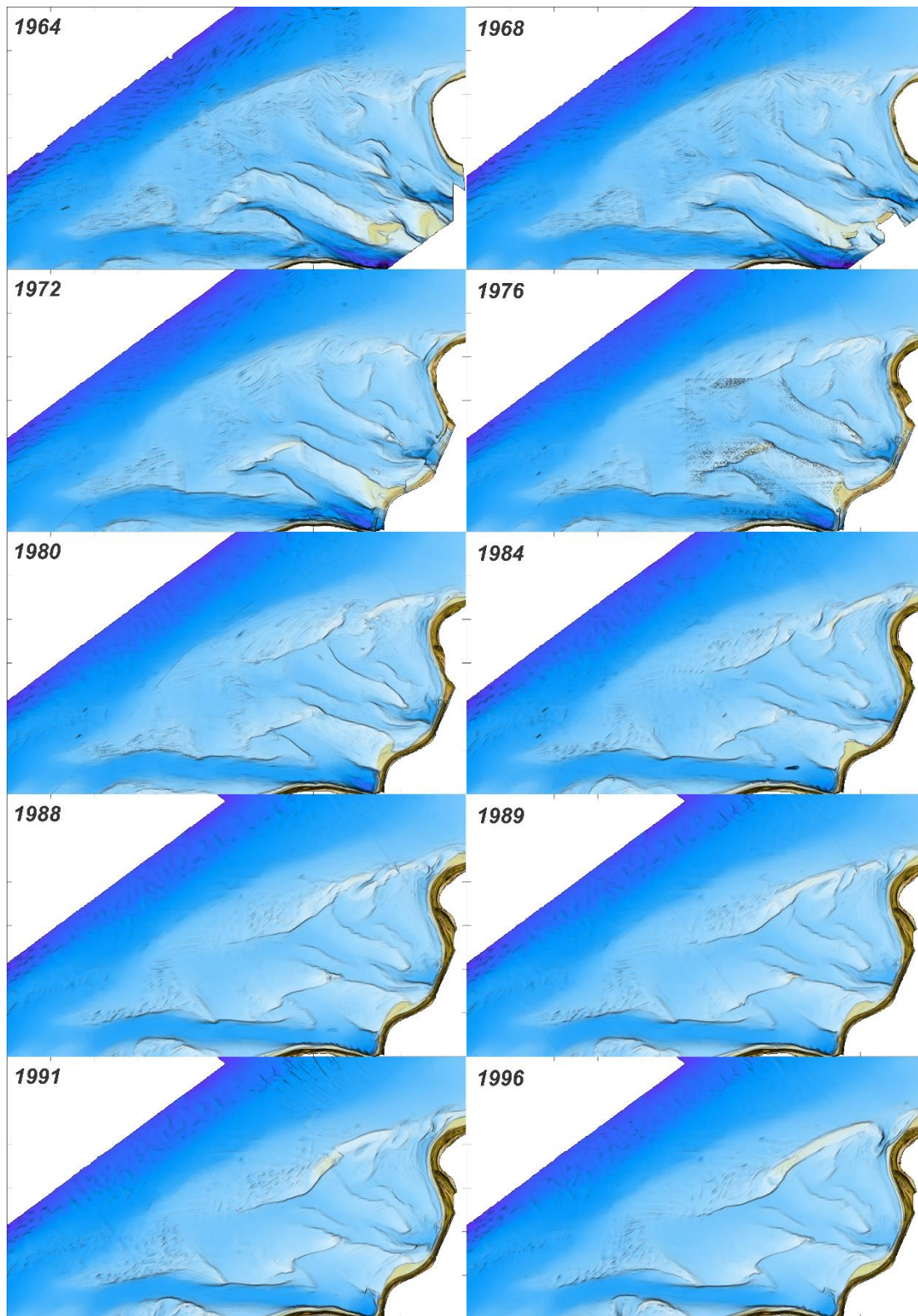
De Vriend, H.J. (1991). "Mathematical modelling and large-scale coastal behaviour. Part 1: Physical processes," Journal of Hydraulic Research, Vol 29-6, 727-740.

Vroom, J., Vermaas, T., Nolte, A., Boon, A., Forzoni, A. (2018). Potentiële import van slib en organisch materiaal naar het Grevelingenmeer door erosie van de aanstroomgeul. Rapport 11202493-000, Deltares, Delft.

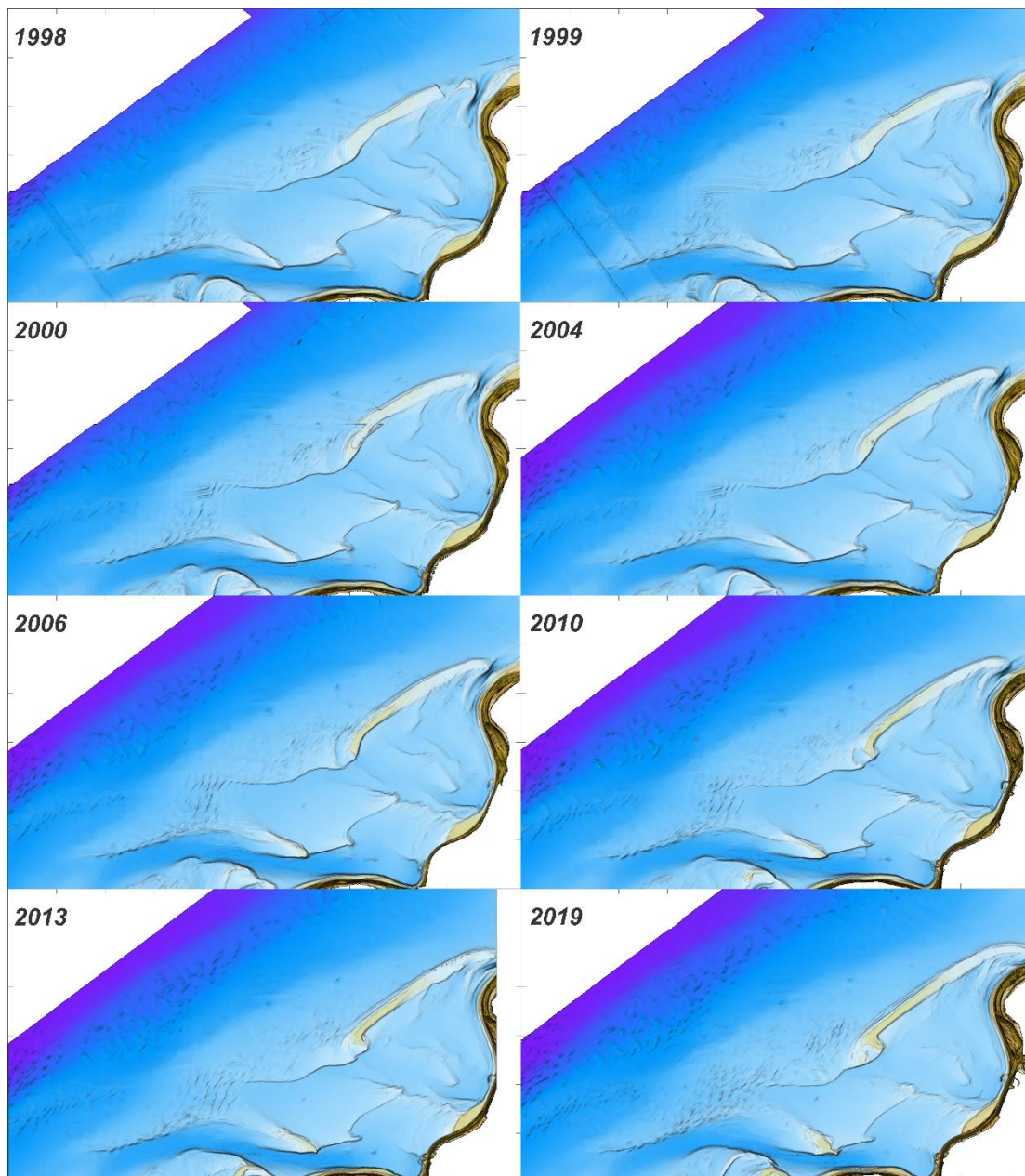
Wang, Z.B. (2010). Morfologische effecten van een getijdecentrale in de Brouwersdam. Rapport 1201650-000, Deltares, Delft.

A Bodemdata

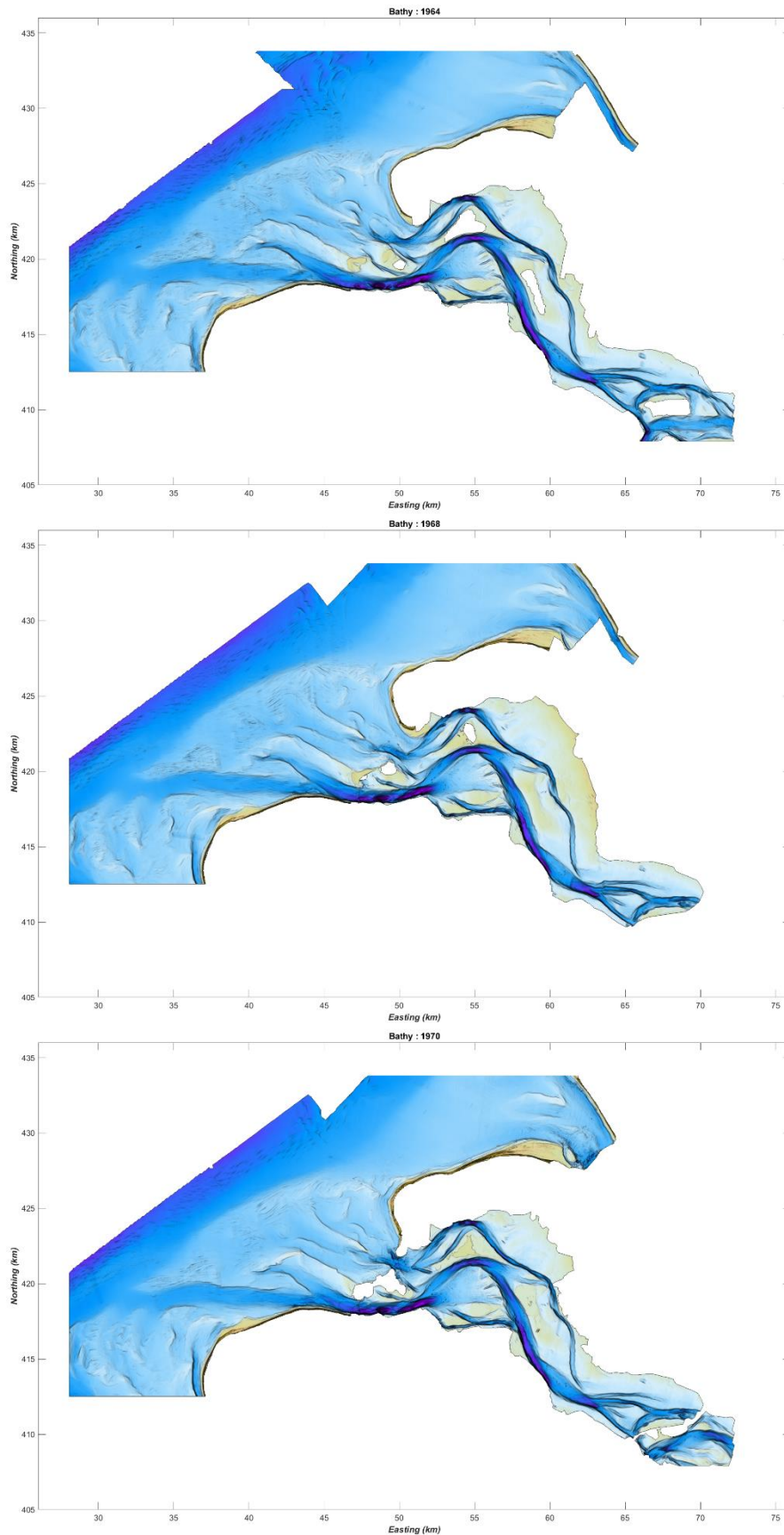
A.1 Een overzicht van de beschikbare bodemdata



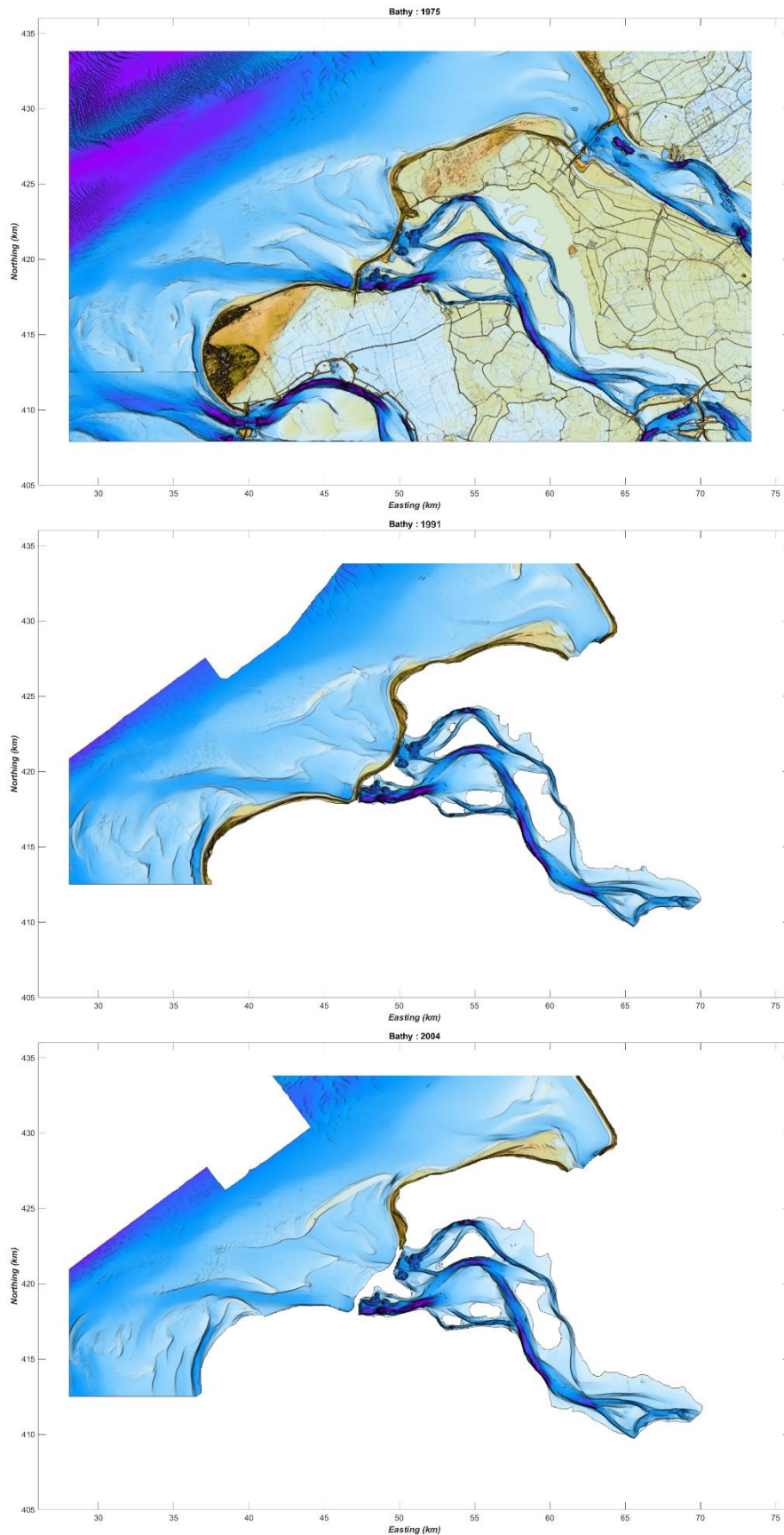
Figuur A- 1: Een overzicht van de Vaklodingen beschikbaar in de monding tussen 1964-1996.



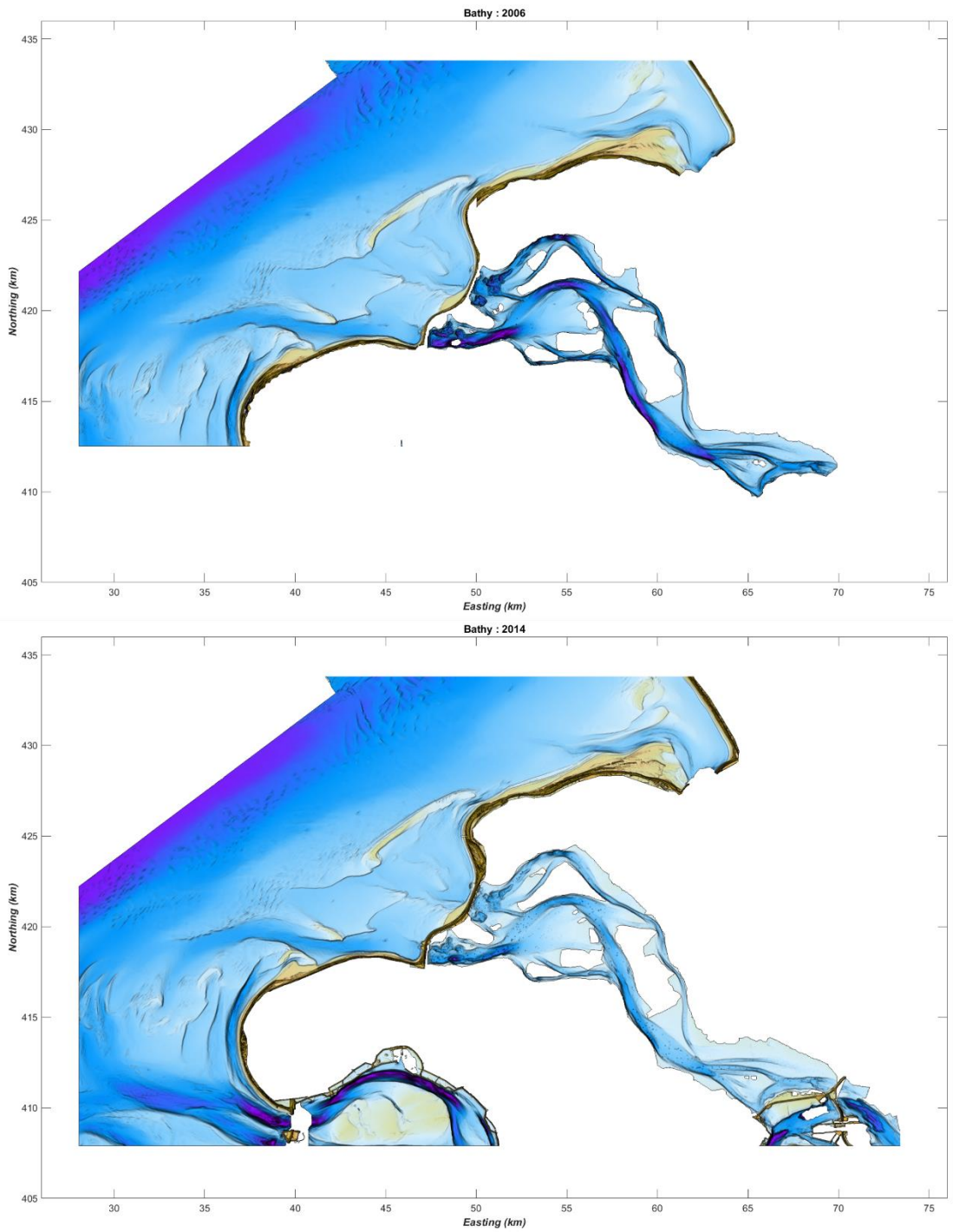
Figuur A- 2: Een overzicht van de Vaklodgingen beschikbaar in de monding tussen 1998-2019.



Figuur A- 3: Een overzicht van de totale bodem van monding + Grevelingen estuarium in 1964, 1968 en 1970

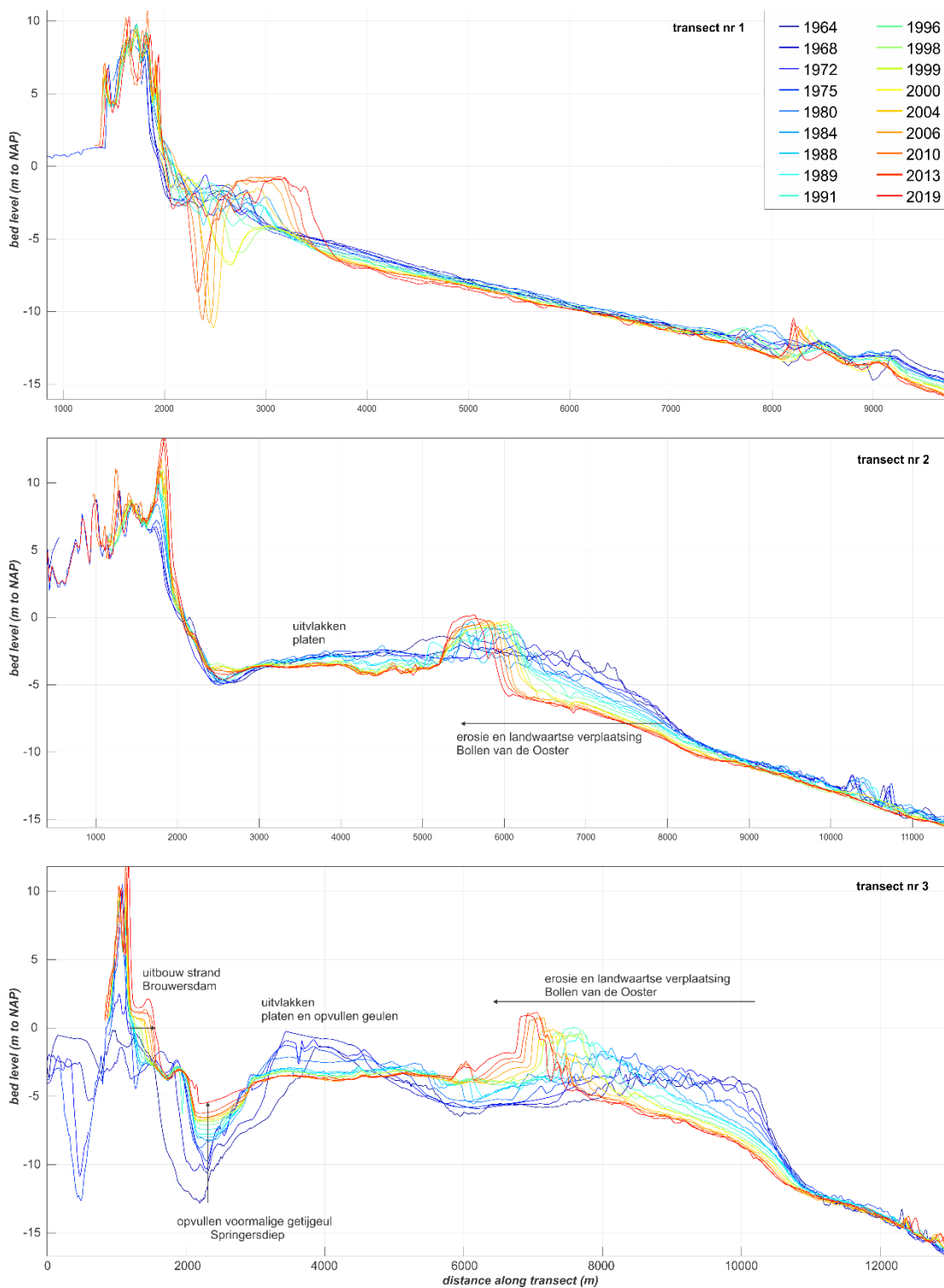


Figuur A- 4: Een overzicht van de totale bodem van monding + Grevelingenmeer in 1975, 1991 en 2004 (de 1975 bodem is hierbij aangevuld met het AHN hoogtebestand).

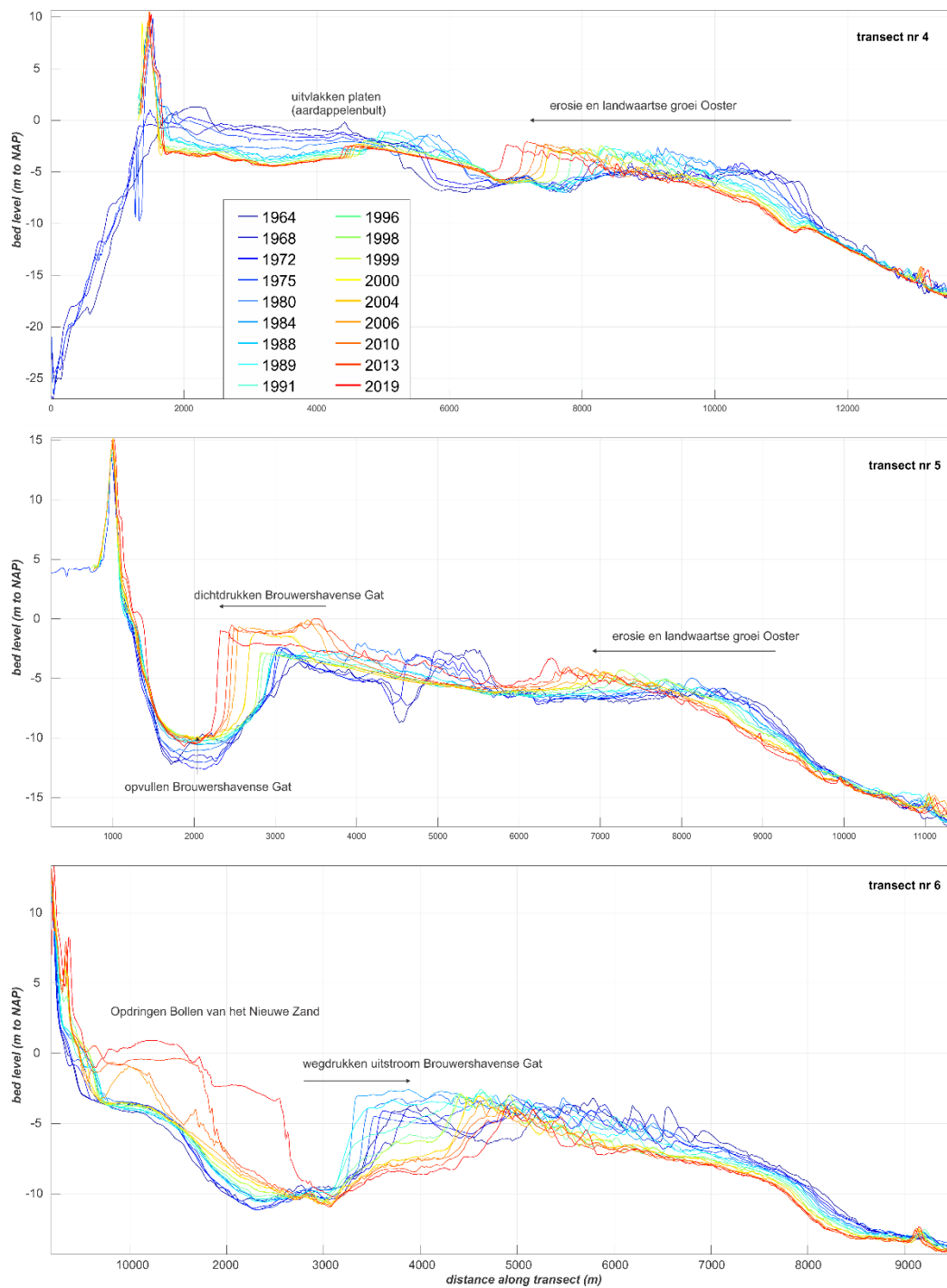


Figuur A- 5: Een overzicht van de totale bodem van monding + Grevelingenmeer in 2006 en 2014

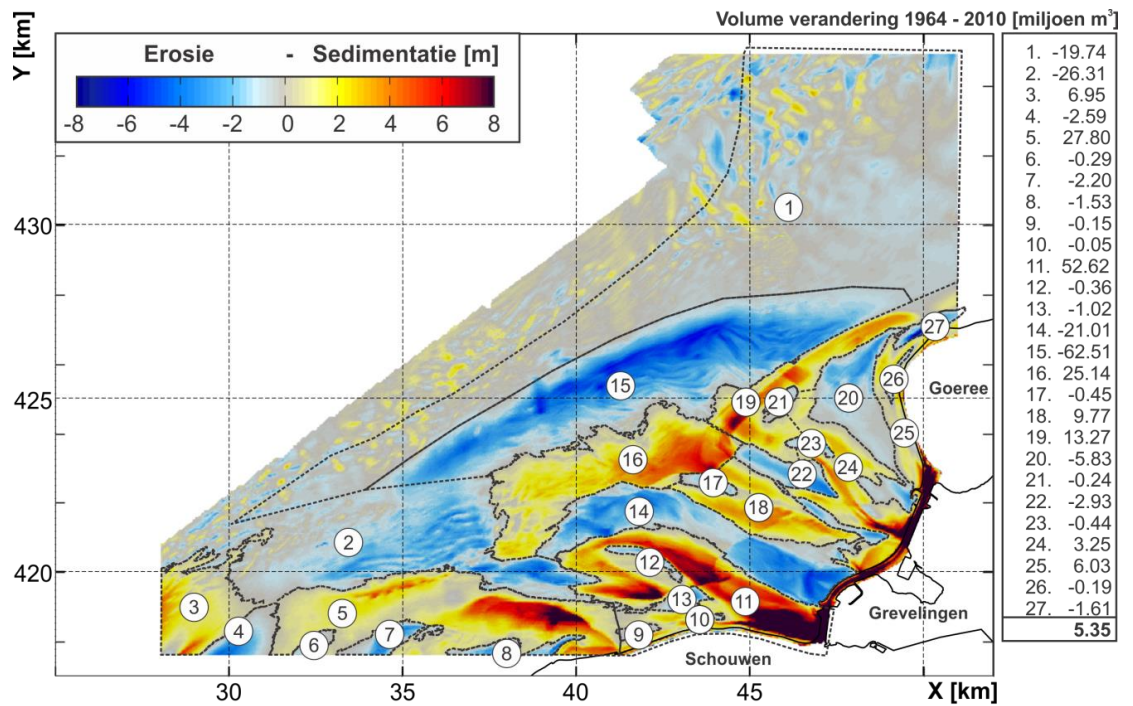
A.2 Ontwikkeling van de Monding



Figuur A- 6: Overzicht van de veranderingen in bodemligging van de Grevelingenmonding over de periode 1964-2010 door middel van representatieve profielen 1-3.



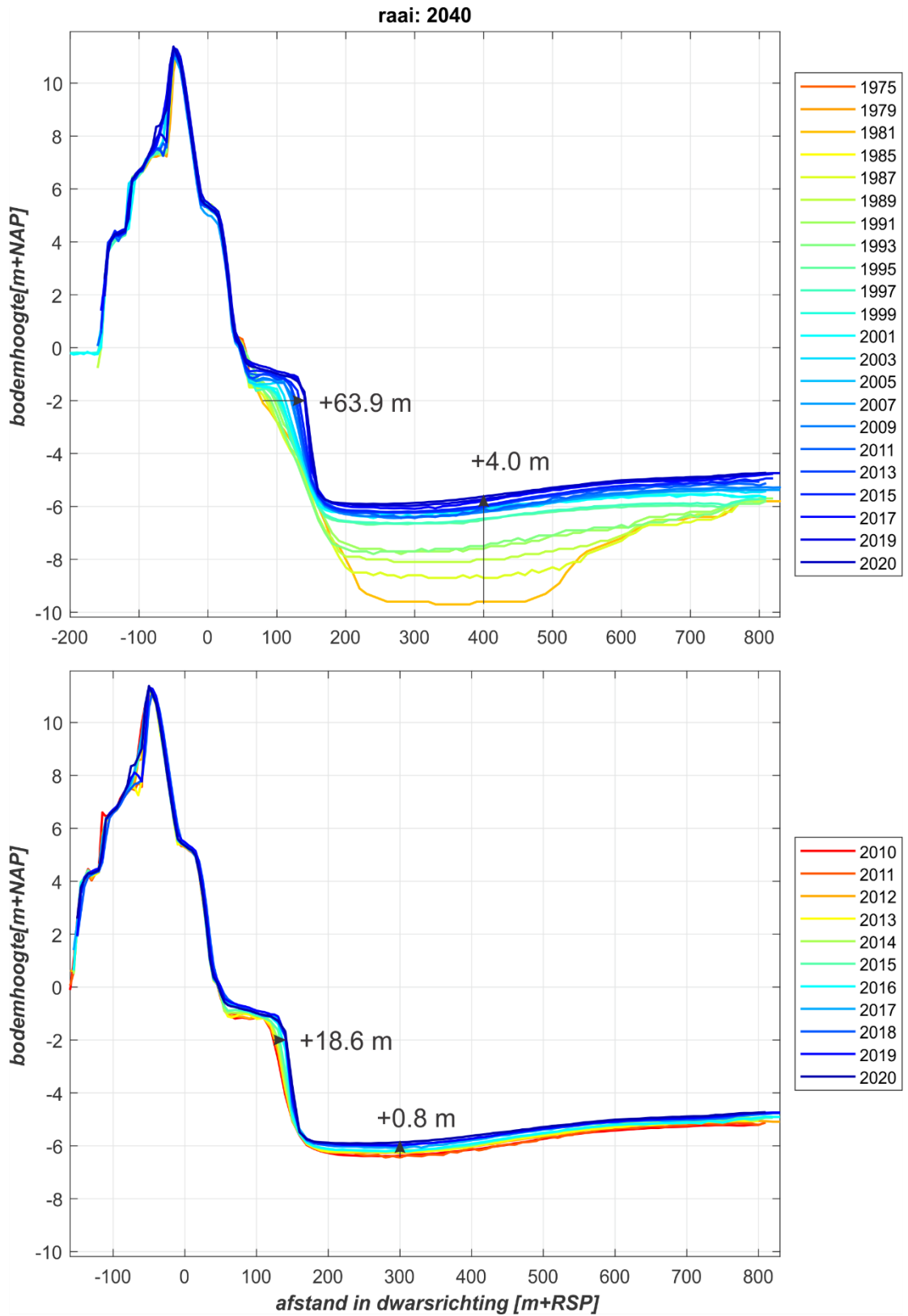
Figuur A- 7: Overzicht van de veranderingen in bodemligging van de Grevelingenmondung over de periode 1964-2010 door middel van representatieve profielen 4-6.



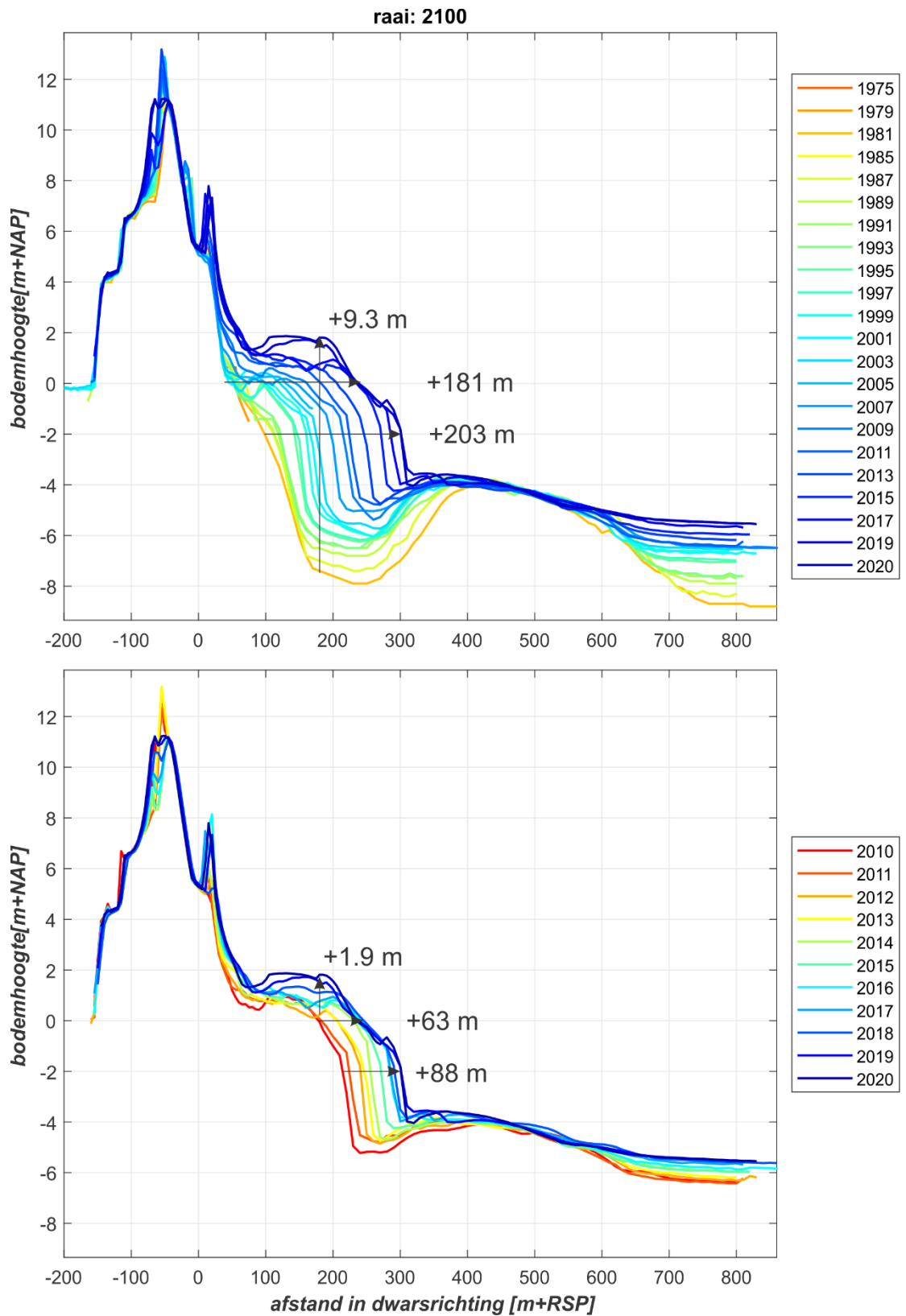
Gebied	Geselecteerde Polygoenen	Volumeverandering (miljoen m ³)		
		sedimentatie	erosie	totaal
Bollen vd Ooster	16, 19, 21	+38.58	-0.41	38.16
Bollen vd Ooster (zee)	15	+0.02	-62.53	-62.51
Aardappelenbult	20, 21, 22, 23, 24, 25, 26	+18.31	-10.04	+8.27
Kouse - Middelplaat	17, 18	+9.77	-0.45	+9.31
Brouwershavense Gat	5, 9, 10, 11, 12, 13, 14	+80.49	-22.67	+57.82
		+147.17	-96.35	+50.82

Figuur A- 8: Overzicht van de sedimentvolume verandering van de Grevelingenmondong over de periode 1964 tot en met 2010 uit Elias en van der Spek (2015).

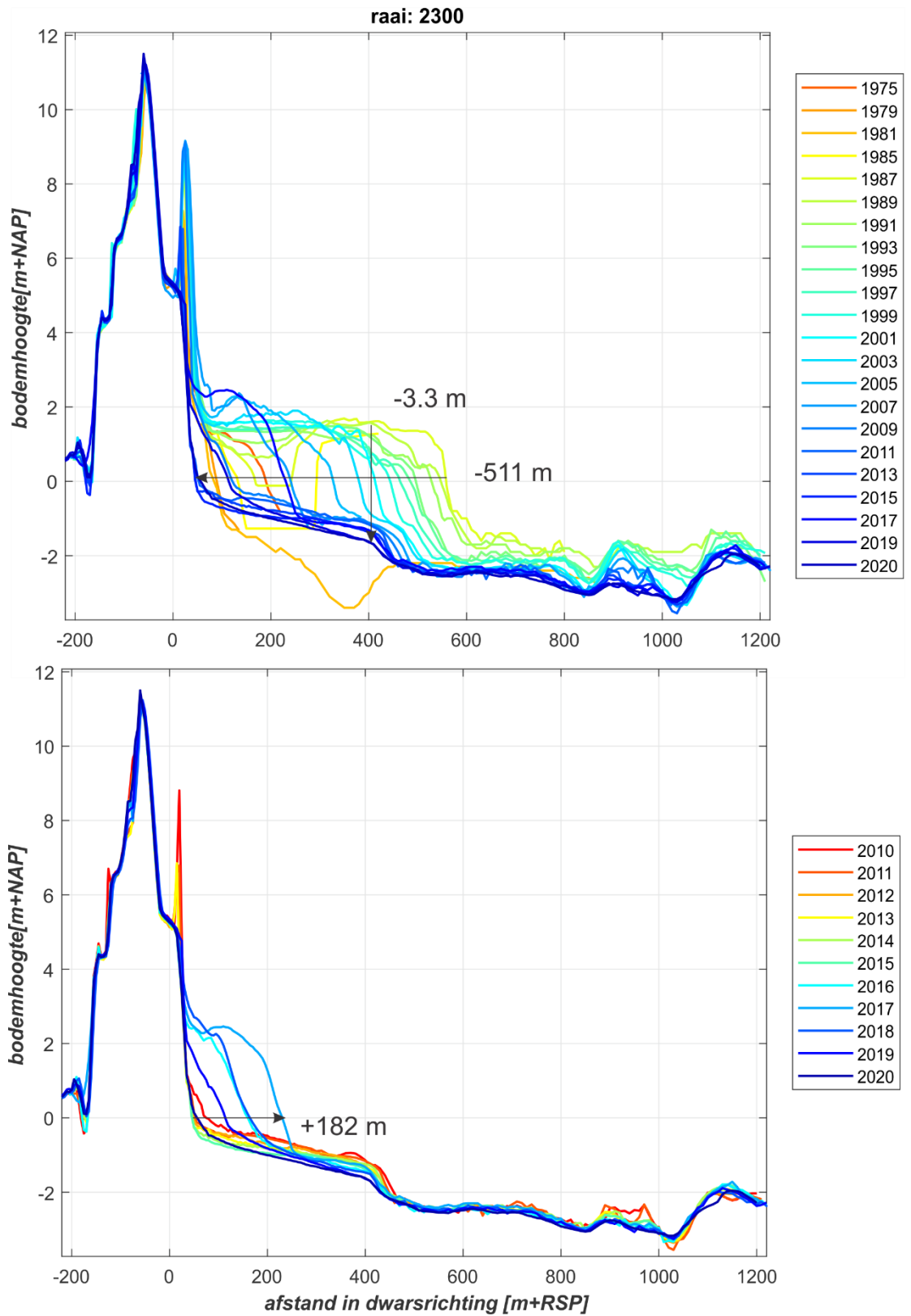
A.3 Dwarsprofielen Brouwersdam



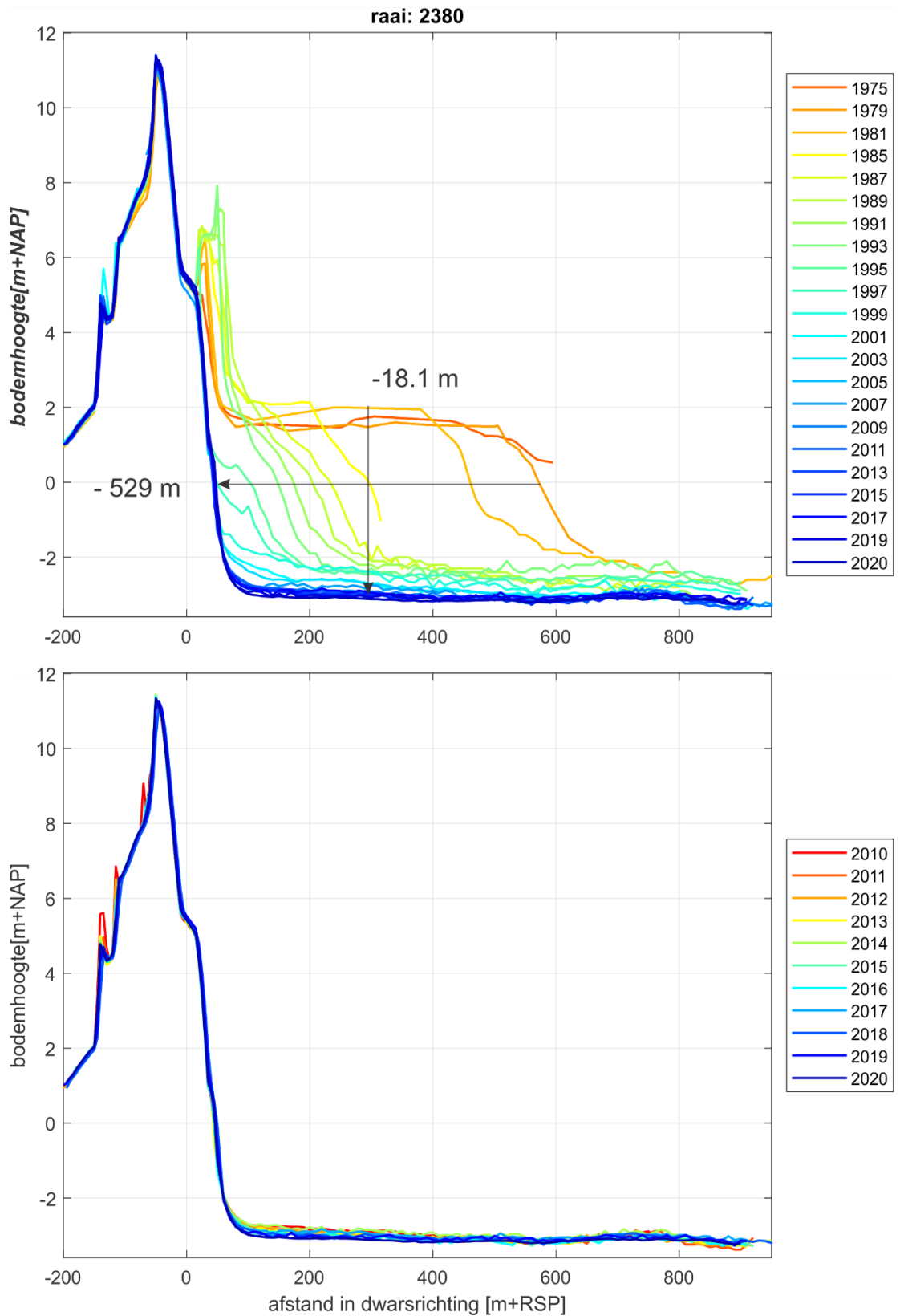
Figuur A- 9: Ontwikkeling van Jarkus raai 2040



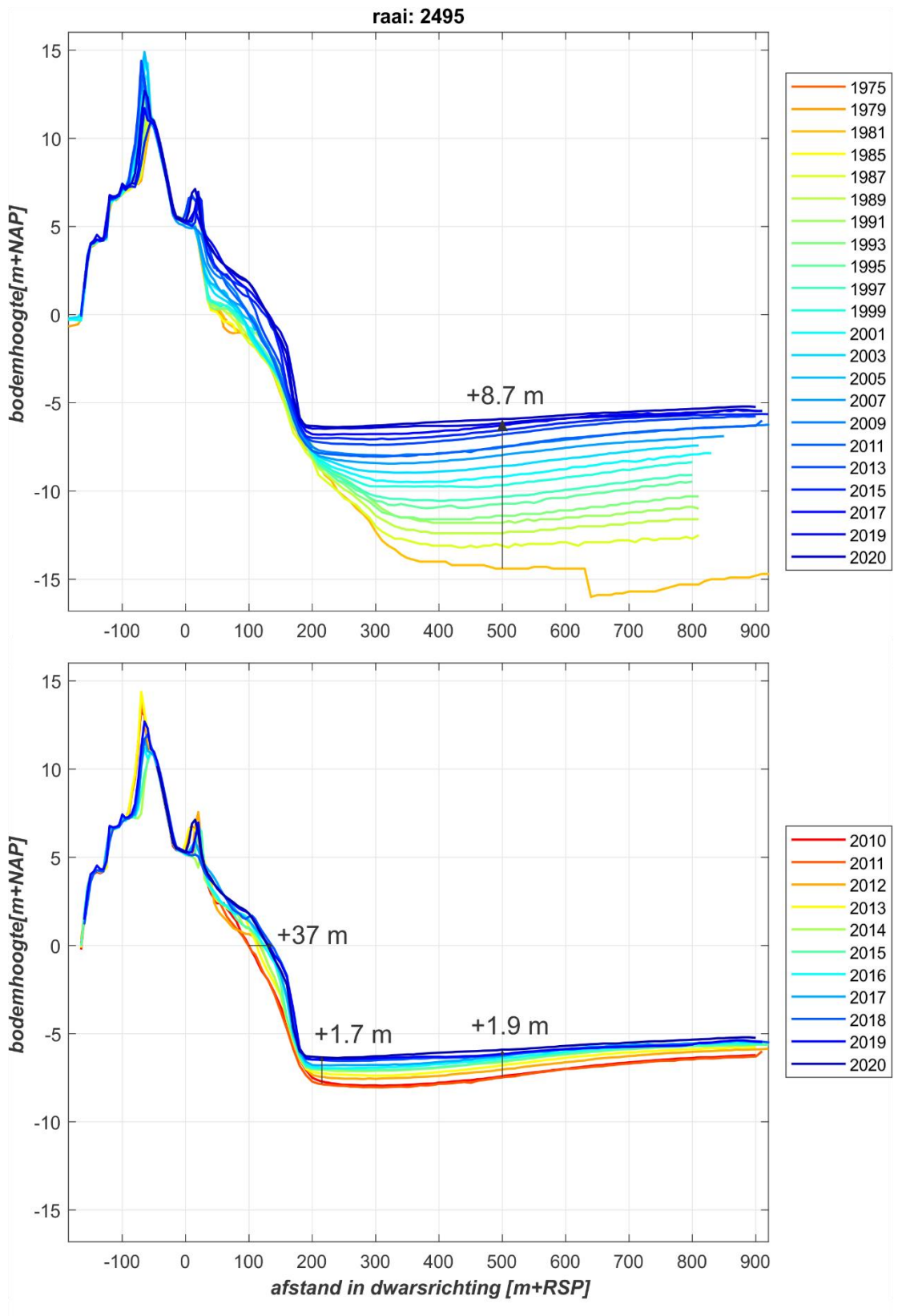
Figur A- 10: Ontwikkeling van Jarkus raai 2100



Figuur A- 11: Ontwikkeling van Jarkus raai 2300



Figuur A- 12: Ontwikkeling van Jarkus raai 2380



Figuur A- 13: Ontwikkeling van Jarkus raai 2495

B Modelering Grevelingenmonding

B.1 Inventarisatie modellen

In het verleden zijn er verschillende modelstudies uitgevoerd (o.a. Janssen, 2012; Elias, 2015; De Boom, 2016; Groenewegen, 2019). Een analyse van de uitgevoerde modellering leert dat in de studie van Janssen (2012) als enige uitgebreide morfologische simulaties zijn uitgevoerd. De modeluitkomsten laten een gemengd beeld zien. De verplaatsing van de Bollen van de Ooster lijkt relatief goed te worden gemodelleerd. Een grote verstoring is zichtbaar in de zuidwestzijde van het modeldomein. Hier worden zeer grote morfologische veranderingen van het Brouwershavensche Gat berekend die niet overeenstemmen met de metingen. Een mogelijke oorzaak is de modelrand die hier dicht bij het gebied van interesse ligt. Aangezien het Brouwershavensche Gat een belangrijke rol speelt voor de Zuidelijke doorlaat is dit eigenlijk niet wenselijk.

De studies van Elias (2015) en Groenewegen (2019) gebruiken identieke stromingsmodellen om de processen rond de Bollen van de Ooster weer te geven. De rekenroosters hebben hoge resolutie rond de Bollen van de Ooster, maar deze hoge resolutie dekt niet het gehele domein. Ook in deze modellen ligt de zuidwestrand dicht bij het Brouwershavensche Gat, mogelijk geeft dit ook een verstoring van de processen hier.

Het model van De Boom (2016) lijkt in dit opzicht meer geschikt. Dit model bevat naast de monding van de Grevelingen en het Haringvliet ook de monding van de Oosterschelde. Dit model zou zowel de zuidelijke uitwisseling tussen Grevelingen en Oosterschelde en noordelijke uitwisseling tussen Haringvliet en Grevelingen nauwkeurig moeten kunnen berekenen. Een bijkomend voordeel van dit model is dat het al toegepast is om de effecten van de Noordelijke en Zuidelijke Doorlaat door te rekenen. Het model van De Boom lijkt hierdoor de beste keuze als basis van de modellering in Stap 2. In de volgende hoofdstukken worden de basiskennmerken van het model en de modelleringsaanpak beknopt weergegeven.

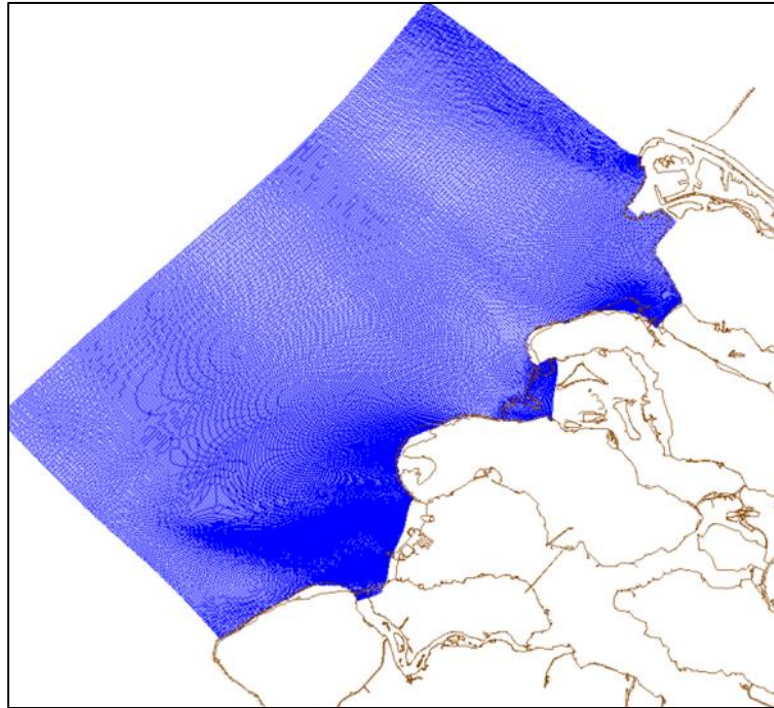
B.1.1 Model schematisatie

De Boom (2017) gebruikt het Delft3D-Flow model voor de berekening van de stromingen in de Grevelingenmonding. Het model is een uitsnede uit het WAQUA-Oosterschelde model van van der Kaaij (2015). Ter beperking van de rekentijd is het modelgrid afgekapt ter hoogte van de Oosterschelde Stormvloedkering (Figuur 5 1). Het rekenrooster heeft een resolutie van 50 m op de Voordelta en 350m in de diepere Noordzee.

Validatie van de waterbeweging is gebaseerd op het jaar 2007 vanwege de beschikbaarheid van meetdata. Voor de afregeling van een model is het exacte jaar eigenlijk van ondergeschikt belang. De randvoorwaarden worden opgelegd door middel van getijdecomponenten. Na afregeling zijn deze ook voor de simulatie van andere jaren geschikt. De onderliggende model bodem is gebaseerd op de 2007 Vaklodingen. Voor nauwkeurige berekening van de waterbeweging in het interessegebied is het natuurlijk wel van belang om hier een nieuwe bodemschematisatie te gebruiken (zie Hoofdstuk 5.3.2).

De Boom (2017) concludeert dat het rekenrooster met 50m resolutie in de monding te grof is om de stromingen en transporten bij de doorlaat in detail door te rekenen. Als verbetering wordt hier de roosterresolutie plaatselijk verhoogd (met een factor 3). Dit geeft dan een resolutie tussen de 15 en 20m. Deze resolutie is ongeveer gelijk aan de resolutie van de beschikbare bodemdata. Het verder verhogen van de resolutie heeft vanuit dit oogpunt dan ook weinig zin en resulteert in simulaties die qua rekentijd onrealistisch zijn. Het gebruik van

het ongestructureerde Flexible Mesh model maakt het mogelijk het rekenrooster op een efficiënte manier te verbeteren, doordat lokaal de resolutie hoger kan worden gemaakt.

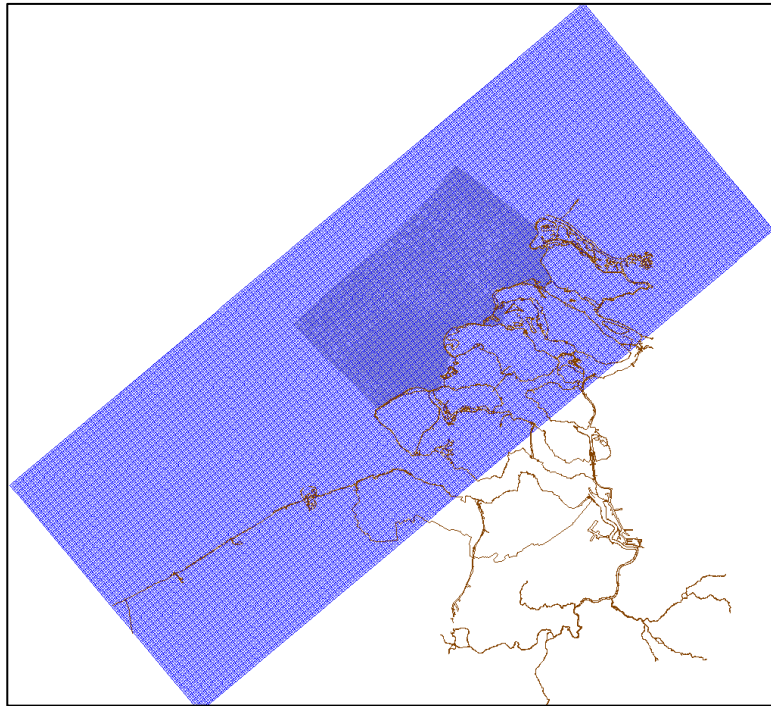


Figuur B- 1: Rekenrooster van het Delft3D-flow model voor de Grevelingenmonding. Het rode blok geeft de lokale verfijning aan welke uitgevoerd wordt in stap 2 van deze studie.

De invloed van golven wordt meegenomen door het SWAN golvenmodel te koppelen aan het stromingsmodel. In voorgaande studies zijn hiervoor verschillende databronnen gebruikt. De studie van Jansen gebruikt Lichteiland Goeree als basis terwijl de studies van Groenewegen (2019) en De Boom (2016) de metingen van Europlatform gebruiken als basis. Op zich maakt het voor de modellering niet heel veel uit of het meetstation iets verder zeewaarts ligt, dit betekent alleen dat de golfmodellen iets groter (Europlatform) of net iets kleiner (Lichteiland Goeree) kunnen zijn. Op diep water kunnen hier grote rekenroosters worden gebruikt, waardoor dit qua rekentijd geen doorslaggevende rol zal spelen.

Met behulp van de gemeten tijdseries in van de meetstations kan een morfologisch golfklimaat worden samengesteld. Afhankelijk van de mate van schematiseren bestaat dit uit meer of minder golfcondities. De studie van Groenewegen (2019) heeft de schematisatie zodanig uitgevoerd dat een golfklimaat met 4 golfcondities overblijft. De ondieptes van de Grevelingenmonding zullen de golven al zodanig beïnvloeden door golfbreking en refractie dat de variabiliteit die op de open-zee speelt veel minder is. Ook met een beperkt aantal golven zal het effect op de sedimenttransporten bij de doorlaat in kaart kunnen worden gebracht. Voor het bepalen van het relatief effect van de Noorderlijke of Zuidelijke Doorlaat ten opzichte van een referentie simulatie lijkt zo'n grove schematisatie voldoende. Als aanvulling kunnen aanvullende simulaties uitgevoerd worden om bijvoorbeeld de effecten van een storm te bepalen.

Concluderend, het lijkt logisch om voor de modelering van de Noordelijke en Zuidelijke doorlaat te beginnen met het morfologisch golfklimaat van Groenewegen (2019) als basis. Het gebruikte golvenrooster van De Boom (2016) is geschikt voor het uitvoeren van de golfsimulaties.



Figuur B- 2: Rekenrooster van het Delft3D-golven model voor de Grevelingenmondning (de Boom, 2019). Het donkere vlak is identiek aan het stromingsmodel. In deze studie heeft dat de hogere resolutie in de monding.

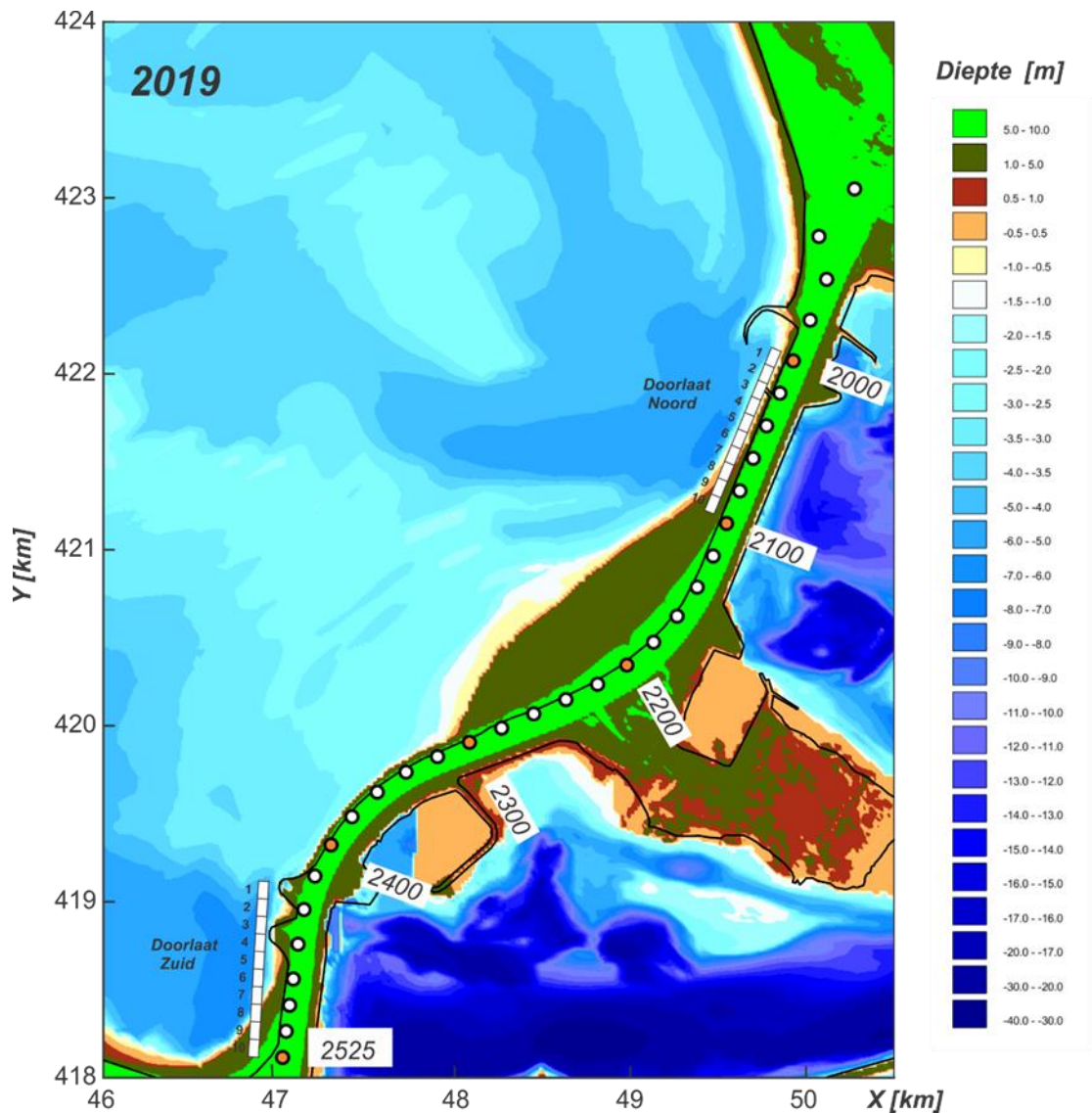
B.1.2 Modelbodem

Een overzicht van de beschikbare bodemdata is gegeven in H. 3.1. Als basis voor de modellering wordt de samengestelde bodem van 2019 gebruikt. Deze bodem geeft de meest recente dekking van de Grevelingenmondning en de twee naastliggende mondingsgebieden.

Een detail beeld van de vooroever van de Brouwersdam is weergegeven in Figuur B-3. In deze figuur zijn voor zowel de positie van de Zuidelijke als de Noordelijke doorlaat 10 mogelijke locaties geïdentificeerd (genummerd 1-10). Iedere locatie bestaat uit een blok van 100m lang.

Voor de noordelijke doorlaat geldt dat vrijwel alle posities aansluiten op het voorliggende Springersdiep. Aangezien het Brouwerstrand hier noordelijk verplaatst lijkt een keuze van de noordelijke posities logischer dan een keuze voor de zuidelijke positie. Een tweede optie is het aansluiten van de twee diepste delen aan weerszijden van de dam. Dit zou een doorlaat rond positie 6 geven.

De zuidelijke doorlaat ligt op een lastige locatie. Op posities 1 en 2 ligt een bestaande spuisluis. Als deze gehandhaafd dient te worden dan ligt de keuze op vakken 5 tot 10. Ook de vakken nabij de kust van schouwen zijn minder geschikt door mogelijke ondermijning van de oever. Dit beperkt de keuze tot vakken 5-7. Deze vakken zijn centraal gelegen in het Brouwersdiep.



Figuur B- 3: Detail bodemligging nabij de Brouwersdam en mogelijke plaatsing van de doorlaat.

Naast de bodemhoogte lijkt ook de bodemsamenstelling een rol te spelen. De geulaanzanding in het Springersdiep bestaat voor een groot deel uit silt. Hier moet een overweging gemaakt worden om met twee fracties te rekenen. Een normale zandfractie die een gemiddelde korreldiameter van de monding representeert en een silt fractie voor de ingevulde geulen van het Springersdiep. Een dergelijke verdeling is mogelijk binnen de bestaande modellen.

B.1.3 Morfologische schematisaties van de golven

De gemeten tijdseries van de golven zijn niet direct geschikt voor het toepassen in numerieke modellen. Het volledig berekenen van transportpatronen, representatief voor de lange termijn trends vereist zeer lange modelsimulaties. De modelsimulaties moeten immers een grote en representatieve spreiding van getij, wind en golfcondities doorrekenen. Met procesgebaseerde modellen zoals Delft3D zijn dergelijke simulaties eigenlijk niet mogelijk gezien de benodigde rekeninspanning. Een benadering van representatieve transportpatronen kan echter wel gemaakt worden door gebruik te maken van schematisaties (zie De Vriend et al., 1991; Lesser, 2009).

Het afleiden van een morfologisch representatief golfklimaat is echter geen triviale zaak. In morfologische simulaties zijn de rekentijd en het aantal golfcondities direct aan elkaar gekoppeld. Meer golfcondities betekent een aanzienlijk langere simulatie. De uitdaging in het afleiden van het morfologische golfklimaat ligt dan ook in het vinden van het minimaal aantal representatieve golfklassen.

Voor de Grevelingenmonding is een aantal studies al een representatief golfklimaat geconstrueerd (Jansen, 2012; de Boom, 2016; Groenewegen, 2019). Deze schematisaties variëren in aanpak en het uiteindelijke aantal golfklassen dat overblijft. In onderstaande paragrafen zijn de drie golfklimaten samengevat

Golfklimaat van Jansen (2012)

Een morfologisch golfklimaat voor de Brouwersdam is afgeleid in de studie van Jansen (2012) en weergegeven in Tabel B-1. Dit golfklimaat is gebaseerd op de metingen van Lichteiland Goeree ((golfhoogte, golfperiode, windsnelheid, windrichting) en van Europlatform (golfrichting) over de periode 1981-2002.

Tabel B-1: Morfologisch golfklimaat gebaseerd op Lichteiland Goeree (1981-2002). Bron: Jansen (2012).

Conditie	H_{sig} [m]	H_{dir} [°]	$T_{H1/3}$ [m]	W_{vel} [m/s]	W_{dir} [°]	% voorkomen
1	1.58	359.95	6.03	8.34	8.02	8.8
2	3.15	357.80	7.31	13.98	8.08	0.8
3	1.73	264.82	5.49	10.25	263.59	4.5
4	3.35	264.53	6.93	16.36	266.33	1.3
5	1.72	320.86	5.92	8.95	300.99	8.2
6	3.36	316.29	7.27	14.82	309.52	2.3
7	0	0	0	0	0	74.1

Morfologisch golfklimaat (de Boom, 2016).

Een morfologisch klimaat onderverdeeld in 12 golfklassen is afgeleid in de studie van de Boom (2016). In deze afleiding worden de data van het Europlatform gebruikt (Figuur 3.10). Dit station is ongeveer 50km noordelijk van de Brouwersdam gelegen, maar heeft als voordeel dat alle benodigde parameters daadwerkelijk hier gemeten zijn. In de afleiding van het morfologische golfklimaat is de periode 1979-2002 gebruikt voor de golven en 1983-2005 voor de wind. De golven zijn onderverdeeld in 12 golfhoogte-richting klassen, waarna voor iedere klasse de gemiddelde hoogte en periode bepaald zijn. Het geschematiseerde golfklimaat is weergegeven in Tabel B-2.

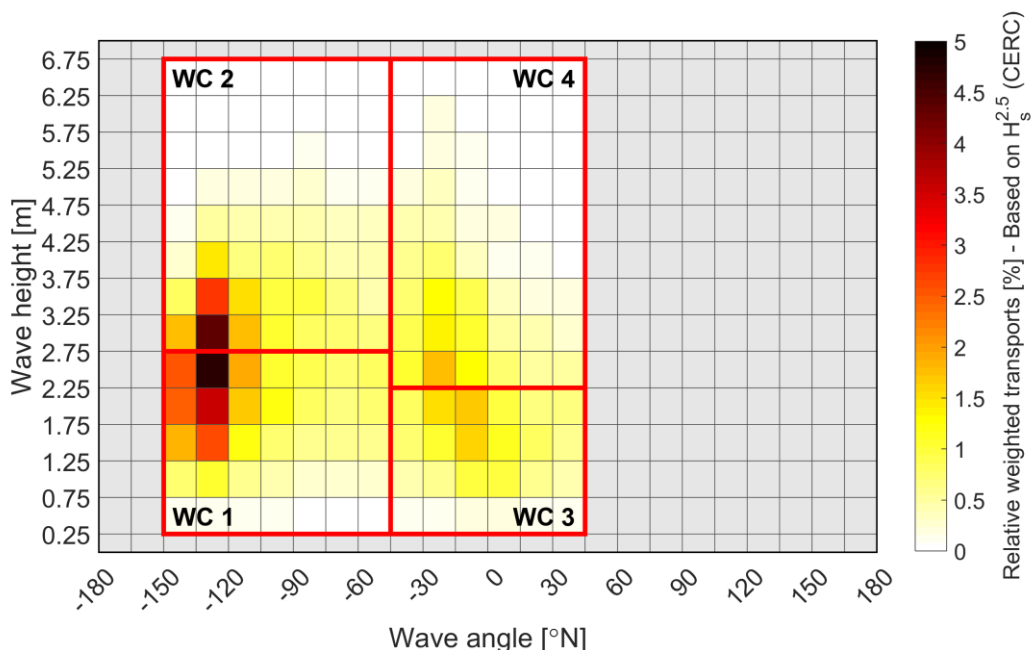
Tabel B-2 : Morfologisch golfklimaat gebaseerd op Europlatform Bron: de Boom (2016).

		Waveheight class	Avg Hm0 (m)	Avg Tm0 (s)	Avg wave dir. (°N)	Avg wind vel. (m/s)	Avg wind dir. (°N)	frequency	Condition No.	
Wave direction (°N)	0-45	0<Hm0<2	0.927	4.266	18.8	6.013	44.7	15.641	Con1	
		2<Hm0<5	2.545	5.557	20.4	11.975	36.0	1.445	Con7	
	45-180	0<Hm0<2	0.870	3.820	98.8	6.904	110.3	10.973	Con2	
		2<Hm0<5	2.426	5.205	80.1	12.651	86.7	0.522	Con8	
	180-225	0<Hm0<2	1.110	3.933	210.0	8.043	193.9	11.963	Con3	
		2<Hm0<5	2.544	5.123	214.9	13.909	199.8	2.717	Con9	
	225-270	0<Hm0<2	1.085	4.044	243.1	7.325	231.7	17.662	Con4	
		2<Hm0<5	2.726	5.380	240.7	13.679	238.7	6.173	Con10	
	270-315	0<Hm0<2	0.963	4.113	293.3	5.894	266.2	8.753	Con5	
		2<Hm0<5	2.787	5.489	291.8	12.443	284.1	2.262	Con11	
	315-360	0<Hm0<2	0.965	4.536	342.4	4.943	323.7	18.330	Con6	
		2<Hm0<5	2.711	5.724	338.7	11.105	329.2	3.482	Con12	
									Total:	99,401

Morfologisch golfklimaat van Groenewegen (2019).

In de studie van Groenewegen (2019) is ook het Europlatform gebruikt voor de afleiding van het morfologische golfklimaat. De gevolgde aanpak is in essentie gelijk aan de Boom, alleen worden alleen golven met een richting tussen Zuidzuidwest (210°) en Noordoost (45°) meegenomen in de analyse. De redenering hierachter is dat bij oostelijke, afluiddige wind, er nog geen golven opgewekt zijn in de Grevelingenmond.

Het golfklimaat wordt onderverdeeld in klassen met in 0.5 m golfhoogte interval en 15° in richting. In iedere klasse worden de golven gewogen bij elkaar opgeteld rekening houdend met een hun morfologische impact. Hiervoor wordt een vereenvoudigde CERC transport relatie gehanteerd op basis van $H_s^{2.5}$. Dit resulteert in 169 golfcondities. Uit deze 169 golfcondities wordt een vereenvoudigd golfklimaat opgebouwd dat bestaat uit 4 klassen. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt uit golven uit het noorden en zuidwesten en een gemiddelde en storm conditie. De exacte indeling van de klassen is gemaakt door de klassen zo in te delen dat deze een ongeveer gelijke bijdrage aan de sedimenttransporten geven (Figuur B-3 en Tabel B-3).



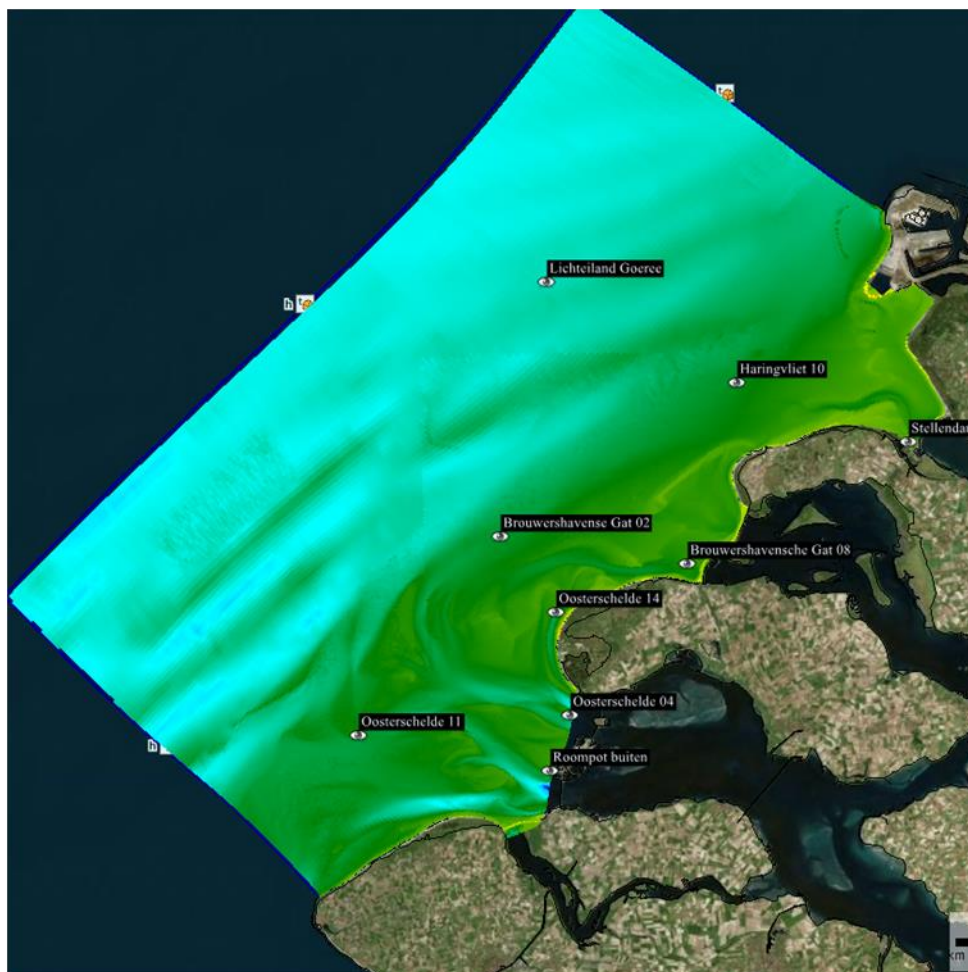
Figuur B-4: Een overzicht van de berekend transporten per golfhoogte – richtingsklasse. De rode vlakken illustreert de indeling van de 4 gekozen klassen van het morfologische golfklimaat.

Tabel B-3: Morfologisch golfklimaat gebaseerd op Europlatform (1981-2001). Bron: Groenewegen (2012).

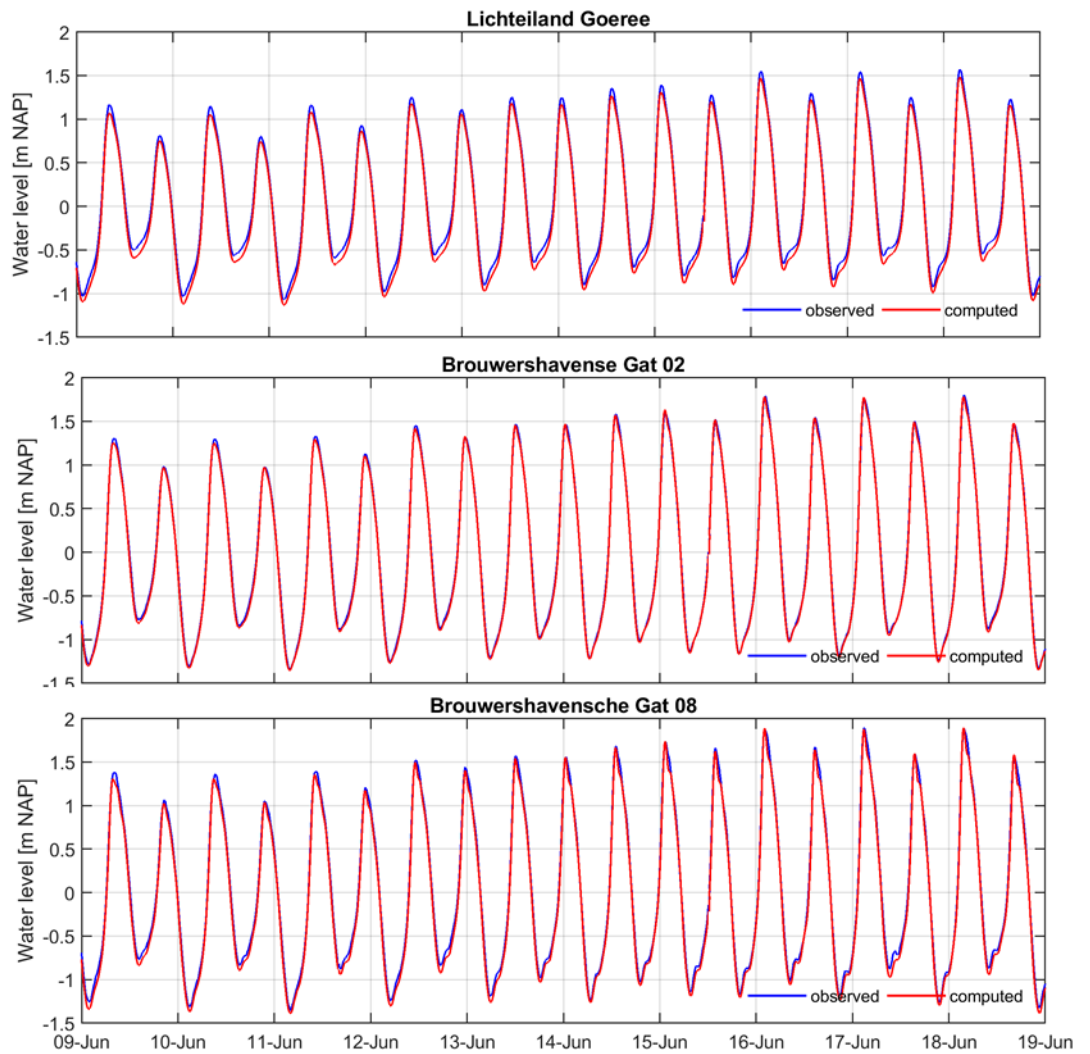
Conditie	H_{sig} [m]	H_{dir} [°]	$T_{H1/3}$ [m]	Wvel [m/s]	Wdir [°]	% voorkomen
1	1.50	249.60	4.27	8.28	231.4	18.1
2	3.39	249.92	5.81	15.42	245.63	39.31
3	1.17	358.46	4.52	5.79	175.45	4.03
4	3.01	348.59	5.86	12.13	243.92	34.99
(getij)	-	-	-	3.92	164.32	3.57

B.2 Methode

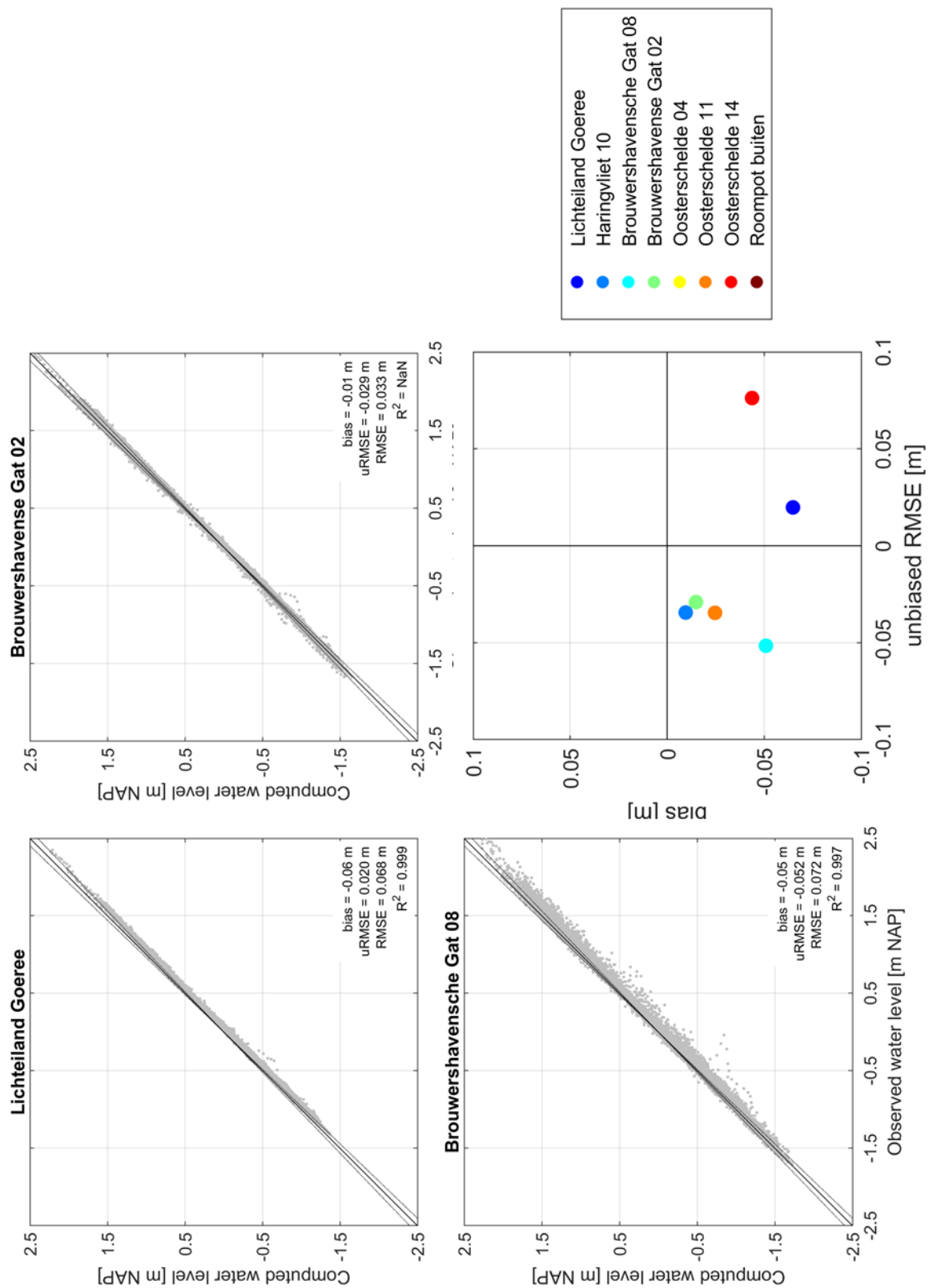
B.2.1 Validatie waterstanden



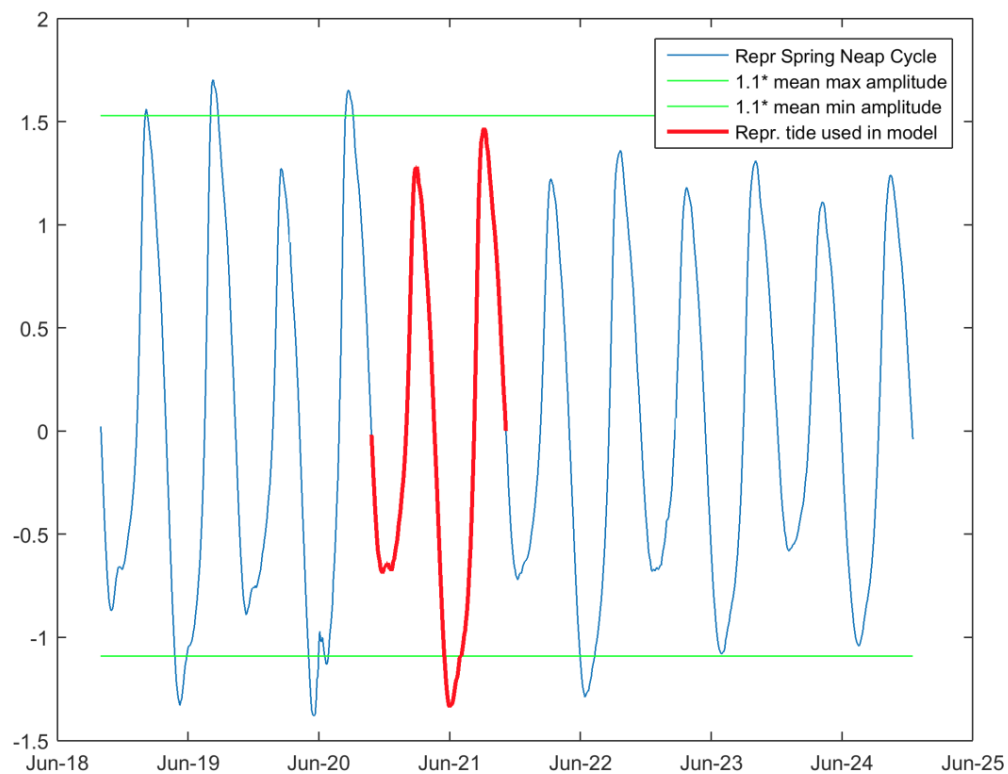
Figuur B- 5: Ligging van de meetstations gebruikt in de validatie van de waterstanden.



Figuur B- 6: Validatie van de waterstanden in 3 meetstations (Zie Figuur A-1 voor ligging van de meetstations).

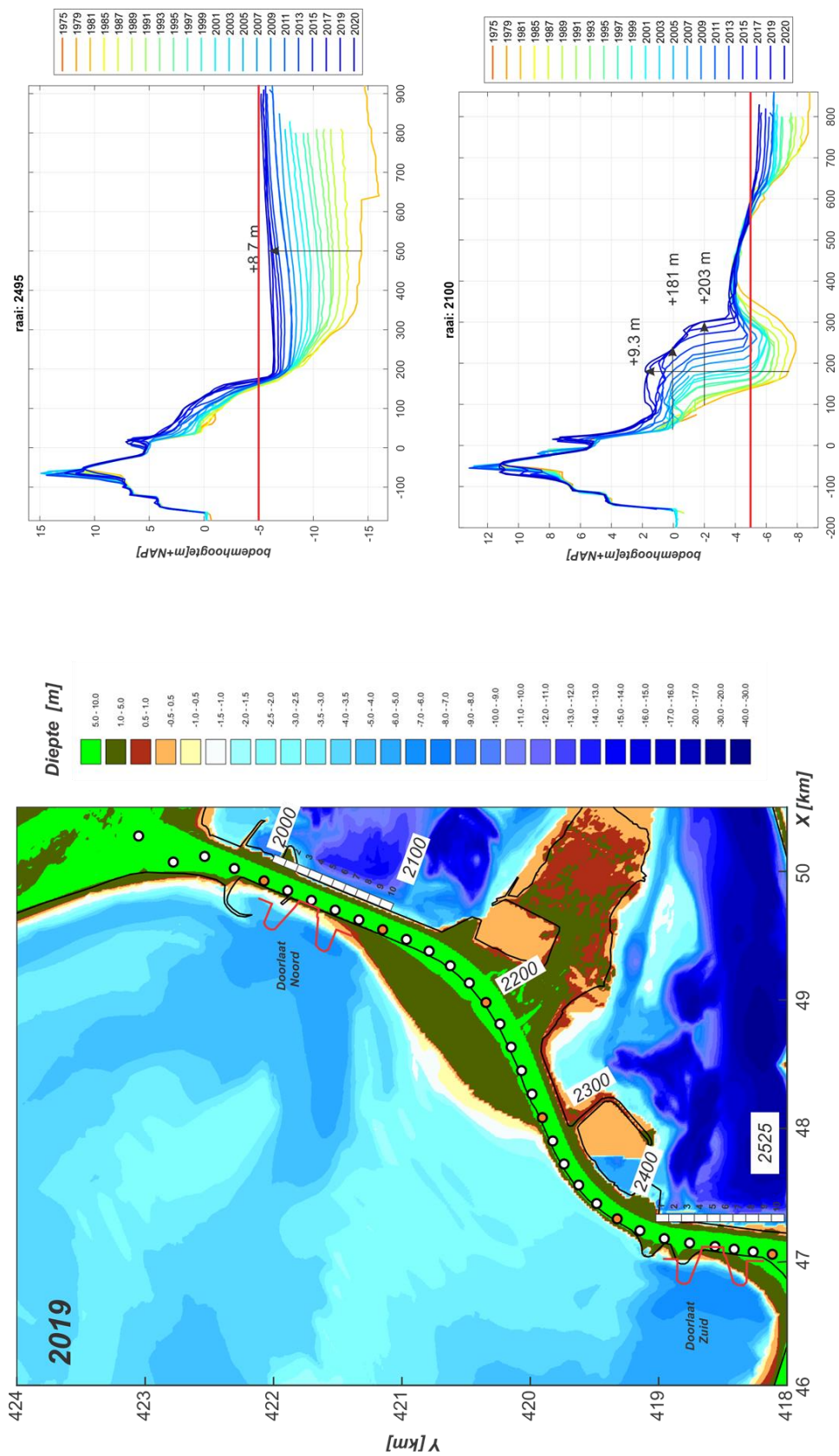


Figuur B- 7: Validatie van de waterstanden in 3 meetstations (zie Figuur A-1 voor ligging van de meetstations).

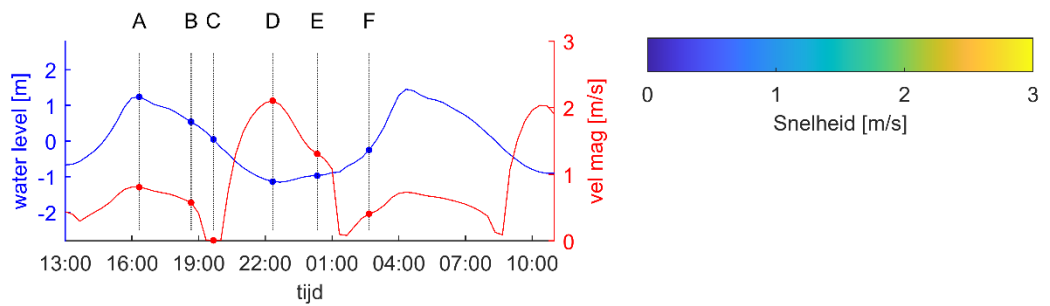
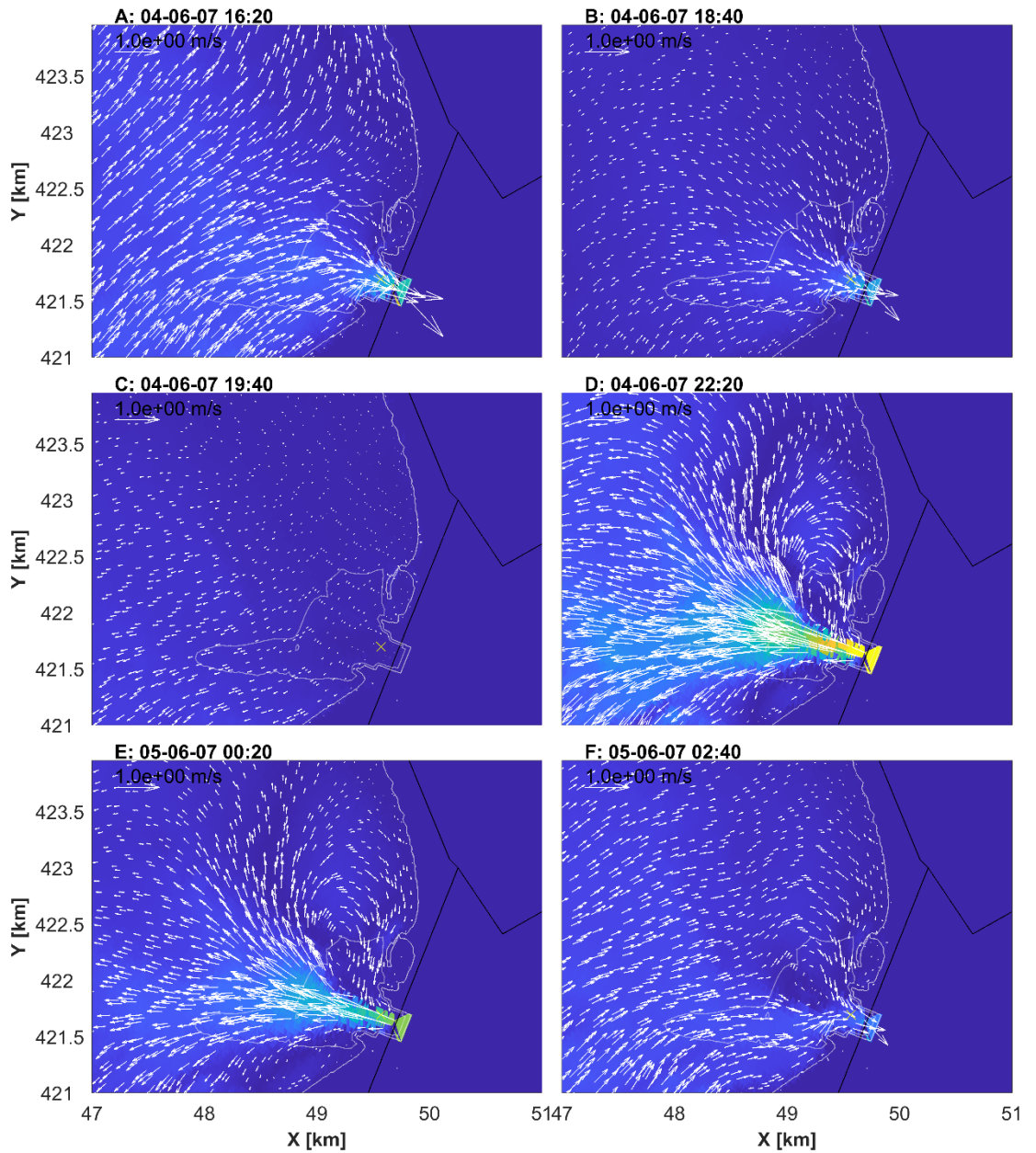


Figuur B- 8: Keuze van morfologisch representatieve getij (De Boom, 2006).

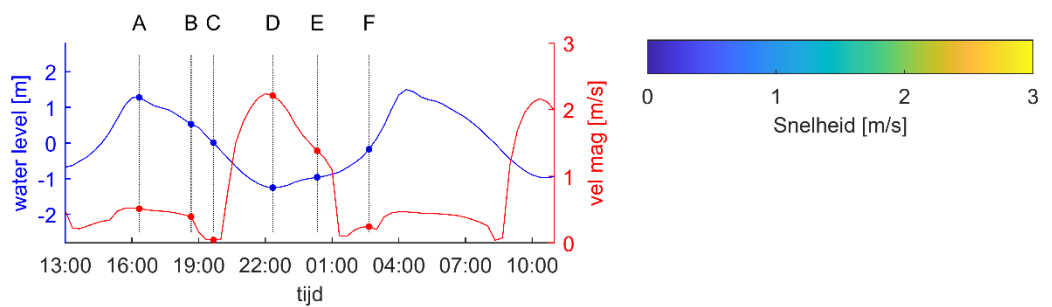
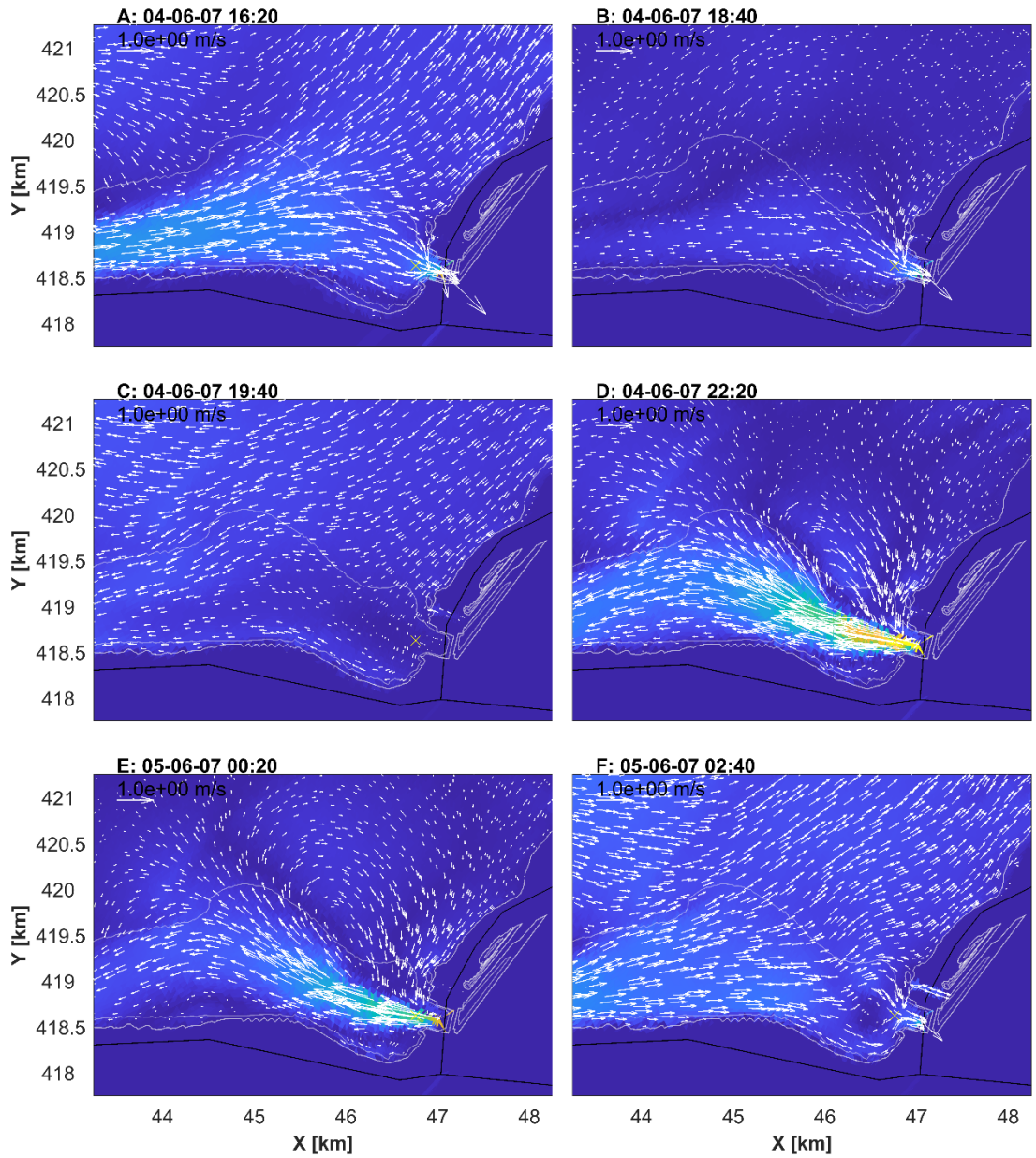
B.2.2 Positionering doorlaatmiddel, ontgrondingskuil en uitstroomjet



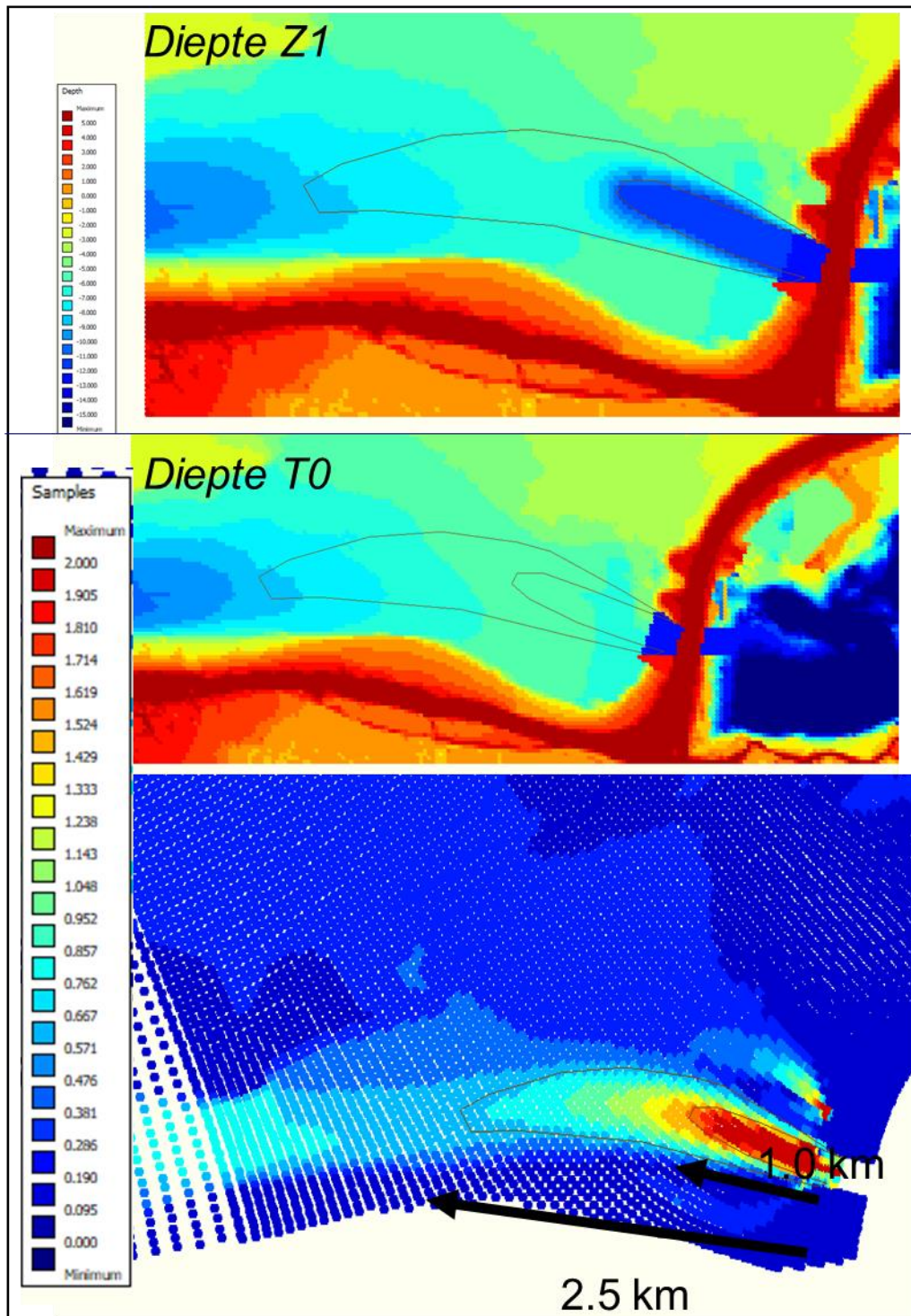
Figuur B- 9: Positionering doorlaatmiddel Noord en Zuid



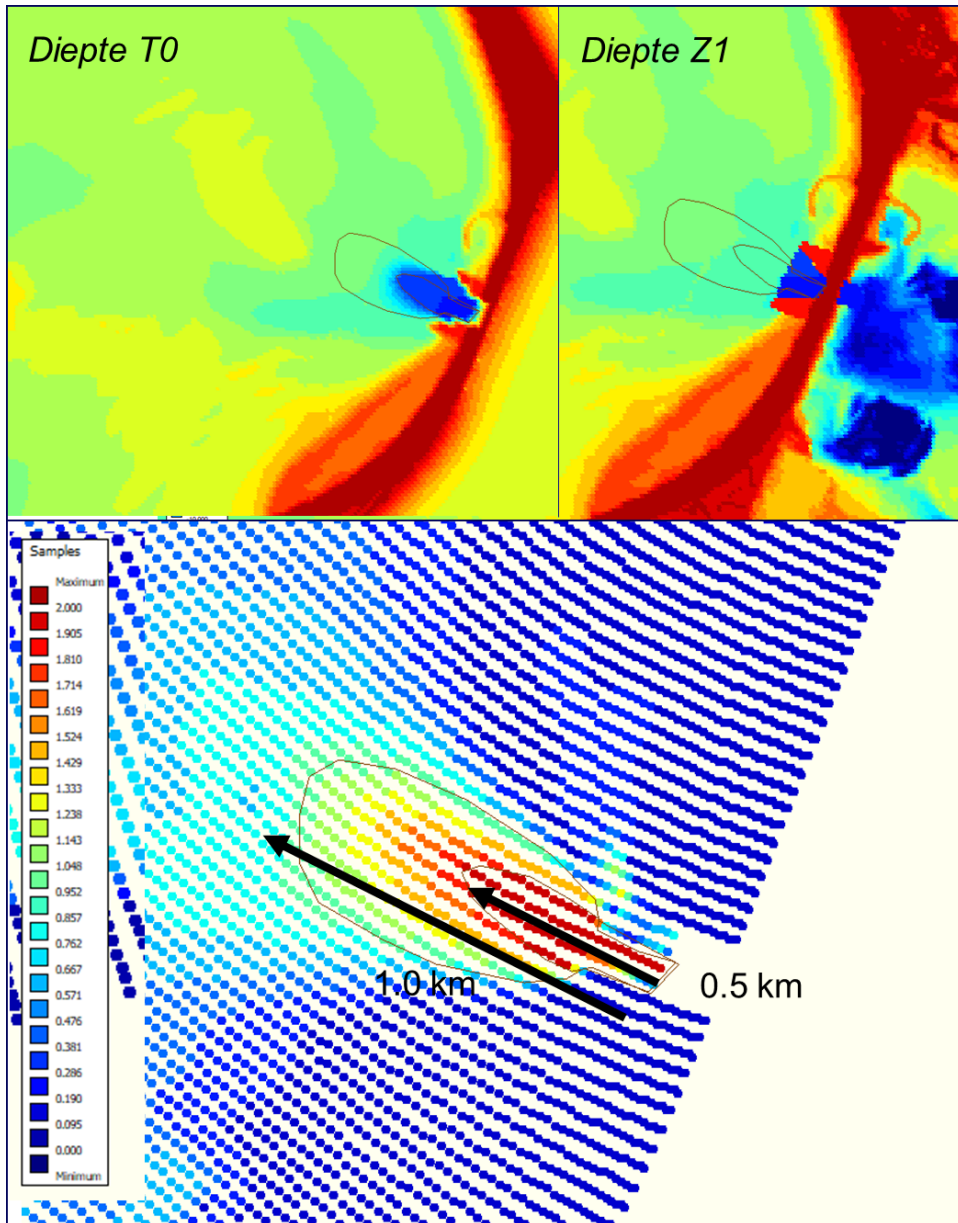
Figuur B- 10: Snelheidsvelden als gevolg van de aanleg van doorlaatmiddel Noord.



Figuur B- 11: Snelheidsvelden als gevolg van doorlaatmiddel Zuid.

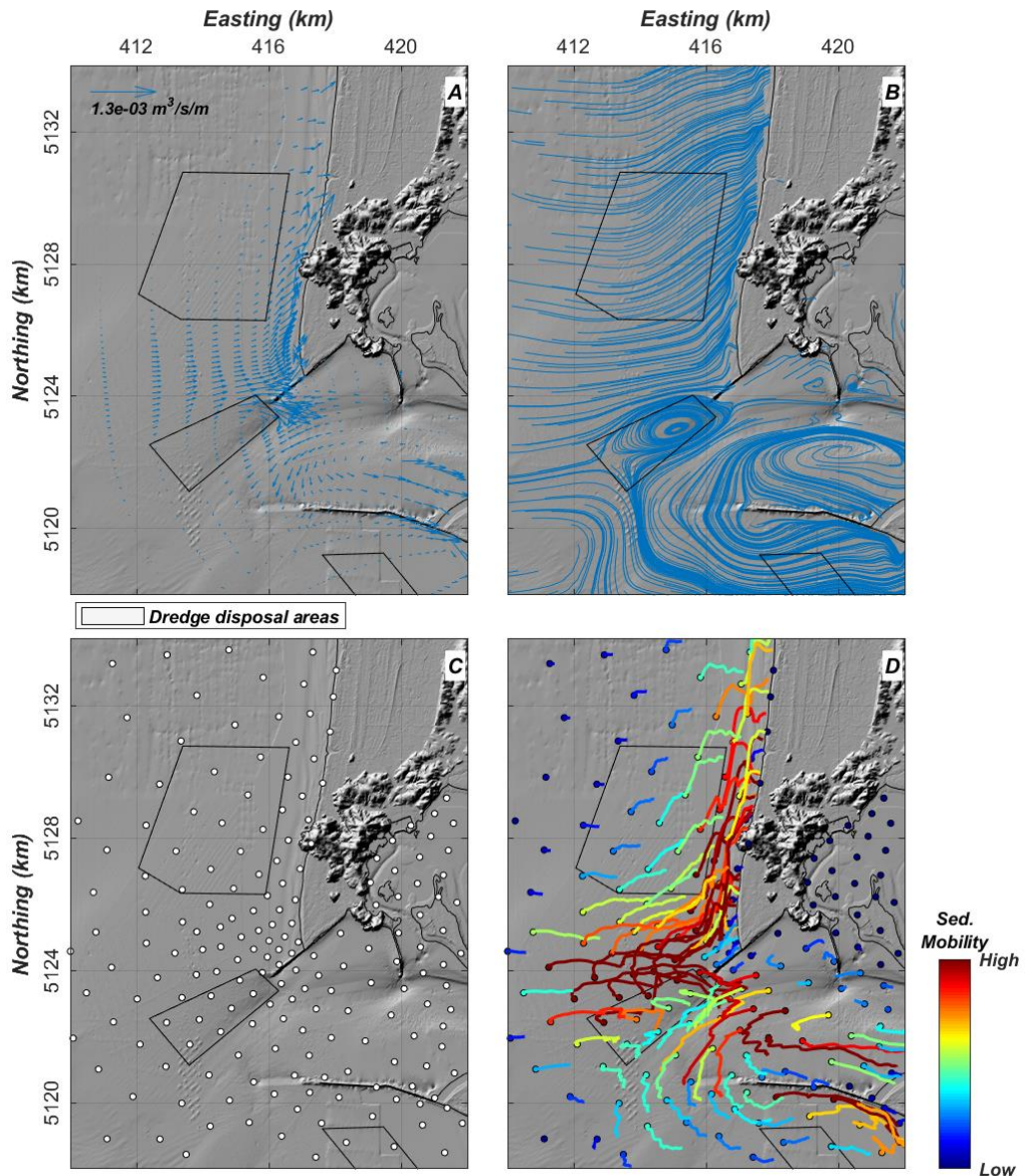


Figuur B- 12: Aanpassing van de modelbodem t.b.v. uitstroomjet (doorlaatmiddel Zuid).



Figuur B-13: Aanpassing van de modelbodem t.b.v. uitstroomjet (doorlaatmiddel Noord)

B.2.3 SedTrails



Figuur B- 14: Een voorbeeld van de SedTRAILS methode. Door Delft3D wordt het sedimenttransport vectorveld berekend. Deze vectoren kunnen we ook als stroomlijnen weergeven (B). Een veld met sedimentbronnen wordt opgelegd (C). In deze sedimentbronnen worden sedimentdeeltjes losgelaten die dan op basis van de stroomlijnen propageren door het rekenrooster. Het stroomlijnenveld varieert door de tijd (met het getij en de golven) hierdoor ontstaan complexe sedimenttransportpaden (D). De transportpaden tonen de verplaatsing en de relatieve verplaatsingssnelheid van het sediment. De cirkel is de plaats van loslating en de lengte van de staart is een mate van verplaatsing. Let op, SedTRAILS is niet afgeregeld op de werkelijke verplaatsingssnelheid van het sediment. De lengte van de staart vertoont daarom de relatieve mate van verplaatsing. Een langere staart betekend meer verplaatsing dan een kortere staart. De resultaten van SedTRAILS vertonen een “spaghetti” aan banen. Door gebruik te maken van slimme vragen “queries” en statische methodes zoals connectiviteit. Kunnen we deze spaghetti ontwarren en verbanden tussen de verschillende morfologische gebieden in kaart brengen.

B.2.4 Modelleringsvragen

Als uitwerking van de expertsessie Morfologie (H2.2.6) zijn per doorlaat een aantal voor- en nadelen gedefinieerd. Deze opsomming vormt een goede basis voor de uit te voeren modellering. In Tabel B-4 en B-5 worden deze nog een keer samengevat inclusief aanvullende opmerkingen.

Tabel B-4: Een uitwerking van de Zuidelijke doorlaat

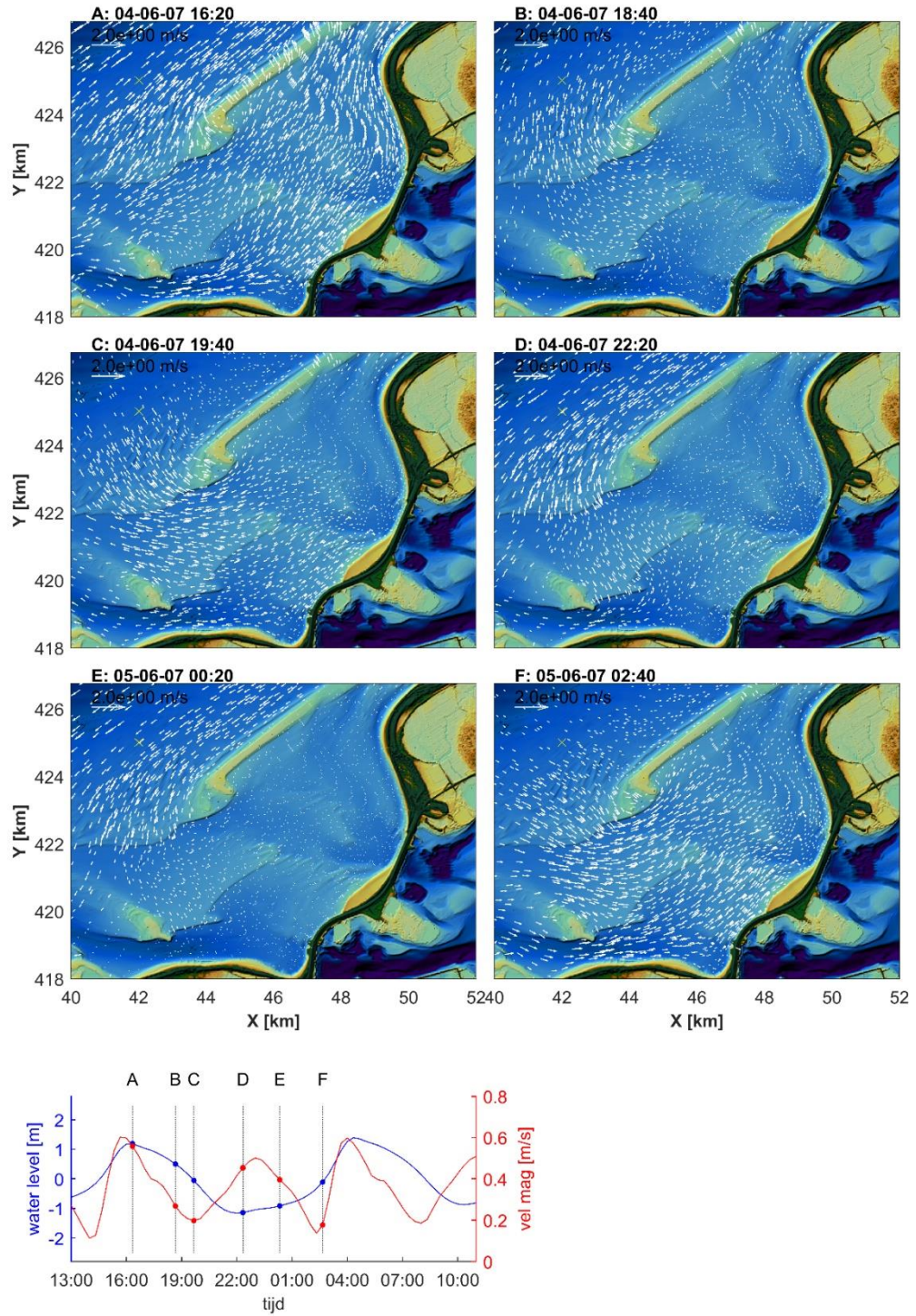
Voordelen	Beantwoording of Uitwerking in modellering
Sluit aan op bestaande diepe getijgeul: rustiger patroon van morfologische aanpassingen	Dit lijkt ook in de 2019 bodem nog van toepassing. Verdere toetsing in de modellering aan de hand van stromingen en transporten (instantaan, residueel en SedTRAILS)
Kleinere kans op versterkte kusterosie door Schaar bij Goeree	Toetsing d.m.v. modellering. Analyse initiële sedimentatie en erosie patronen, SedTRAILS.
Nadelen	Beantwoording of Uitwerking in modellering
Minder herstel van getijdynamiek in grotere kustgebied	Toetsing d.m.v. modellering. Stromingspatronen, SedTRAILS verplaatsingsnelheid en patronen.
Kleinere kans op vastgroei Bollen vd Ooster aan Goeree	Bollen van de Ooster is al aan grote verandering onderhevig. Het is waarschijnlijk dat deze morfologisch al sterk veranderd zijn vóór de uiteindelijke aanleg. Zie de conceptuele beschrijving van Van der Spek en Elias (2020).
Sluit aan op bestaande diepe getijgeul: rustiger patroon van morfologische aanpassingen	Toetsing d.m.v. modellering. Verdere toetsing in de modellering aan de hand van stromingen en transporten (instantaan, residueel en SedTRAILS)
Kans op kusterosie door sterke uitstroom langs kust Schouwen (Noorderstrand, Renesse)	Toetsing d.m.v. modellering. Analyse initiële sedimentatie en erosie patronen, SedTRAILS.
Kans op erosie door neer in hoek van kust Schouwen, mogelijk strekdam nodig	Toetsing d.m.v. modellering. Analyse initiële sedimentatie en erosie patronen, SedTRAILS.
Door ontgroning import van slibrijk sediment naar Grevelingenmeer. Meer slib dan bij Noord	Niet toetsbaar binnen deze studie (zandtransport modellering).
Bestorten ontgrondingskuil is moeilijker door slibrijke ondergrond	Niet toetsbaar binnen deze studie (zandtransport modellering)
Minder ruimte voor ontgrondingskuil: eerder bestorting nodig	Niet toetsbaar binnen deze studie (zandtransport modellering)
Door kleilagen in bodem kans op onregelmatige, onvoorspelbare erosie	Niet toetsbaar binnen deze studie (zandtransport modellering)

Tabel B-5: Een uitwerking van de Noordelijke doorlaat

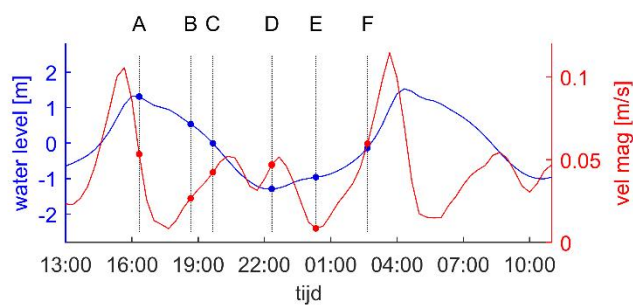
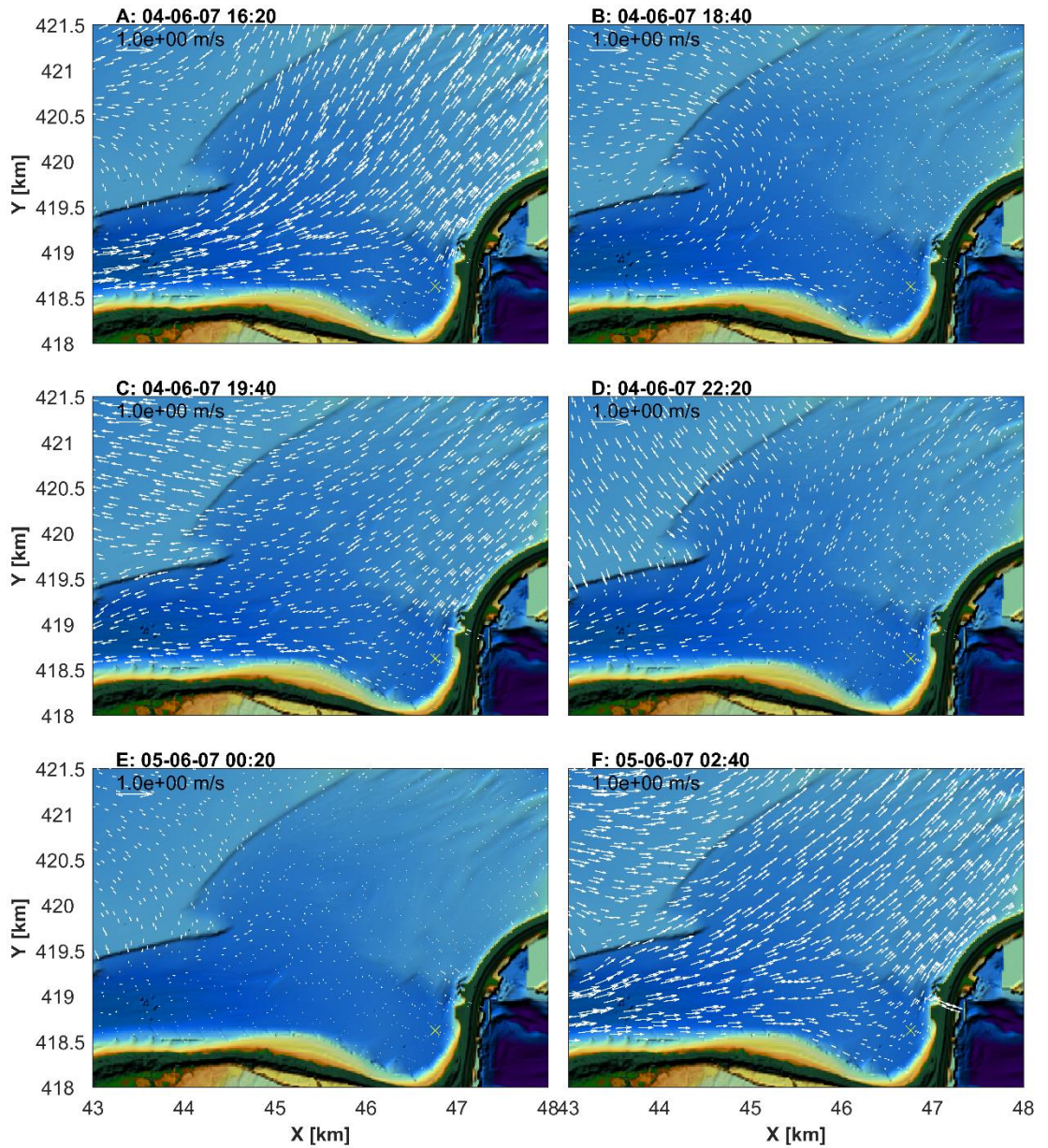
Voordelen	Beantwoording of Uitwerking in modellering
Uitstroom in WZW-richting zorgt voor meer dynamiek in grotere kustgebied met nieuwe geul.	Toetsing m.b.v. de transportmodellering. Verdere toetsing in de modellering aan de hand van stromingen en transporten (instantaan, residueel en SedTRAILS)
Kans op vastgroei Bollen vd Ooster aan kust Goeree.	Bollen van de Ooster is al aan grote verandering onderhevig. Het is waarschijnlijk dat deze morfologisch al sterk veranderd zijn vóór de uiteindelijke aanleg. Zie de conceptuele beschrijving van Van der Spek en Elias (2020).
Sterke uitstroom is van kust af gericht: geen kans op directe kusterosie.	Toetsing m.b.v. de transportmodellering. Dit lijkt in tegenspraak met morfologische veranderingen bij de andere eilandkoppen. Door herstel getijstromingen zullen waarschijnlijk kortsluitgeulen langs de eilandkop vormen, waardoor extra kusterosie kan optreden.
Sediment naar Grevelingenmeer is wel minder slibrijk, minder vertroebeling	Niet toetsbaar binnen dit onderzoek
Nadelen	Beantwoording of Uitwerking in modellering
Grotere kans op versterkte kusterosie door Schaar bij Goeree	Toetsing m.b.v. de transportmodellering Analyse initiële sedimentatie en erosie patronen, SedTRAILS.

Kans op erosie door neer in hoek van kust Goeree	Toetsing m.b.v de transportmodellering Analyse initiële sedimentatie en erosie patronen, SedTRAILS.
Verhindert migratie Middelpaat in noordelijke richting: strekdam en suppleties nodig	Ook de recente analyses laten deze noordelijke verplaatsing van de Middelpaat (strand Brouwersdam) zien. Het is waarschijnlijk dat aanvullende maatregelen benodigd zijn om het strand te behouden.
Gevaar badgasten voor gevaarlijke stroming	Toetsing gemodelleerde stromingen
Door ontgroning veel sediment naar Grevelingenmeer	Waarschijnlijk. De diepte van Springersdiep lijkt hier onvoldoende. Aan de hand van de sedimenttransport modellering verder te toetsen.
Aanzanding van de toegangseul tijdens stormen	Aanvullende simulatie met "meest ongunstige scenario" voor afschatten risico a.d.v. de residuele transporten.

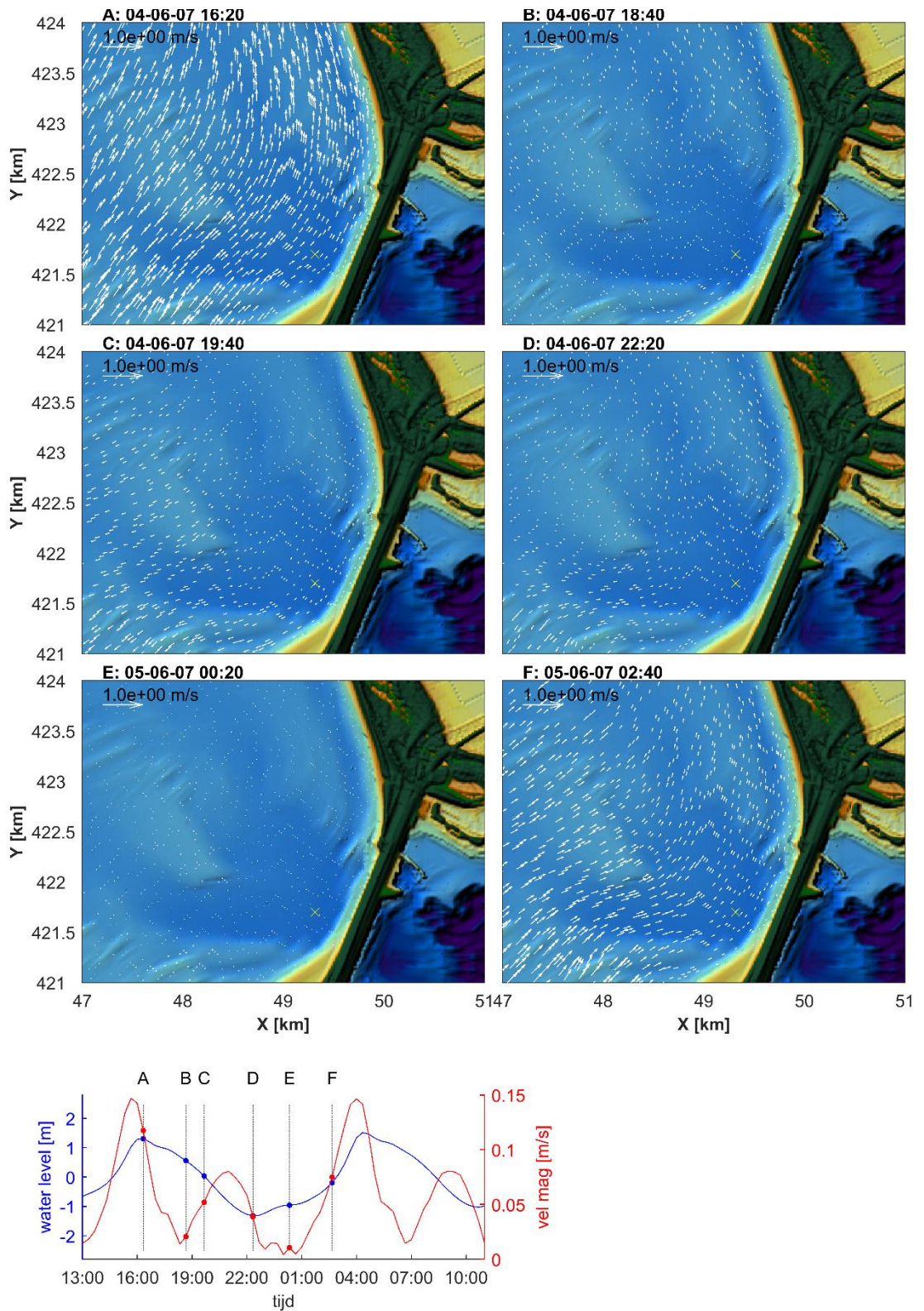
B.3 T0 simulatie



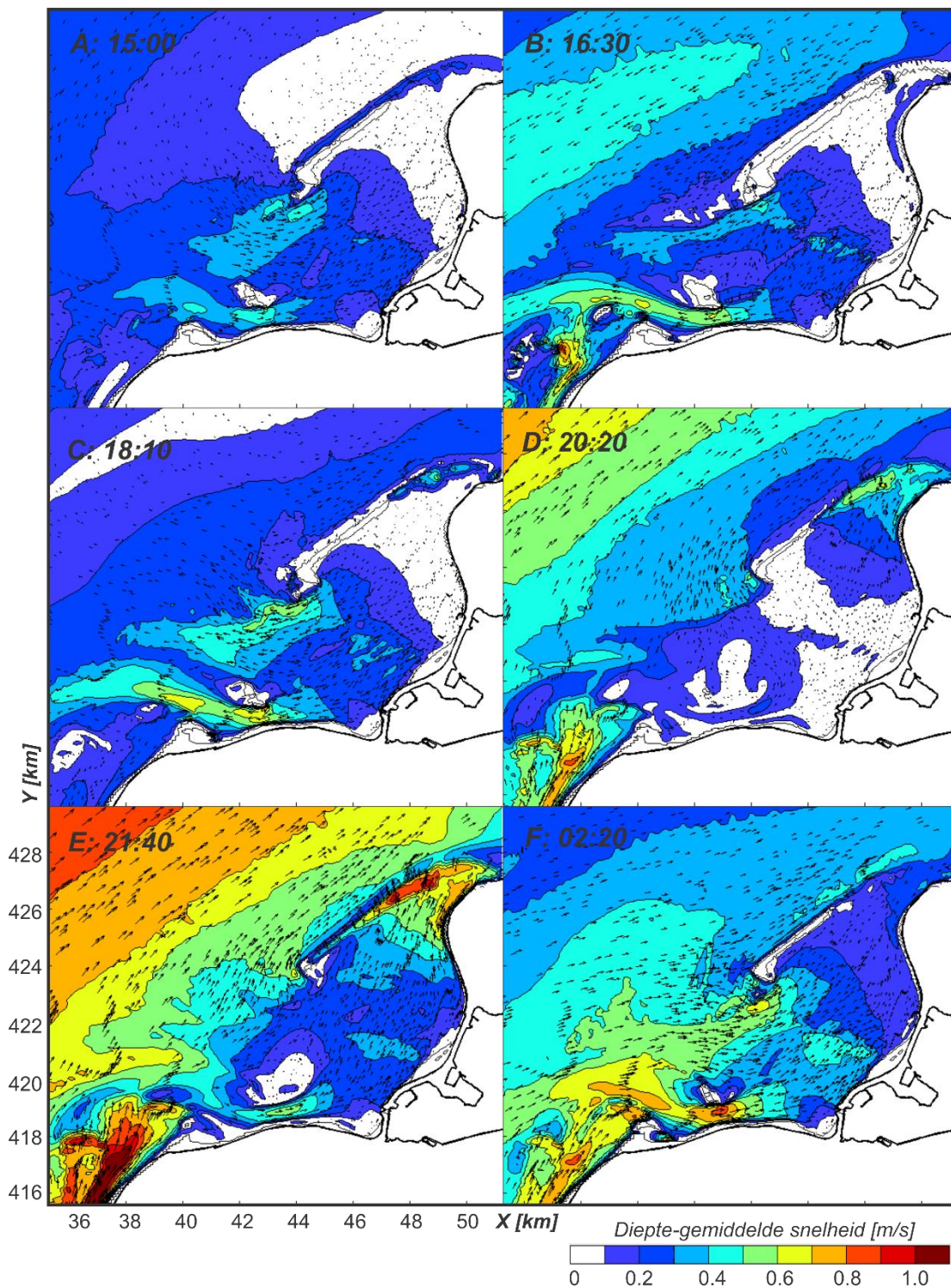
Figuur B- 15: Overzicht van het verloop van de stromingen in de monding van de Grevelingen voor 6 geselecteerde tijdstappen in het getij (zie onderste deelfiguur). De tijdserie geeft het verloop van de waterstand en snelheid in de Noordzee, net ten westen van Bollen van de Ooster (x-km: 41.8, y-km: 425.2).



Figuur B- 16: Overzicht van het verloop van de stromingen nabij de mogelijke locatie van doorlaatmiddel Zuid voor 6 geselecteerde tijdstappen in het getij (zie onderste deelfiguur). De tijdserie geeft het verloop van de waterstand en snelheid nabij de mogelijke locatie van doorlaatmiddel Zuid (x-km: 41,8, y-km: 425,2).

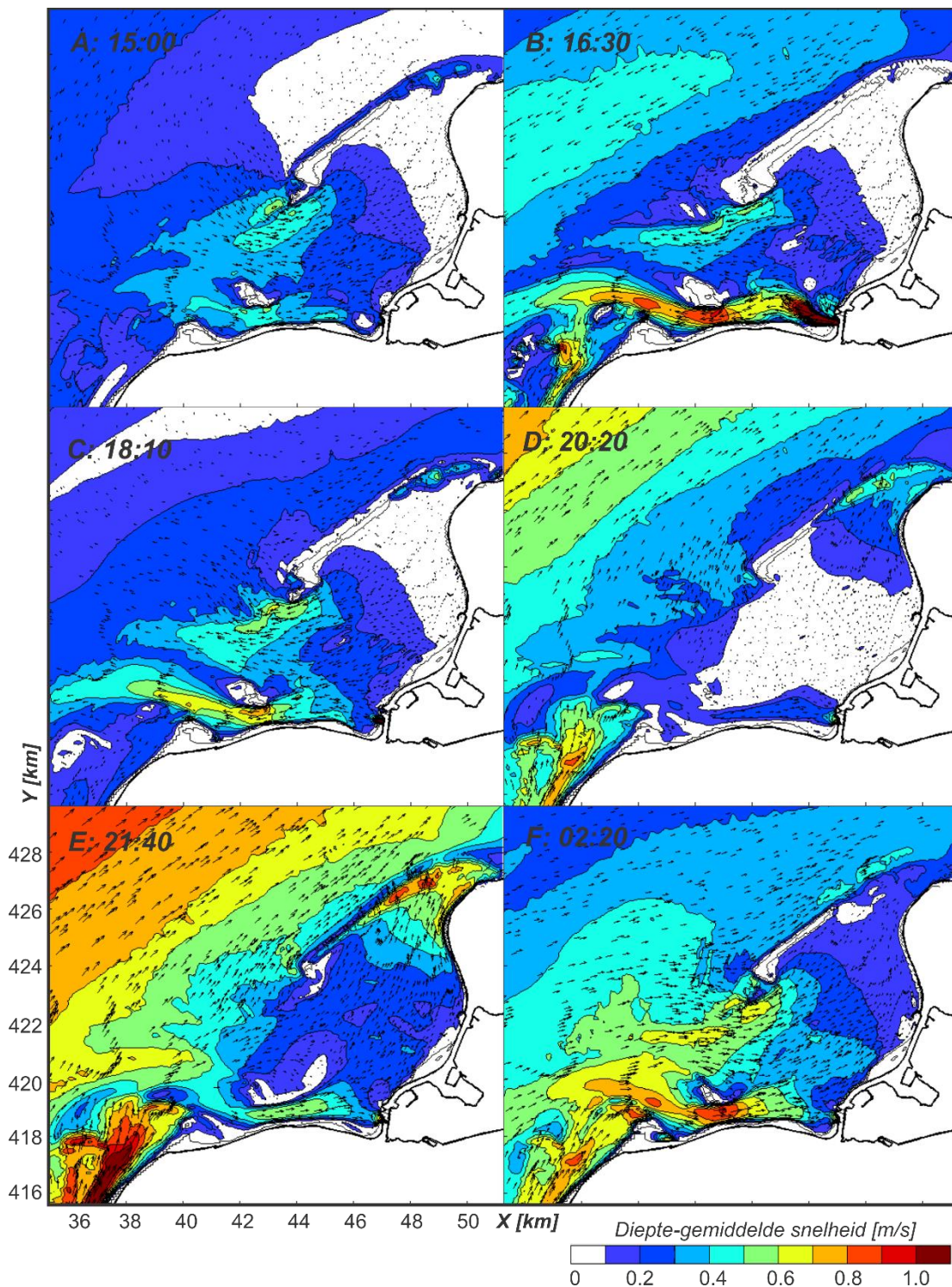


Figuur B- 17: Overzicht van het verloop van de stromingen nabij de mogelijke locatie van doorlaatmiddel Noord voor 6 geselecteerde tijdstappen in het getij (zie onderste deelfiguur). De tijdserie geeft het verloop van de waterstand en snelheid nabij de mogelijke locatie van doorlaatmiddel Noord (x-km: 49,3, y-km: 421,6).

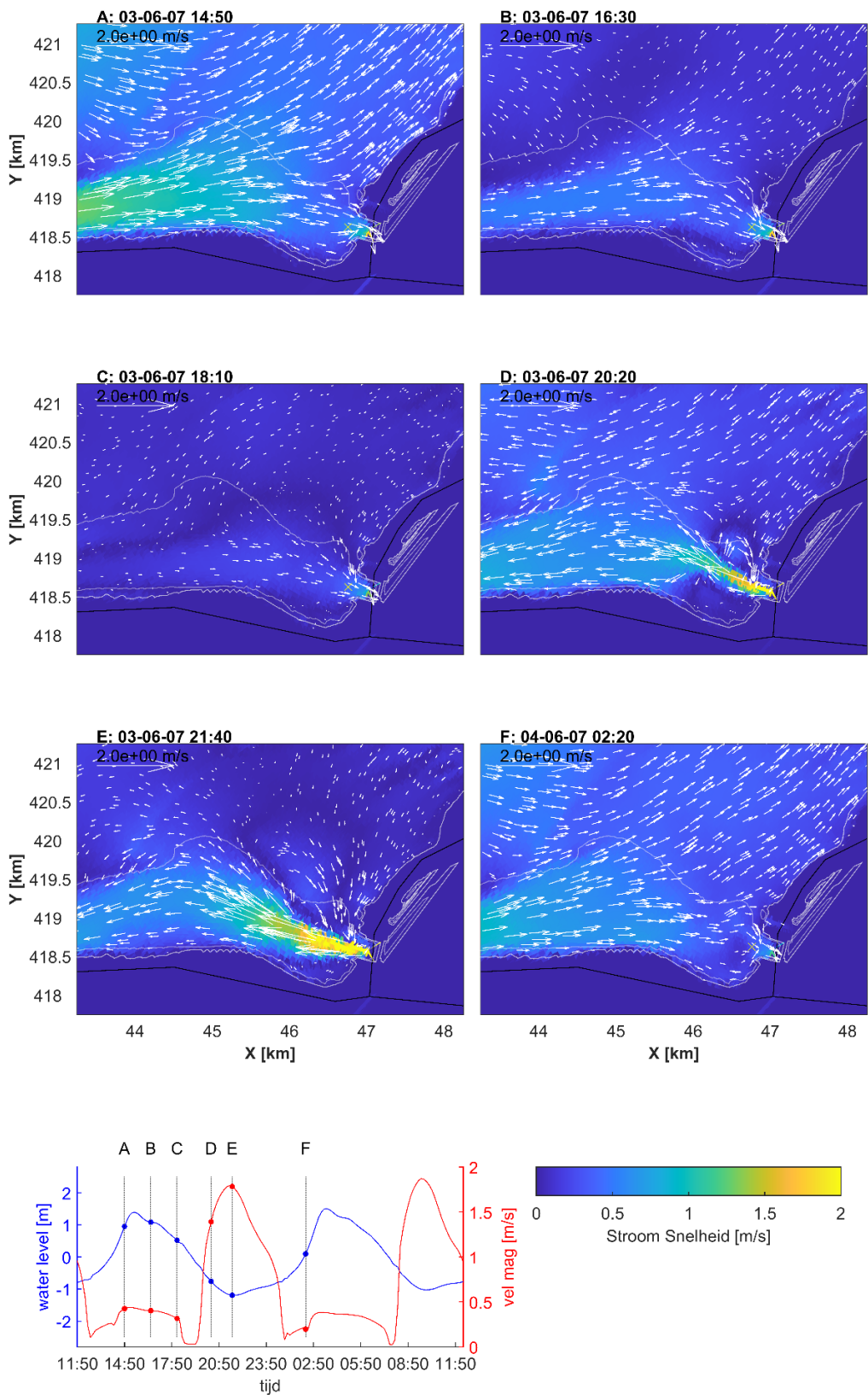


Figuur B- 18: Overzicht van het verloop van de stromingen in de monding van de Grevelingen voor 6 geselecteerde tijdstappen in het getij overeenkomstig met de tijdstippen getoond voor de twee doorlaatmiddelen.

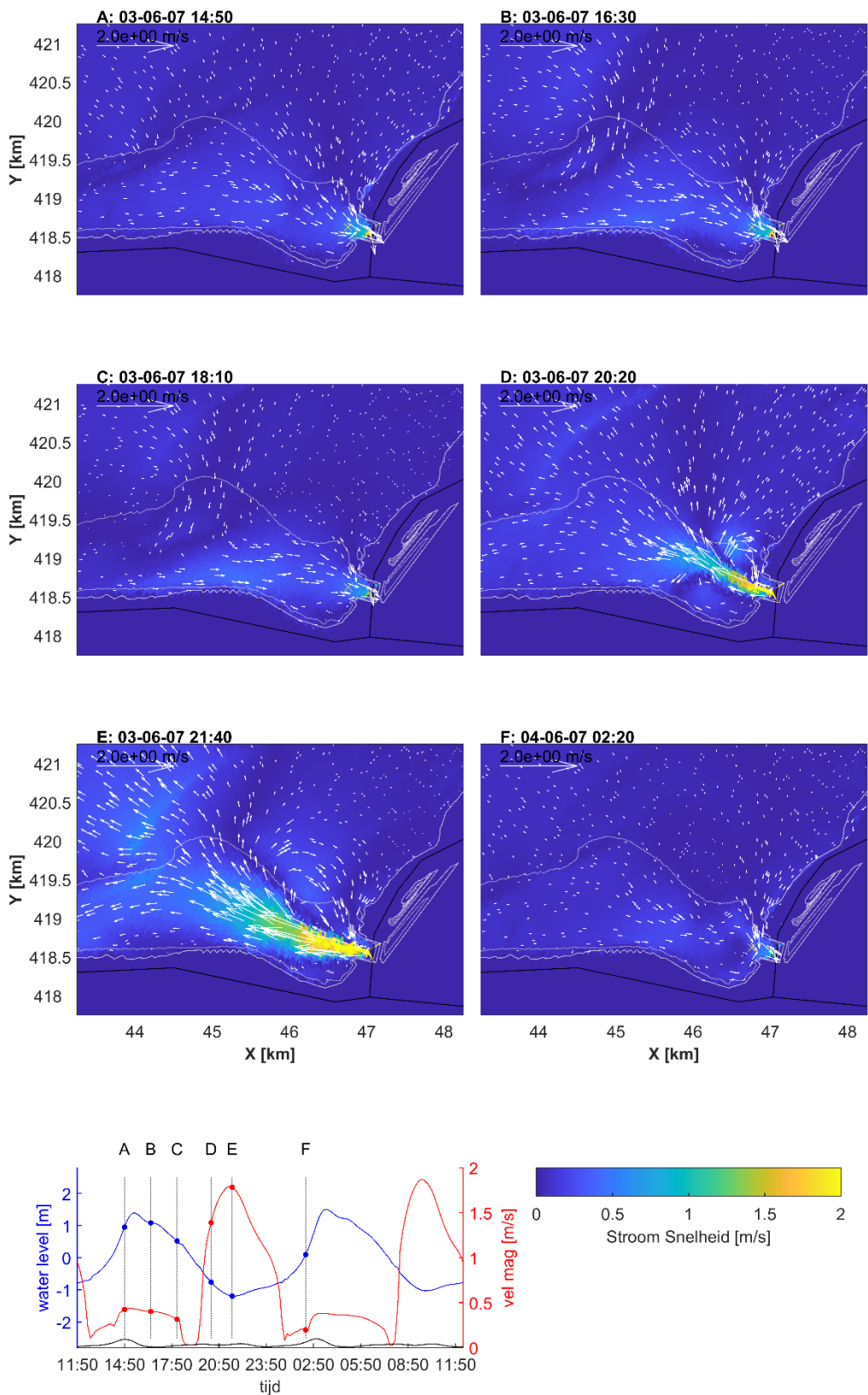
B.4 Doorlaatmiddel zuid



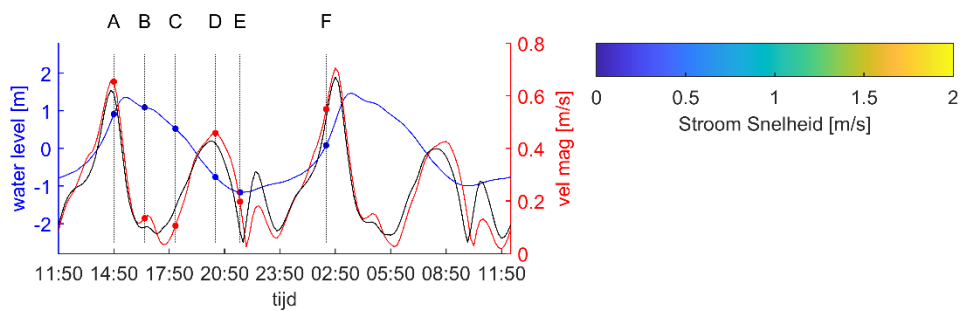
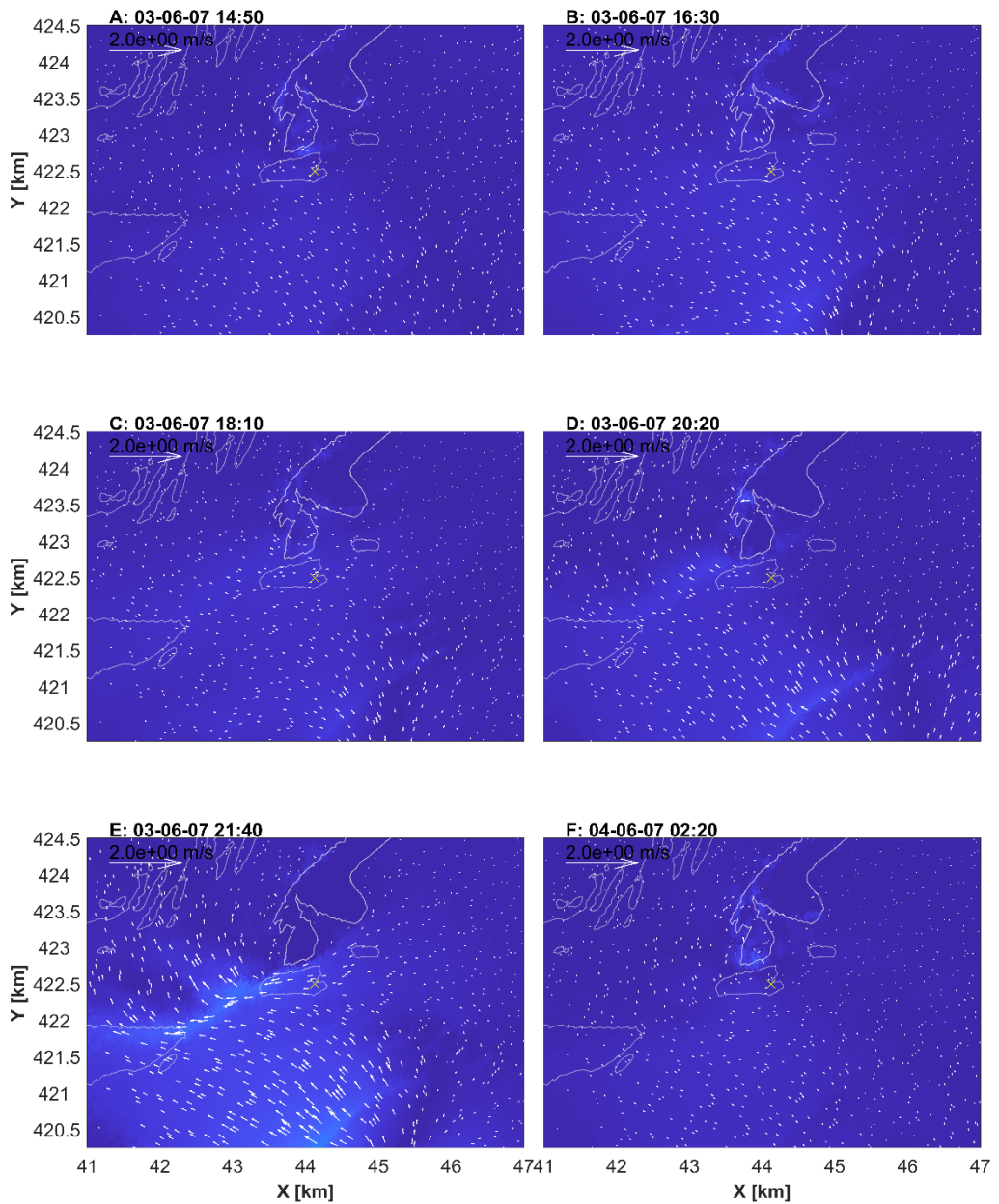
Figuur B- 19 Overzicht van het verloop van de stromingen in de monding van de Grevelingen voor 6 geselecteerde tijdstappen in het getij na aanleg van doorlaatmiddel Zuid.



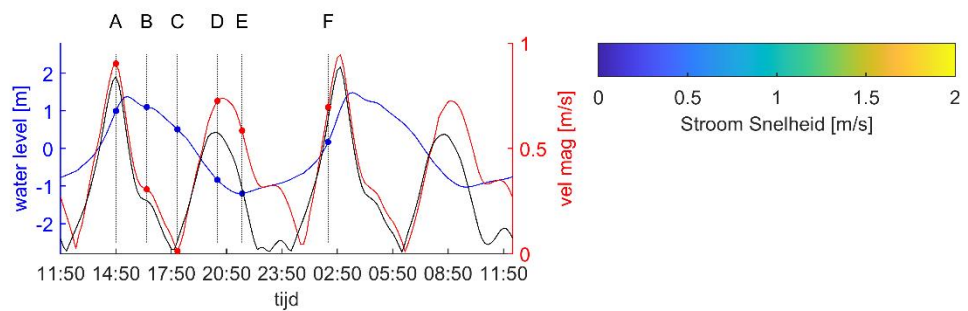
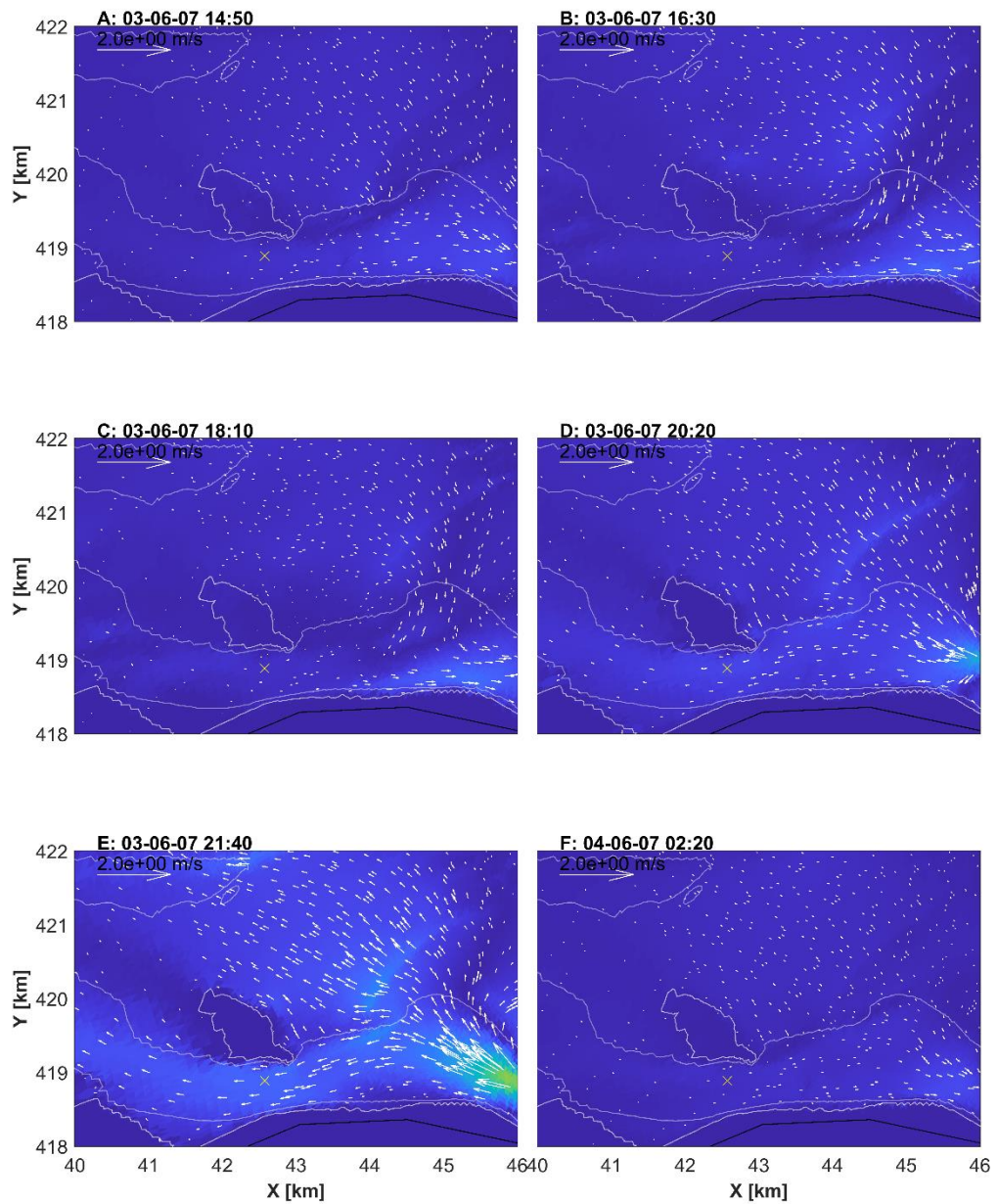
Figuur B- 20 Overzicht van de instantane stroomsnelheden bij de doorlaatmiddel Zuid voor 6 geselecteerde tijdstappen.



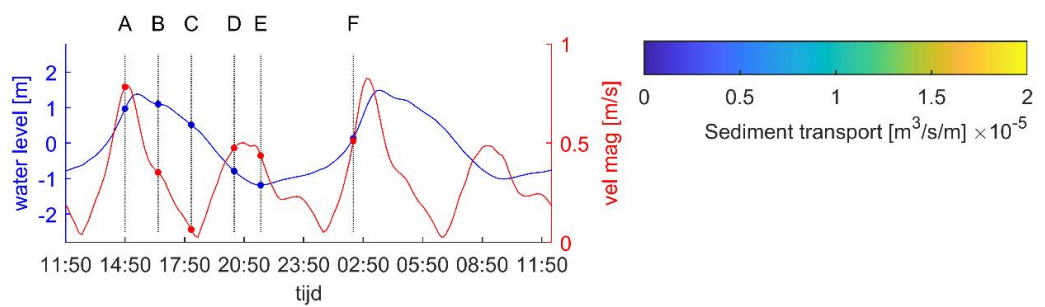
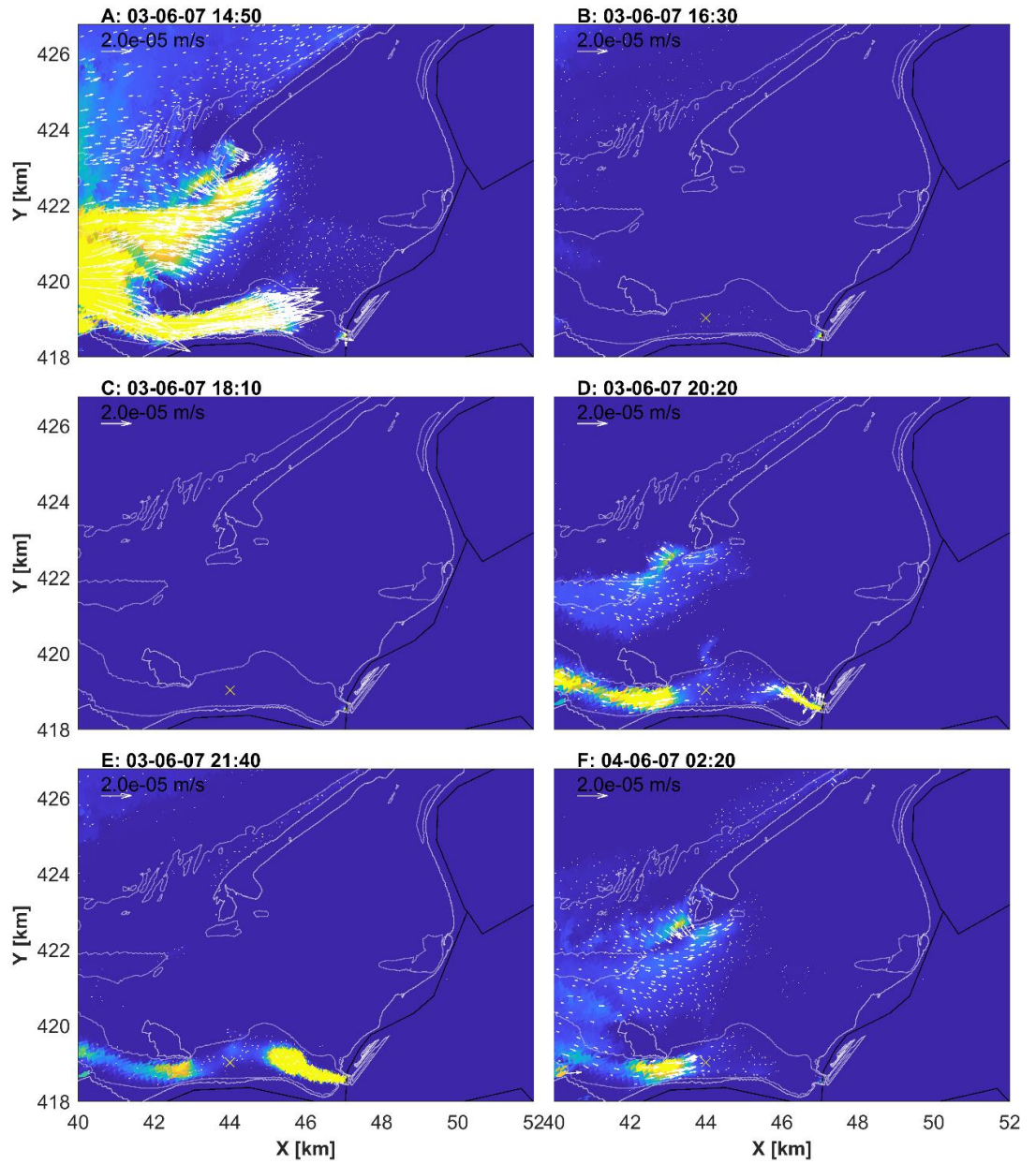
Figuur B- 21 Overzicht van het verschil in instantane stroomsnelheden bij doorlaatmiddel Zuid (Z1-T0) voor 6 geselecteerde tijdstappen.



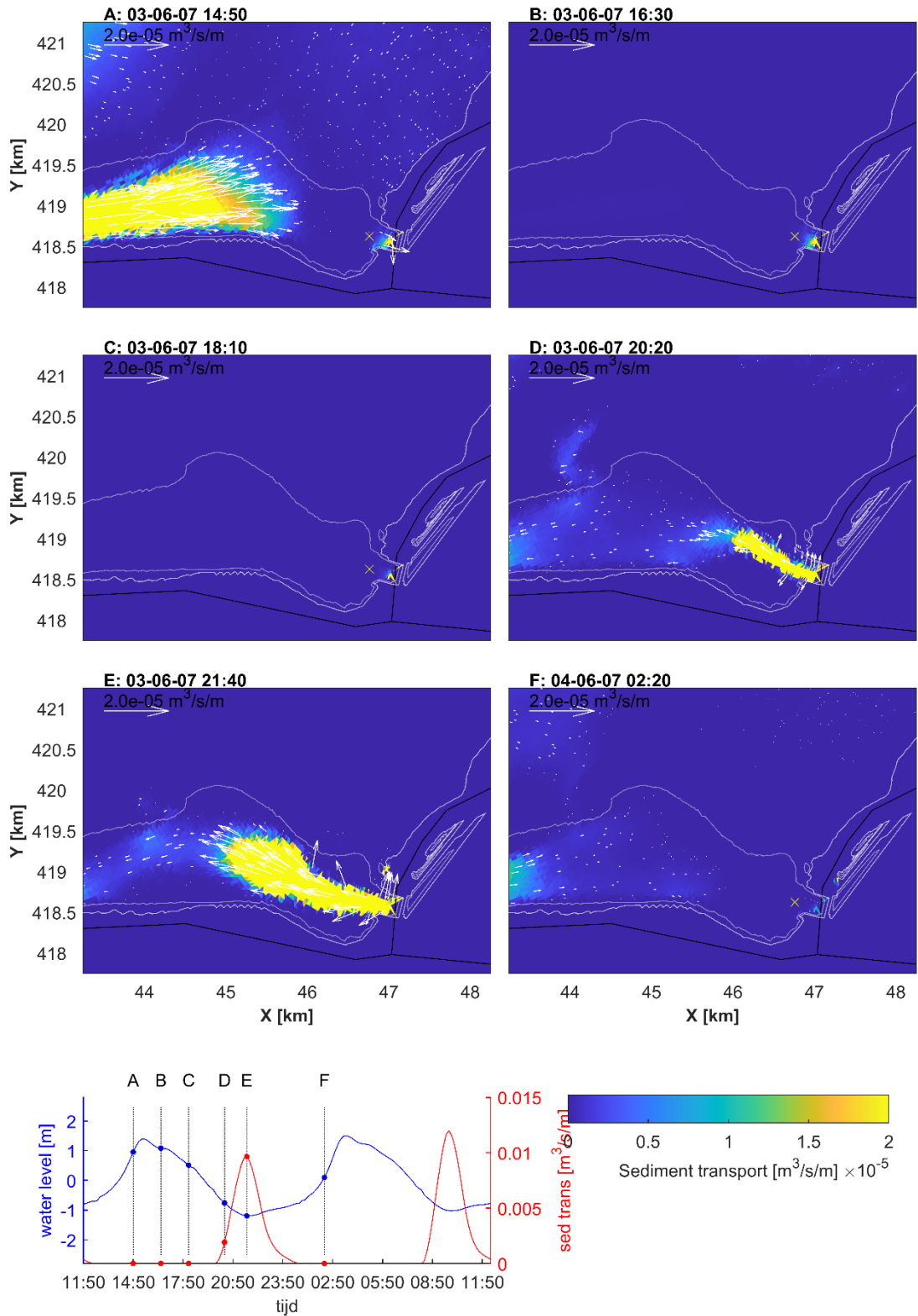
Figuur B- 22: Overzicht van het verschil in instantane stroomsnelheden (Z1-T0) rond de zuidpunt van de Bollen van de Ooster ten gevolge van doorlaatmiddel Zuid voor 6 geselecteerde tijdstappen.



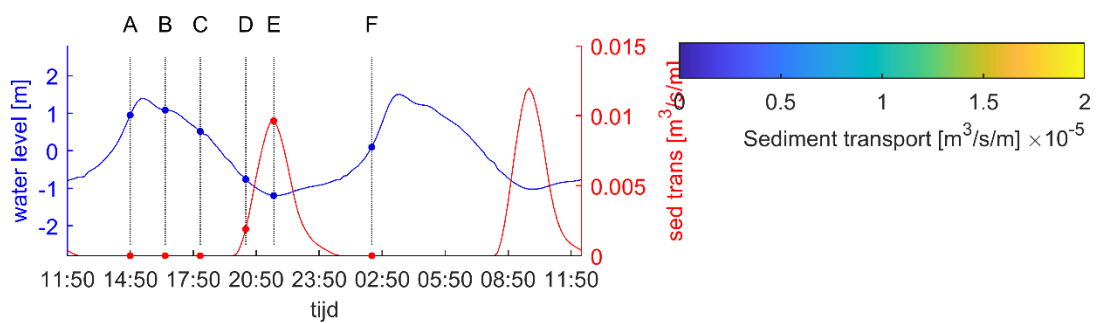
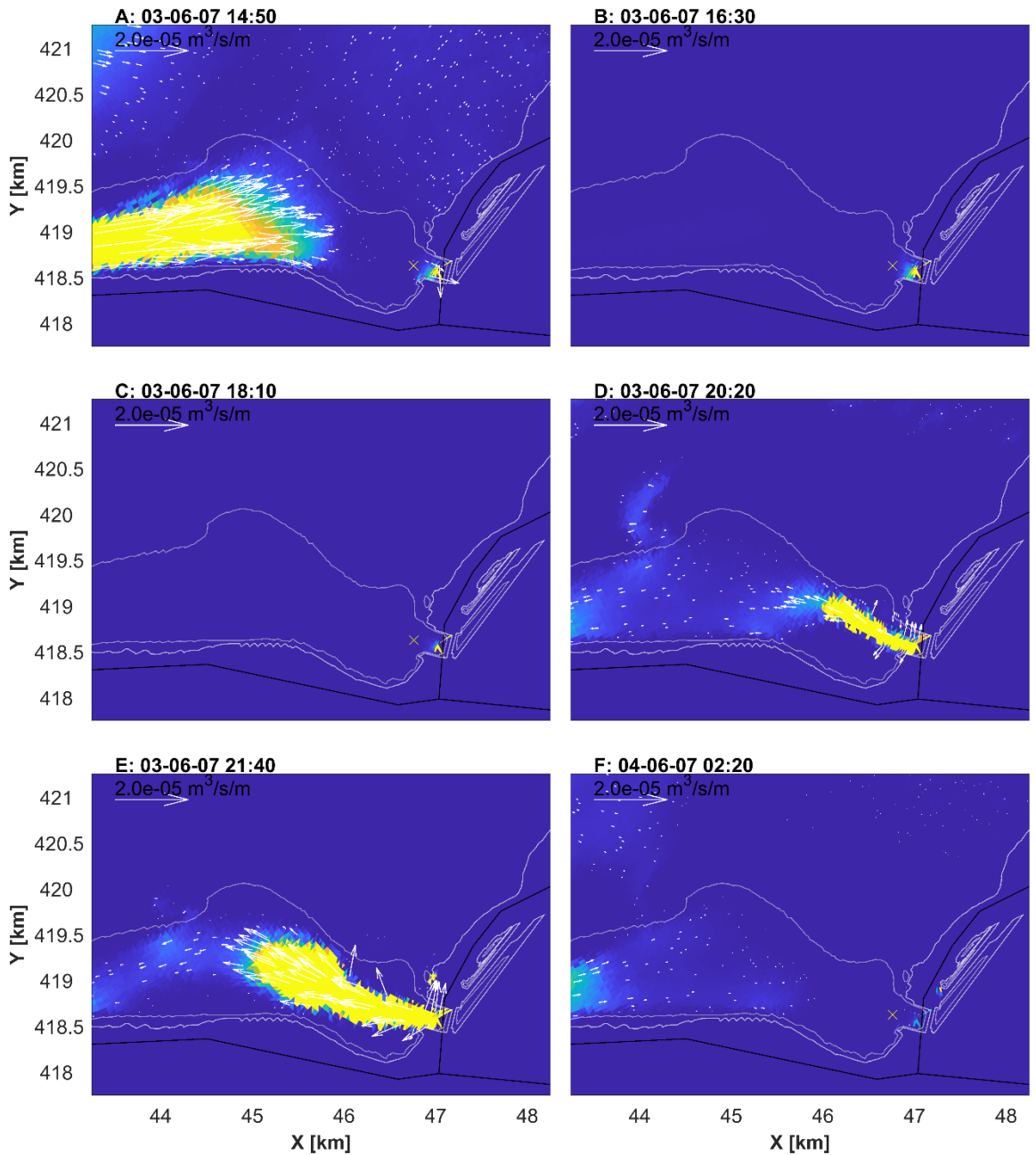
Figuur B- 23: Overzicht van het verschil in instantane stroomsnelheden (Z1-T0) in het Brouwershavensche Gat nabij Renesse ten gevolge van de doorlaatmiddel Zuid voor 6 geselecteerde tijdstappen.



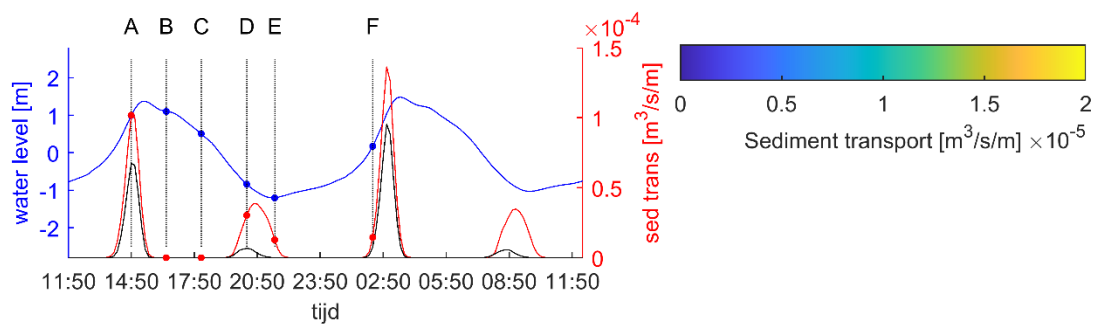
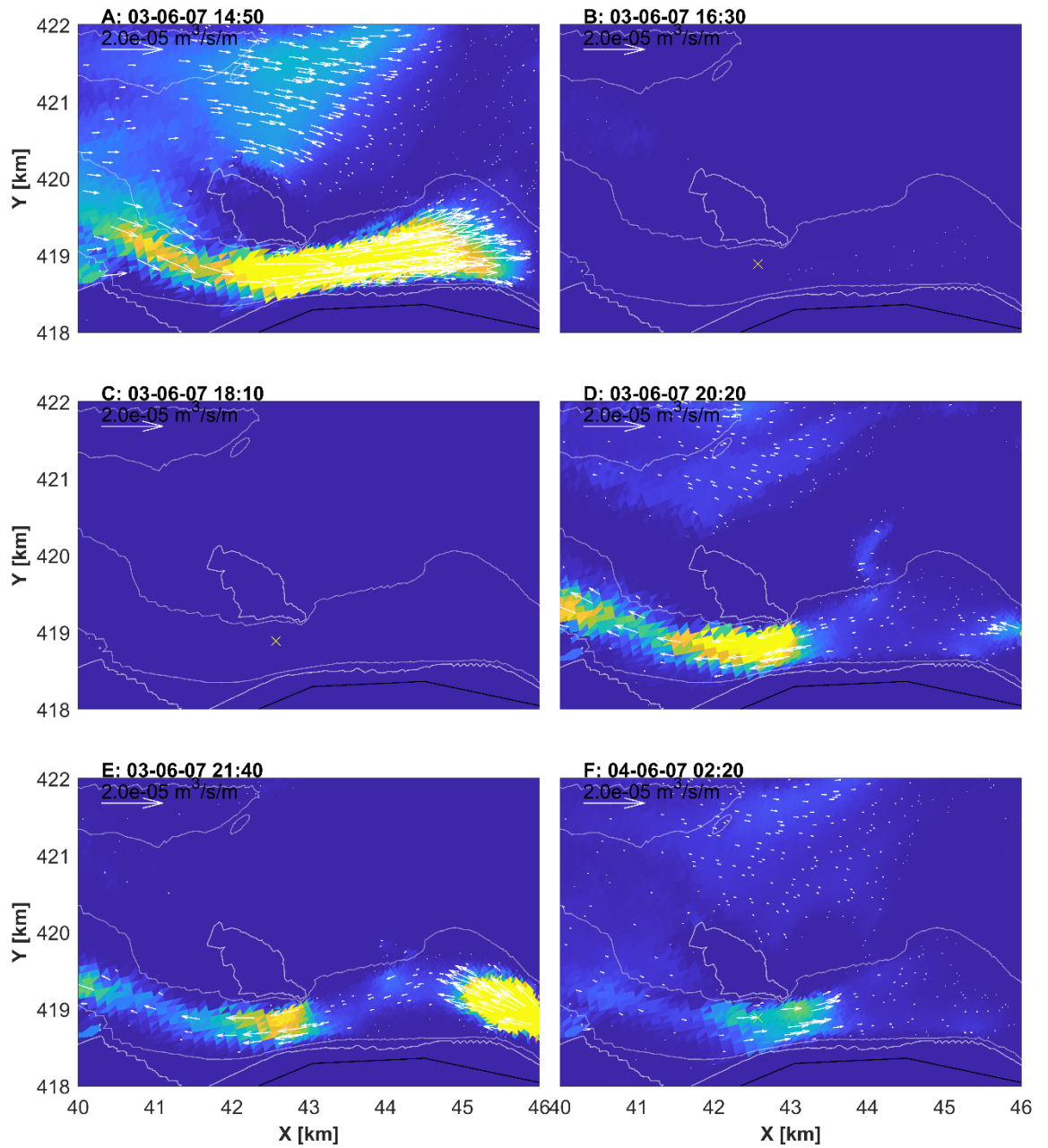
Figuur B- 24: Overzicht van de instantane transporten op 6 geselecteerde tijdstappen voor de Z1 bodem.



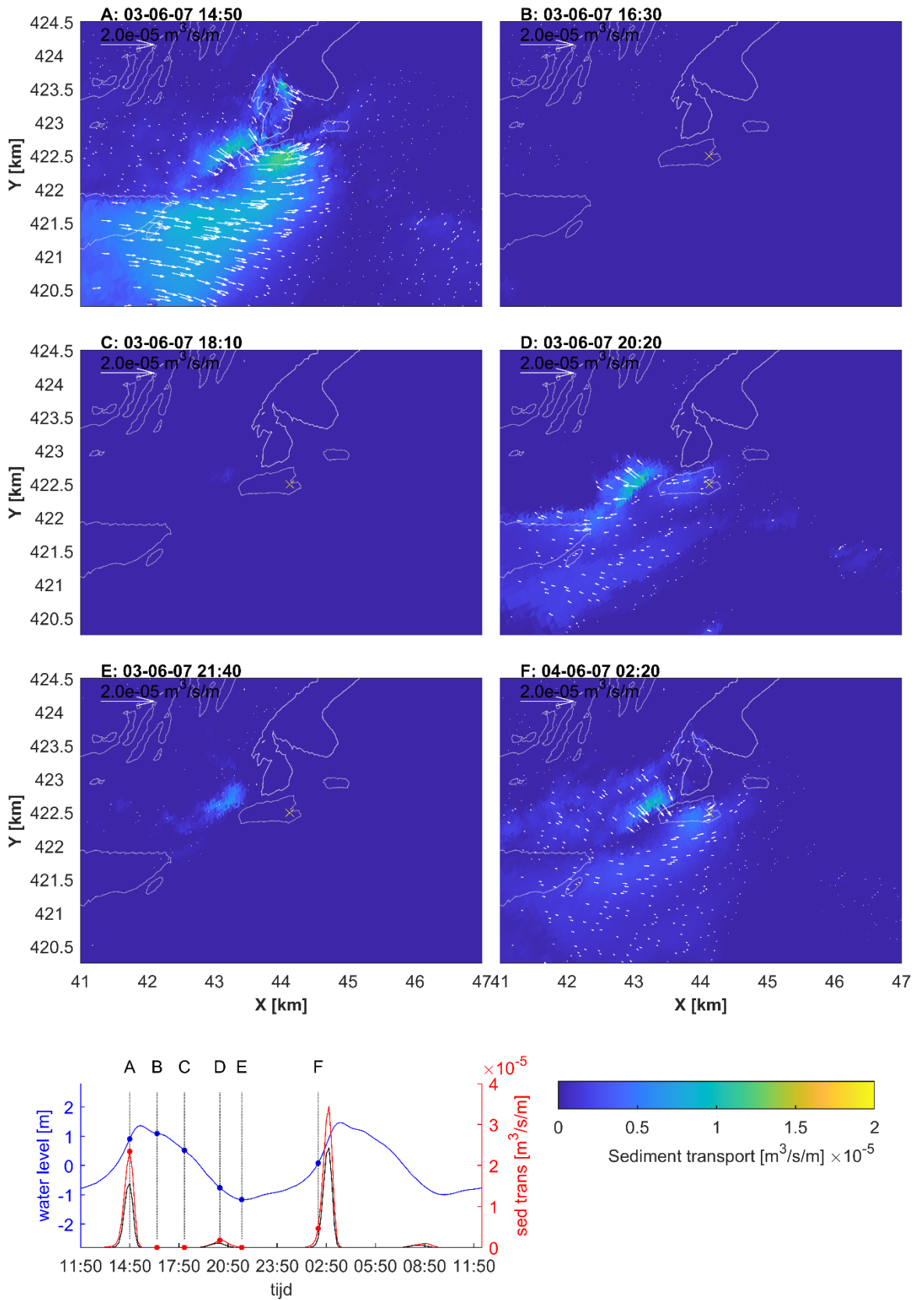
Figuur B- 25: Overzicht van de instantane transporten (Z1) op 6 geselecteerde tijdstappen nabij doorlaatmiddel Zuid.



Figuur B- 26 Overzicht van het verschil in instantane transporten (Z1-T1) op 6 geselecteerde tijdstappen tussen nabij doorlaatmiddel Zuid.

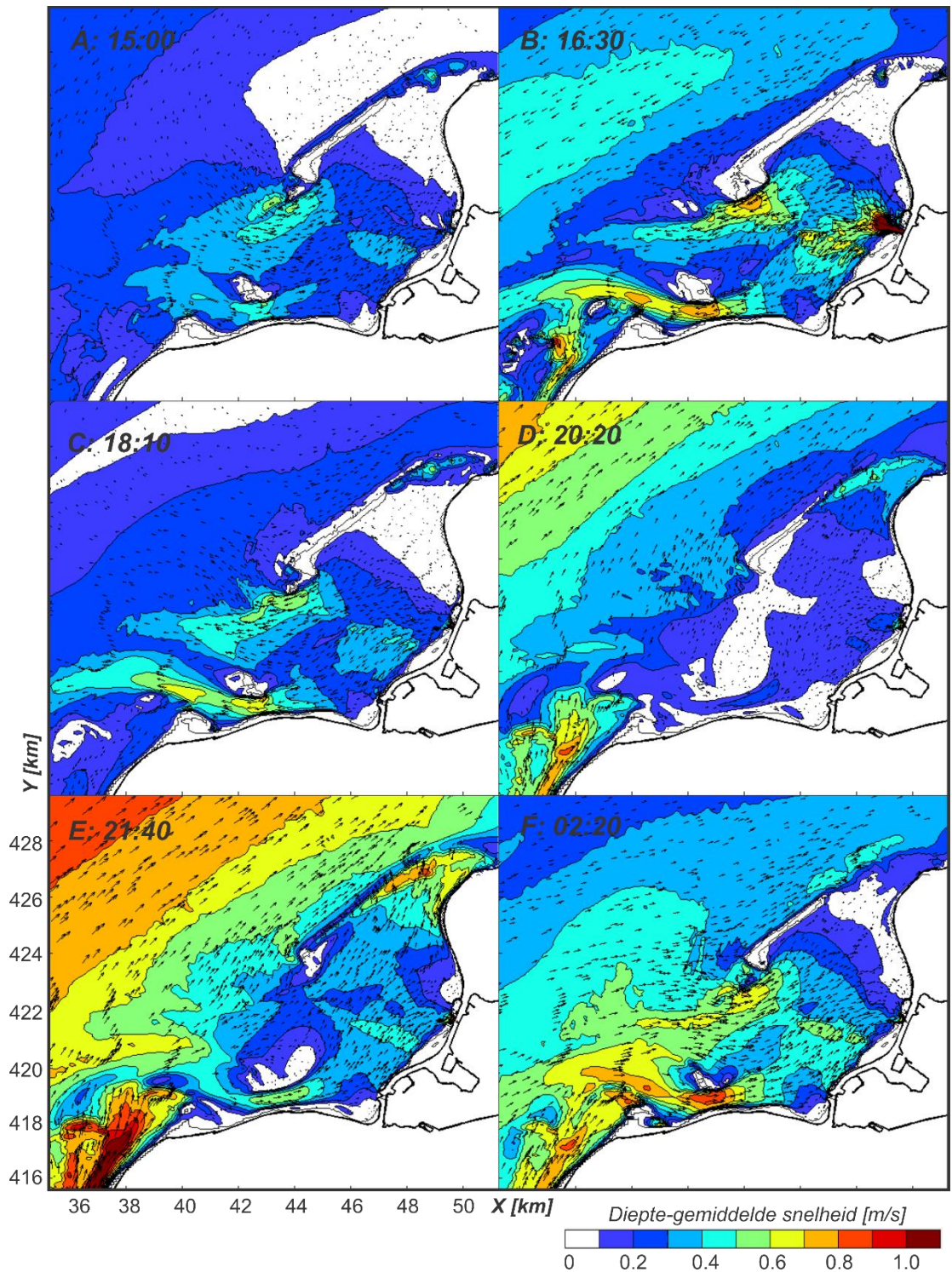


Figuur B- 27: Overzicht van het verschil in instantane transporten (Z1-T0) op 6 geselecteerde tijdstappen tussen; zoomgebied Renesse (Brouwershavensche Gat) .

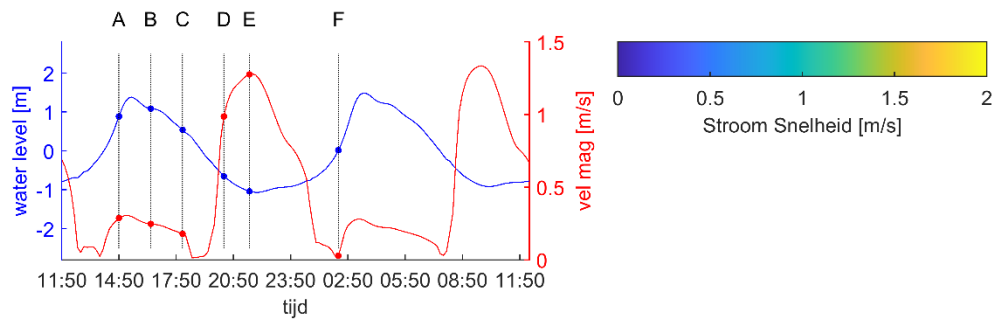
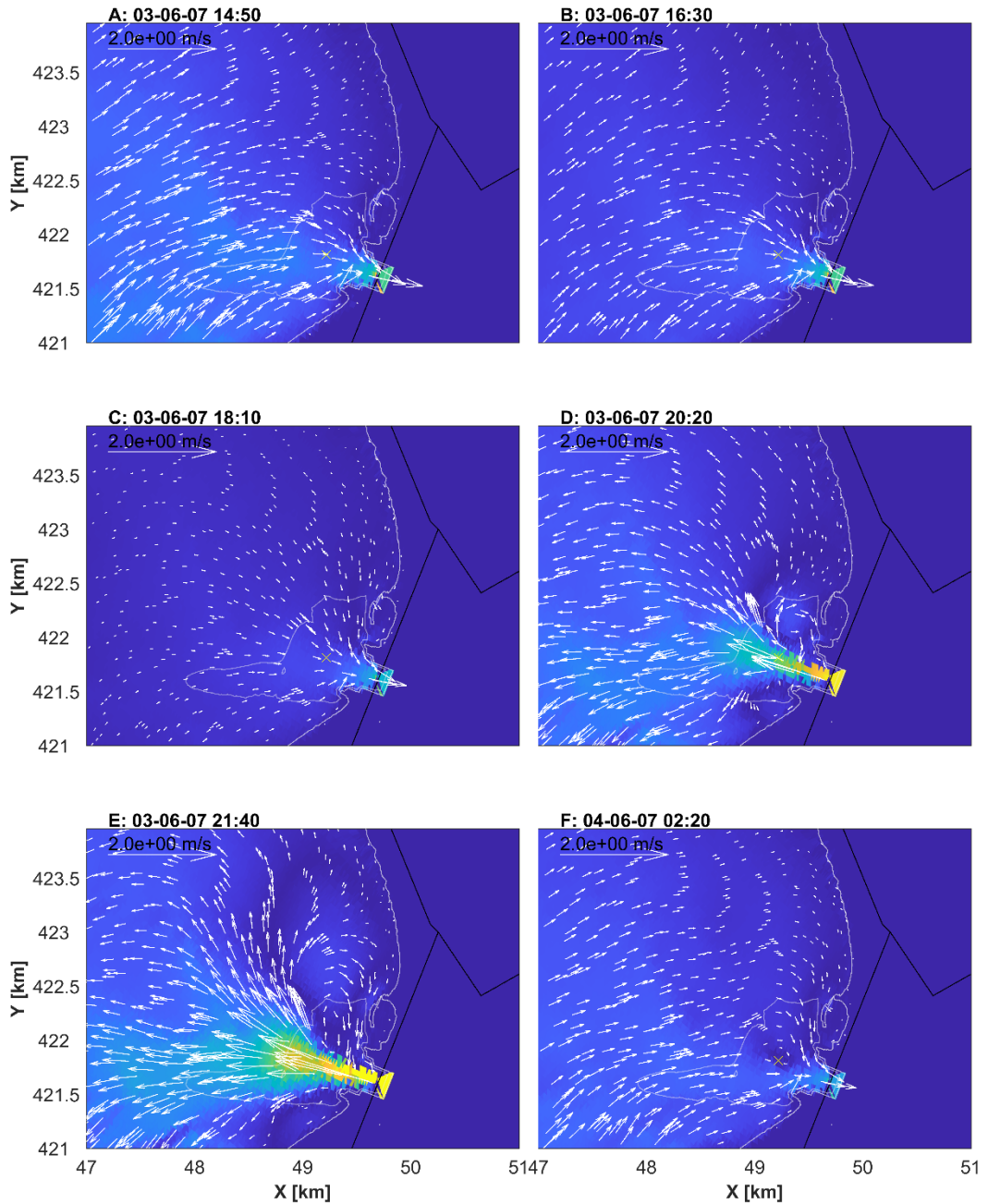


Figuur B- 28: Overzicht van het verschil in instantane transporten (Z1-T0) op 6 geselecteerde tijdstappen tussen; zoomgebied Bollen van de Ooster (zuidwestpunt).

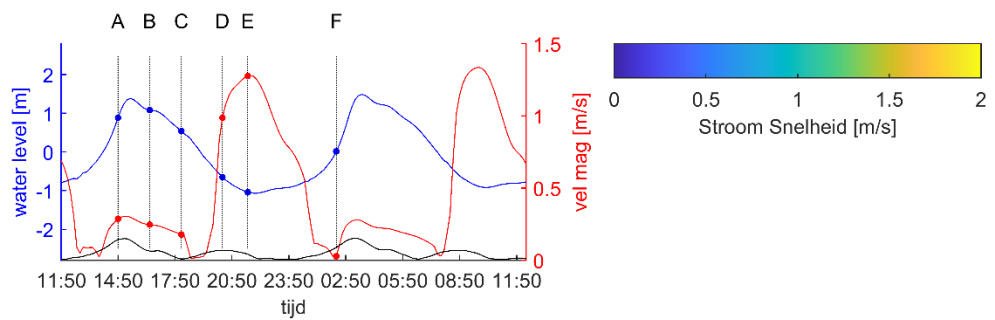
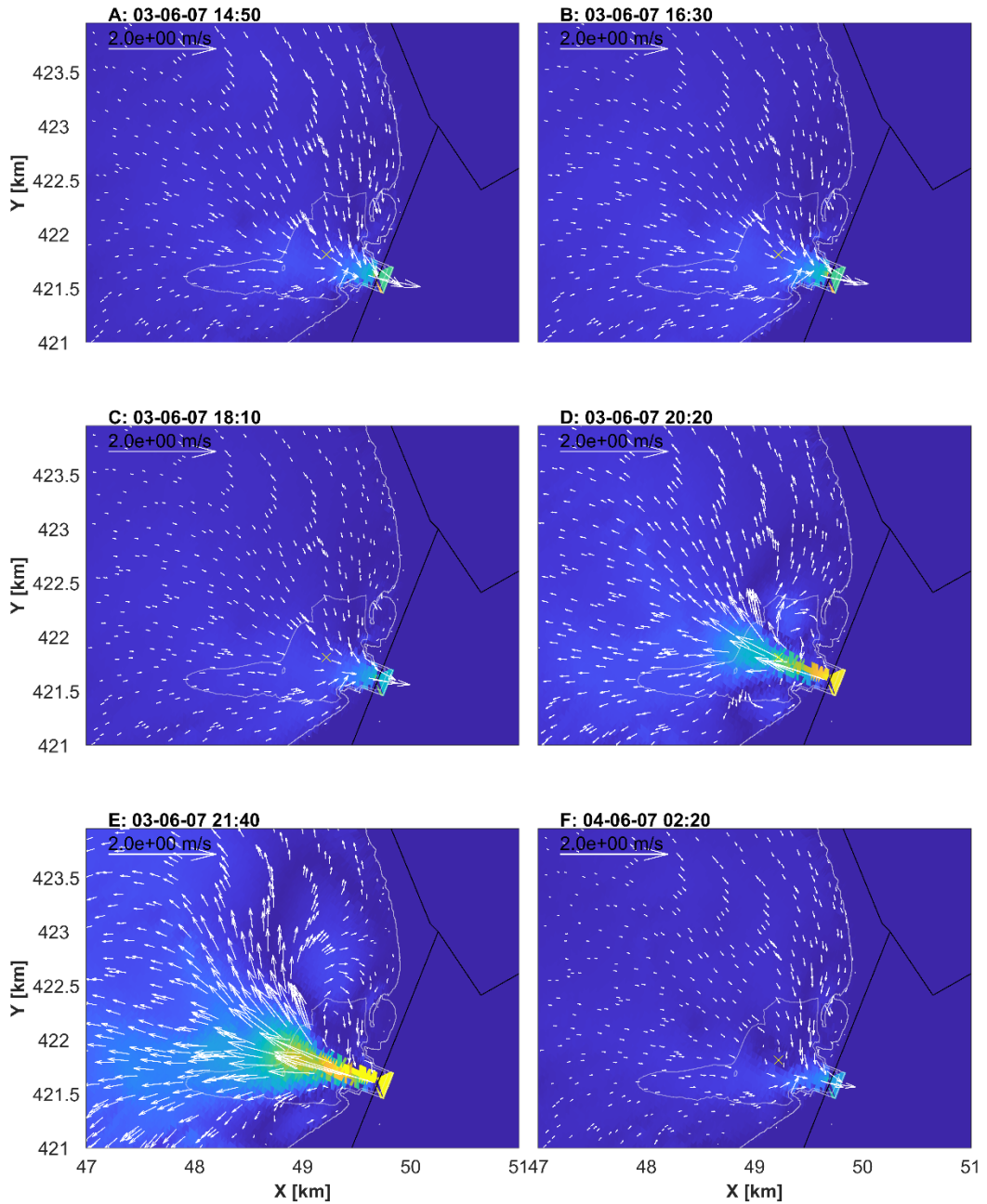
B.5 Doorlaatmiddel Noord



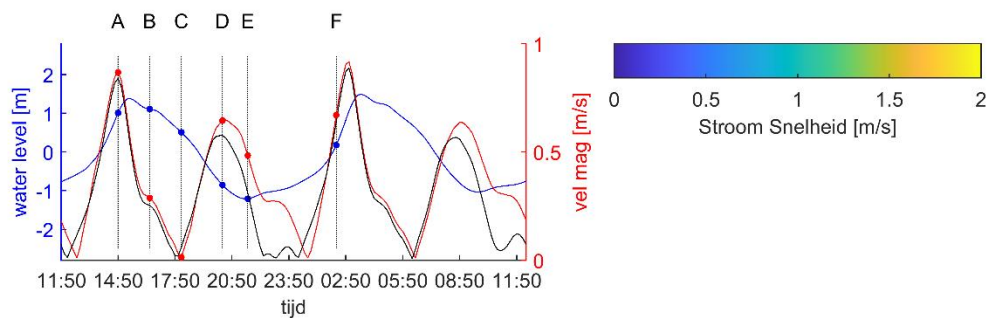
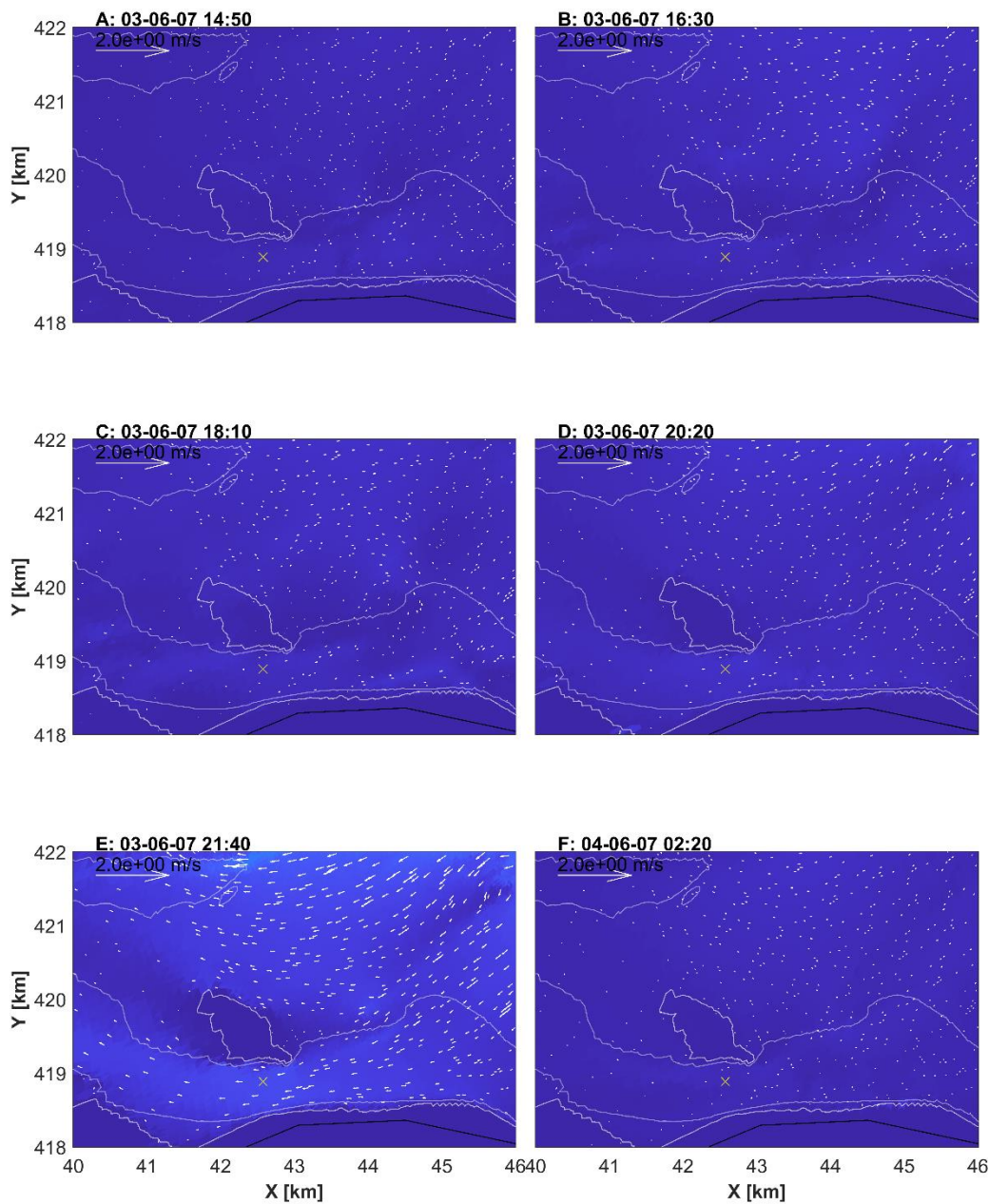
Figuur B- 29: Overzicht van de instantane stroomsnelheden in de monding na aanleg van doorlaatmiddel Noord voor 6 geselecteerde tijdstappen.



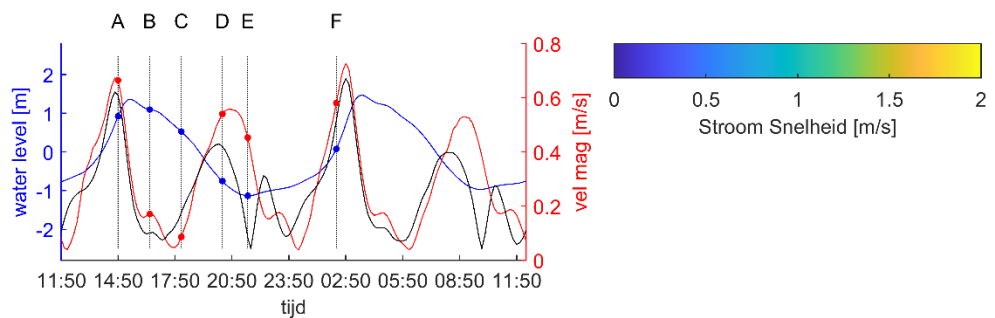
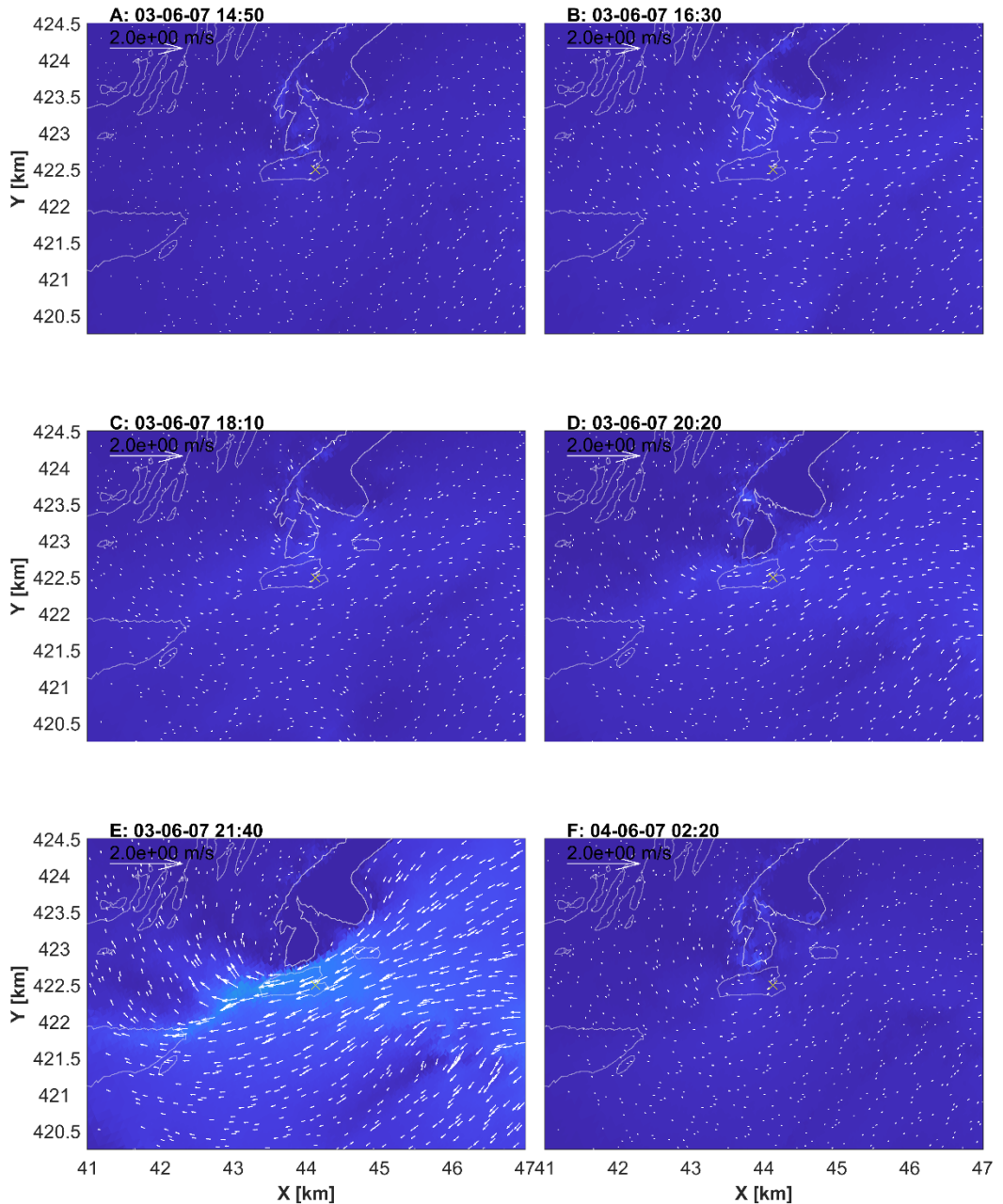
Figuur B- 30: Overzicht van de instantane stroomsnelheden nabij doorlaatmiddel Noord voor 6 geselecteerde tijdstappen.



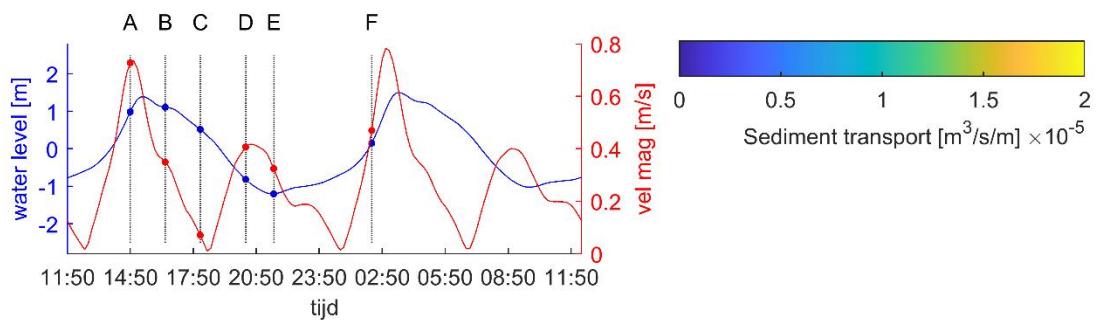
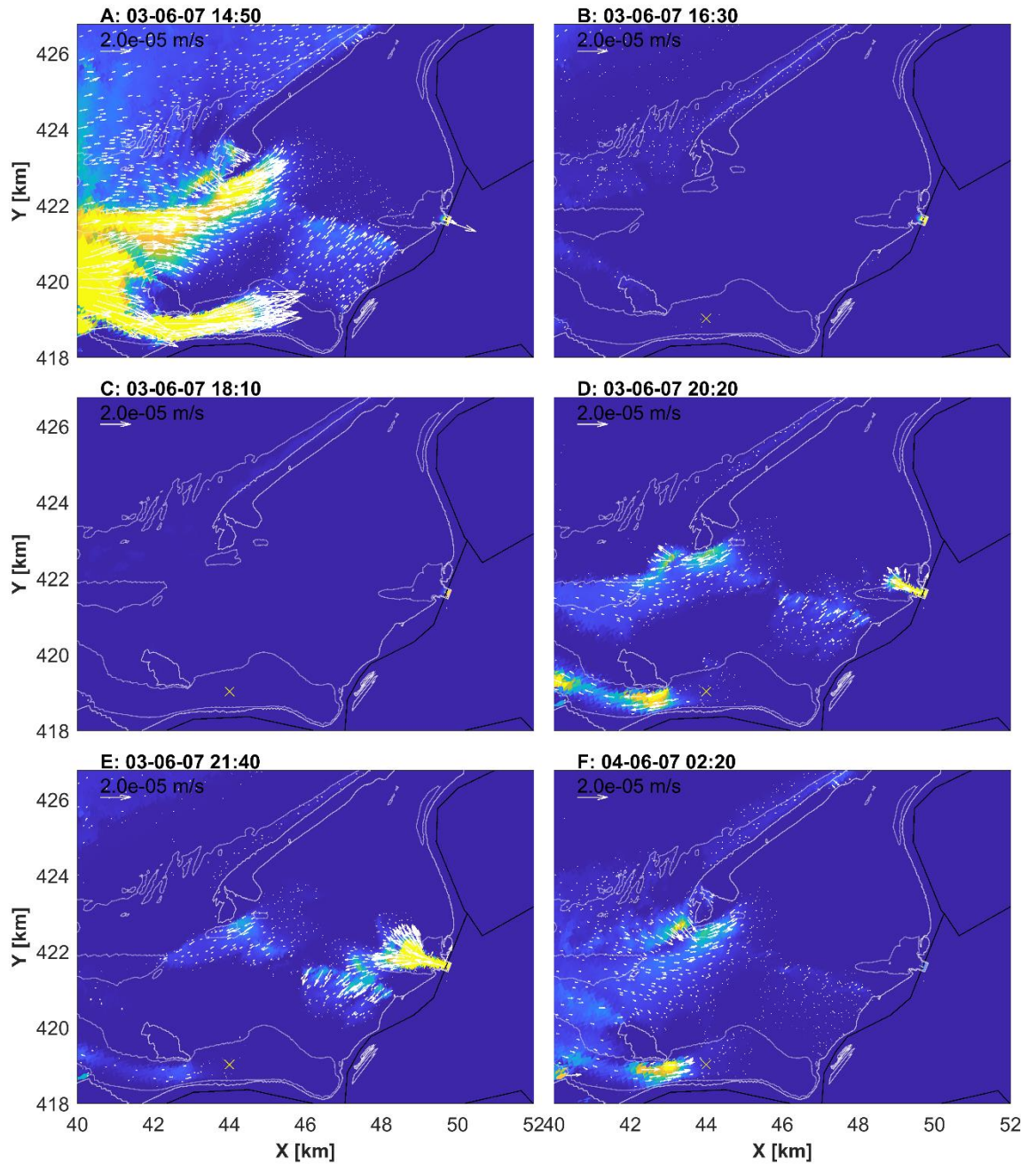
Figuur B- 31: Overzicht van het verschil in instantane stroomsnelheden nabij doorlaatmiddel Noord (N1-T0) voor 6 geselecteerde tijdstappen.



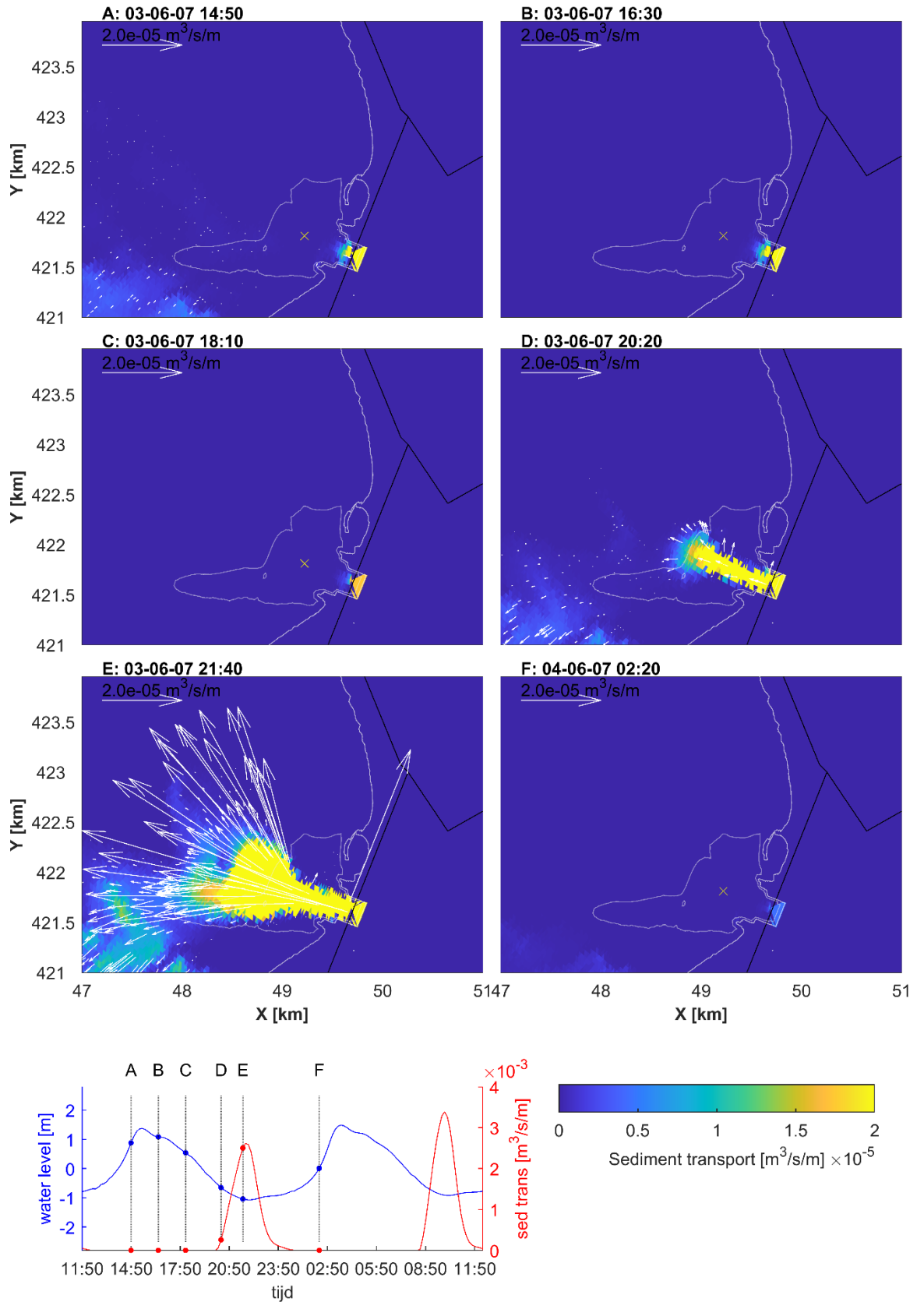
Figur B- 32: Overzicht van de instantane stroomsnelheden in het Brouwershavensche Gat (N1-T0) voor 6 geselecteerde tijdstappen.



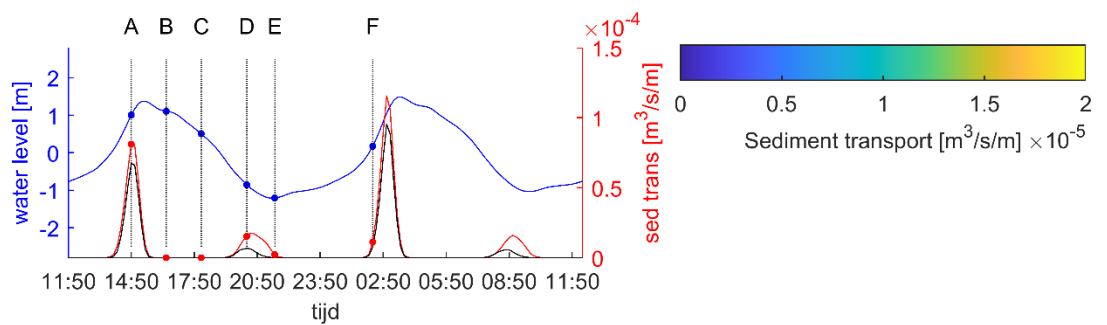
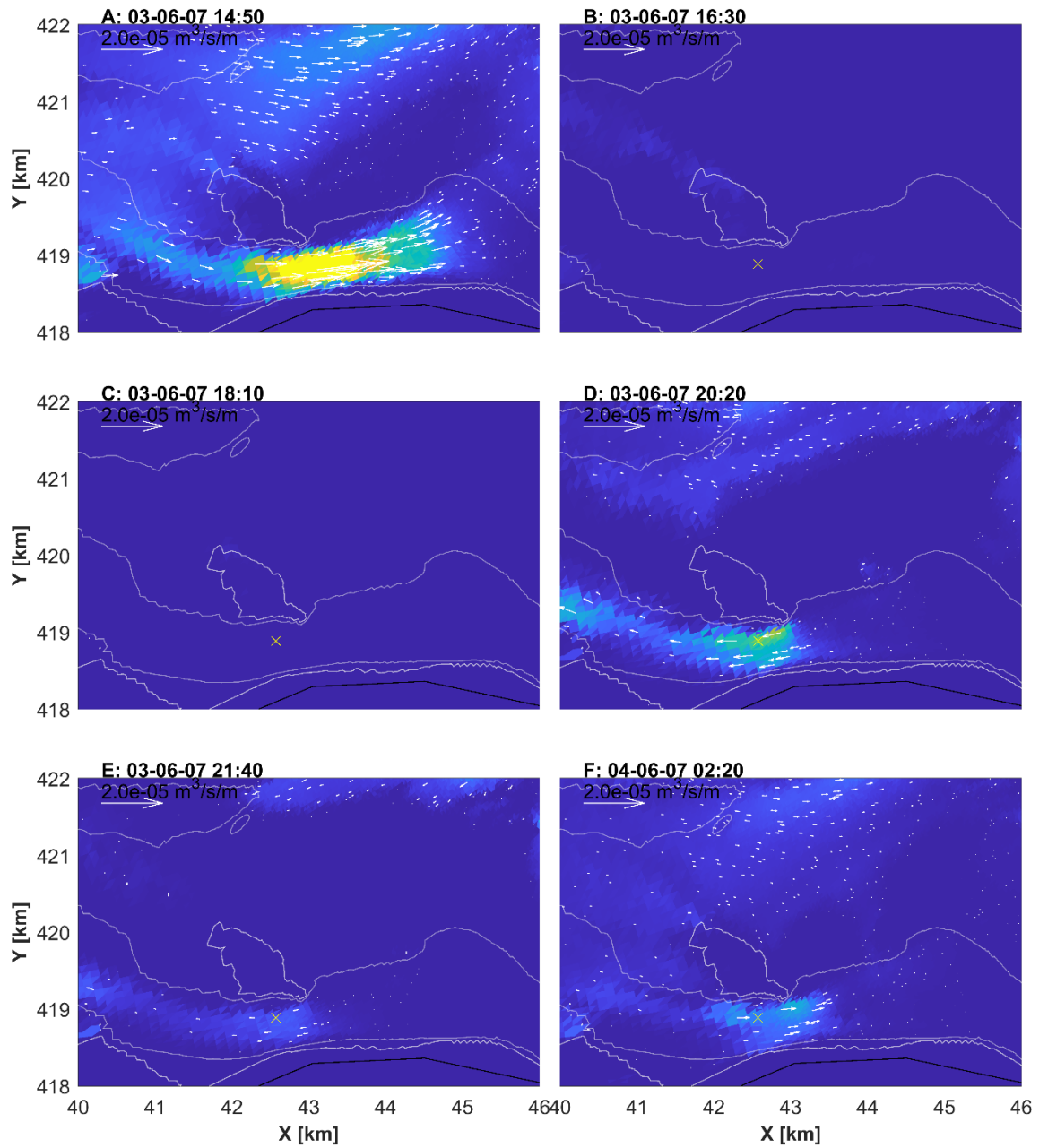
Figuur B- 33: Overzicht van de instantane stroomsnelheden nabij de Bollen van de Ooster (N1-T0) voor 6 geselecteerde tijdstappen.



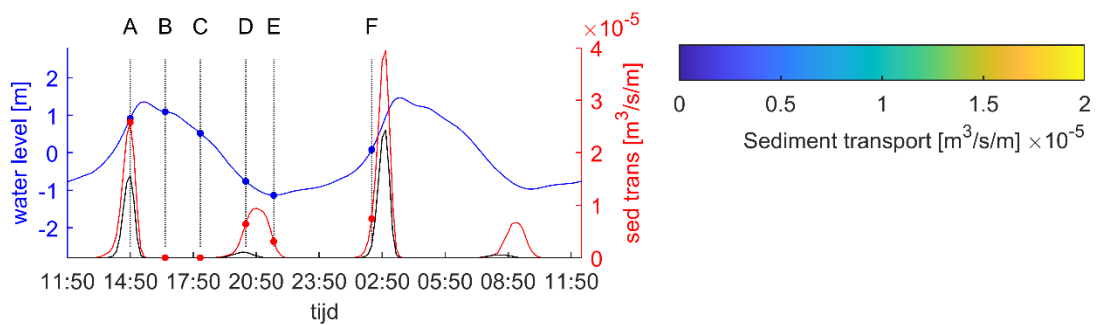
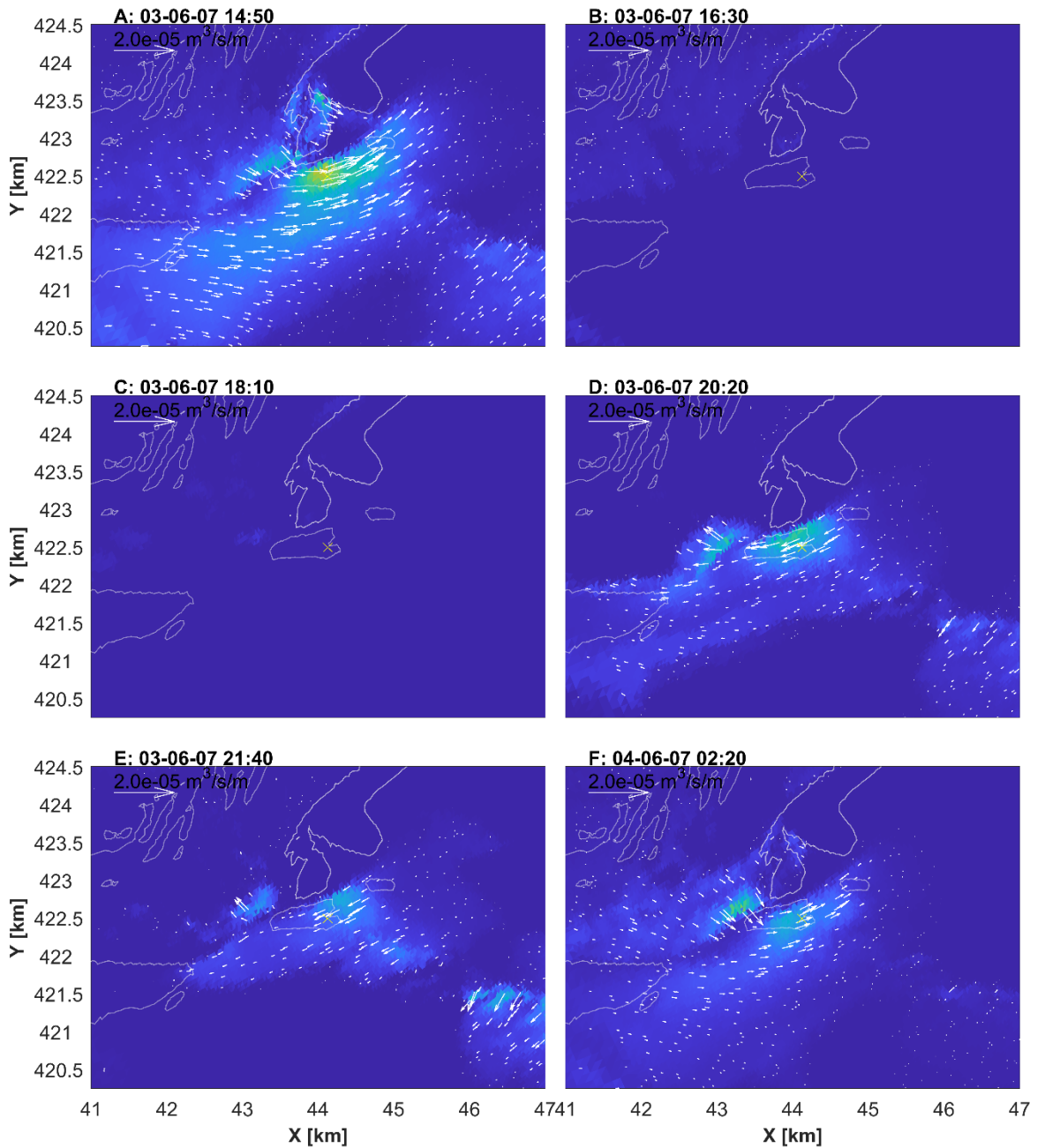
Figuur B- 34: Overzicht van de instantane transporten op 6 geselecteerde tijdstappen voor doorlaatmiddel Noord (N1).



Figuur B- 35: Overzicht van het verschil in instantane transporten op 6 geselecteerde tijdstappen tussen de T0 en N1 simulatie; zoomgebied doorlaatmiddel Noord .

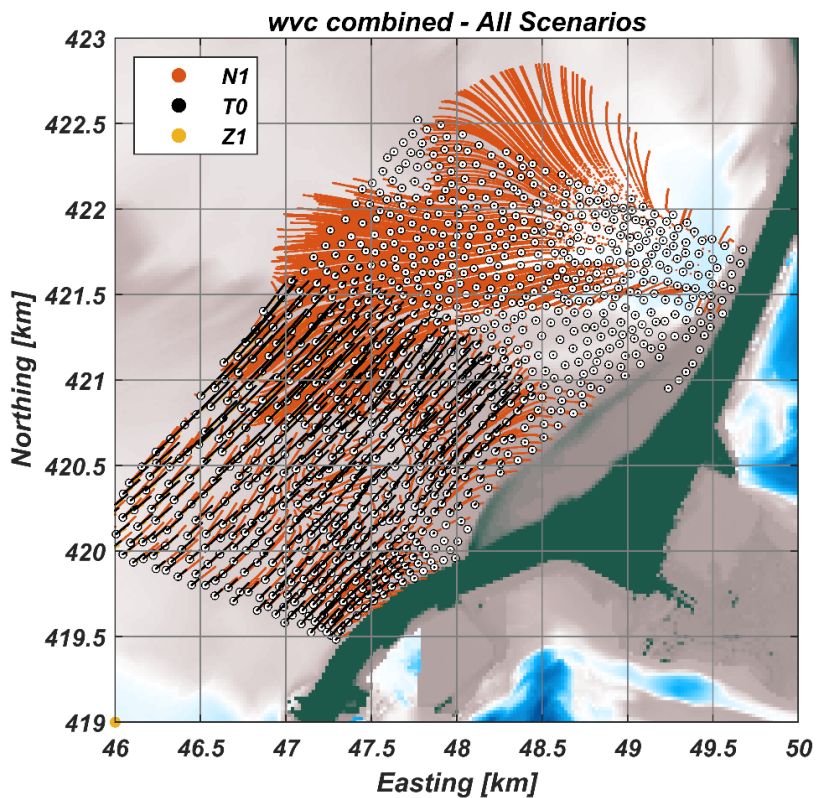


Figuur B- 36: Overzicht van het verschil in instantane transporten op 6 geselecteerde tijdstippen tussen de T0 en N1 simulatie; zoomgebied Renesse (Brouwershavensche Gat) .

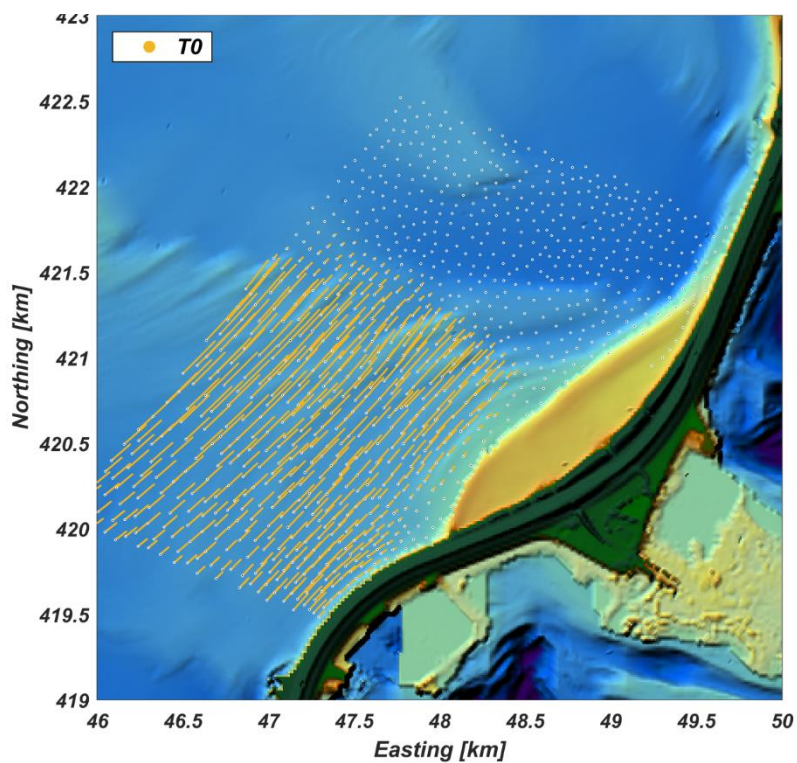


Figuur B- 37: Overzicht van het verschil in instantane transporten op 6 geselecteerde tijdstappen tussen de T0 en N1 simulatie; zoomgebied Bollen van de Ooster (zuidwestpunt).

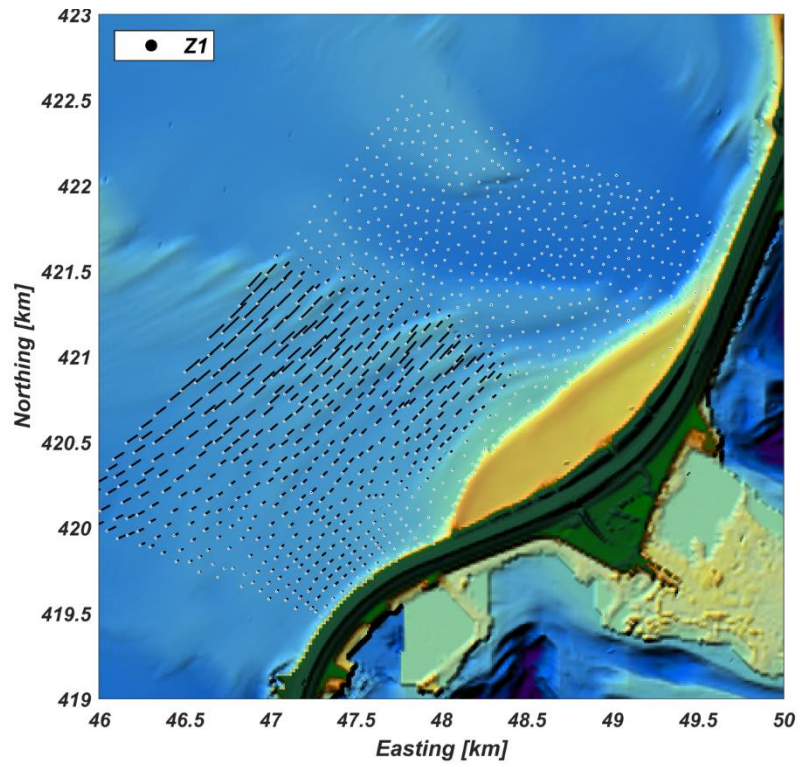
B.6 Strand Brouwersdam



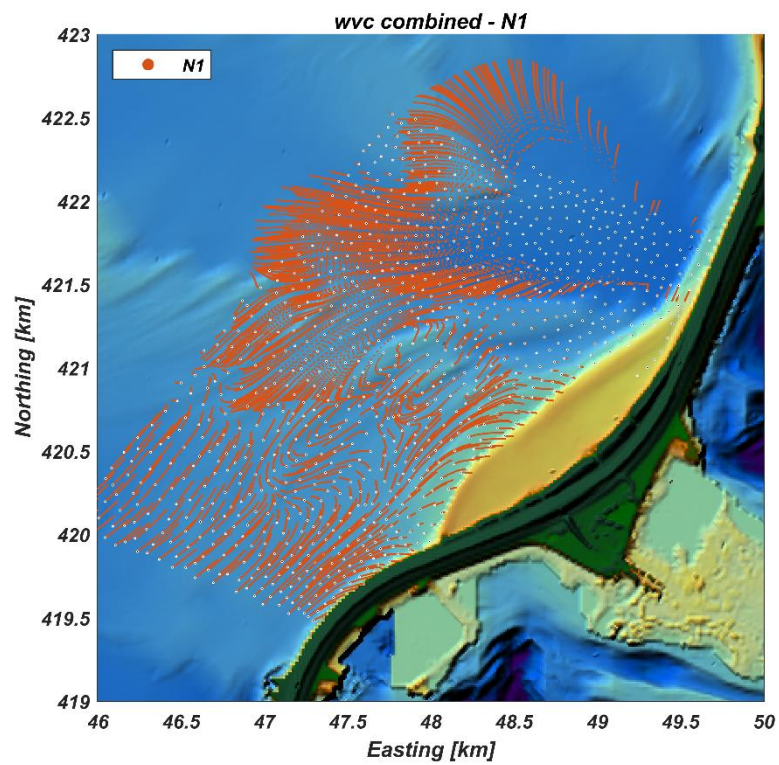
Figuur B- 38: SedTRAILS analyse van Strand Brouwersdam.



Figuur B- 39: Transportpatronen op de Middelplaat langs Strand Brouwersdam voor de jaargemiddelde condities voor de T0 situatie.



Figuur B- 40: Transportpatronen op de Middelplaat langs Strand Brouwersdam voor de jaargemiddelde condities voor de Z1 situatie.

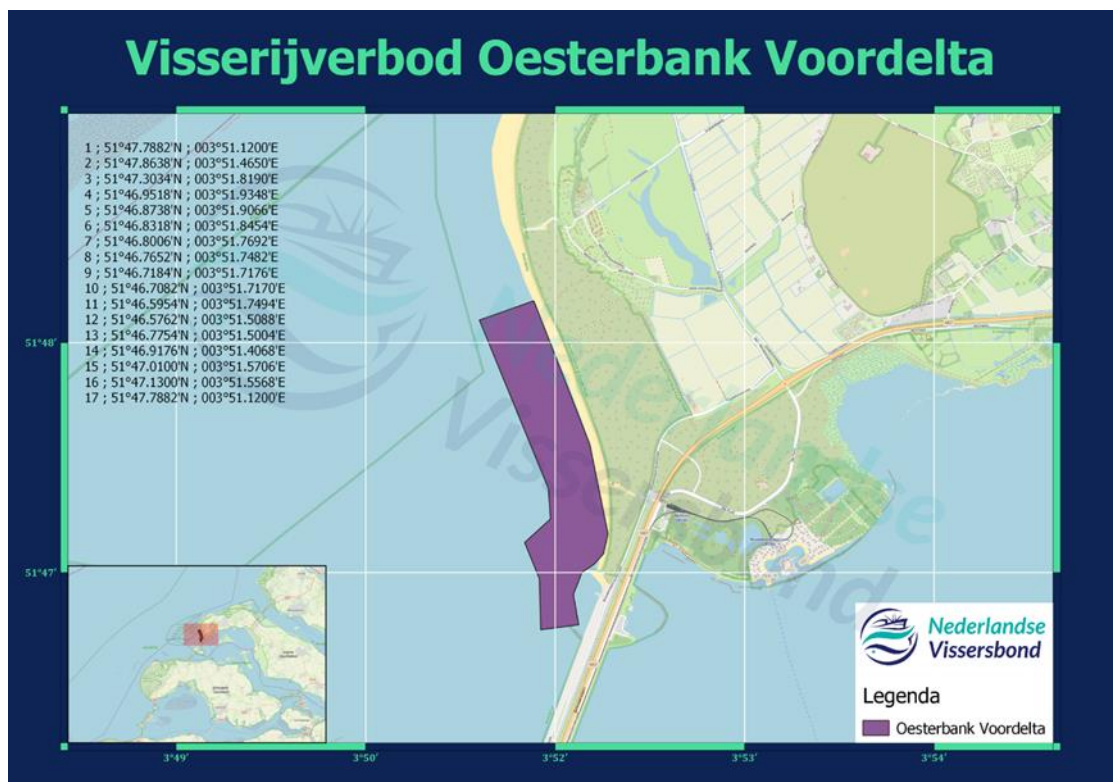


Figuur B- 41: Transportpatronen op de Middelplaat langs Strand Brouwersdam voor de jaargemiddelde condities voor de N1 situatie.

B.7 Aanvullende figuren



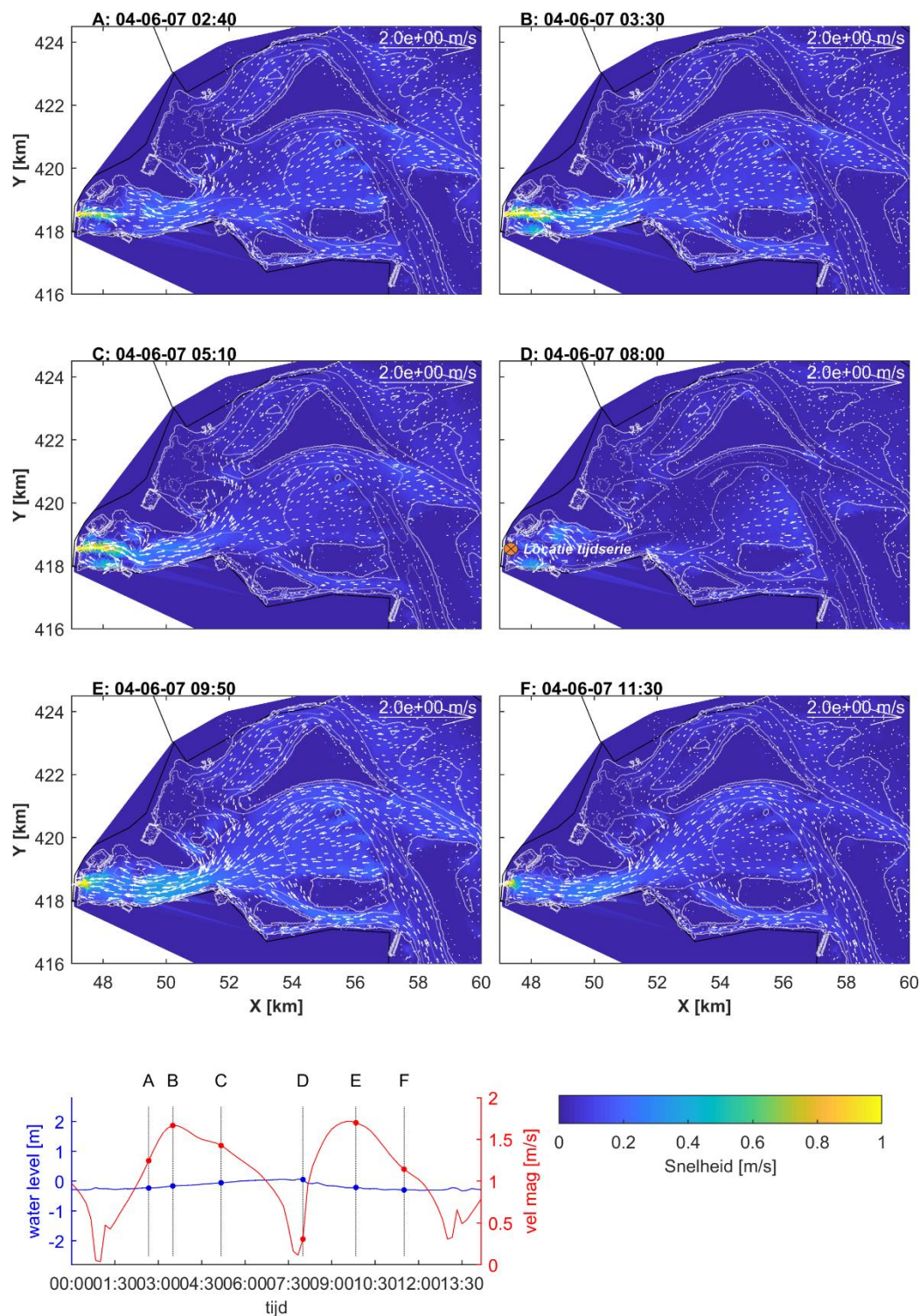
Figuur B- 42: Overzicht van rustgebieden en voorkomen.



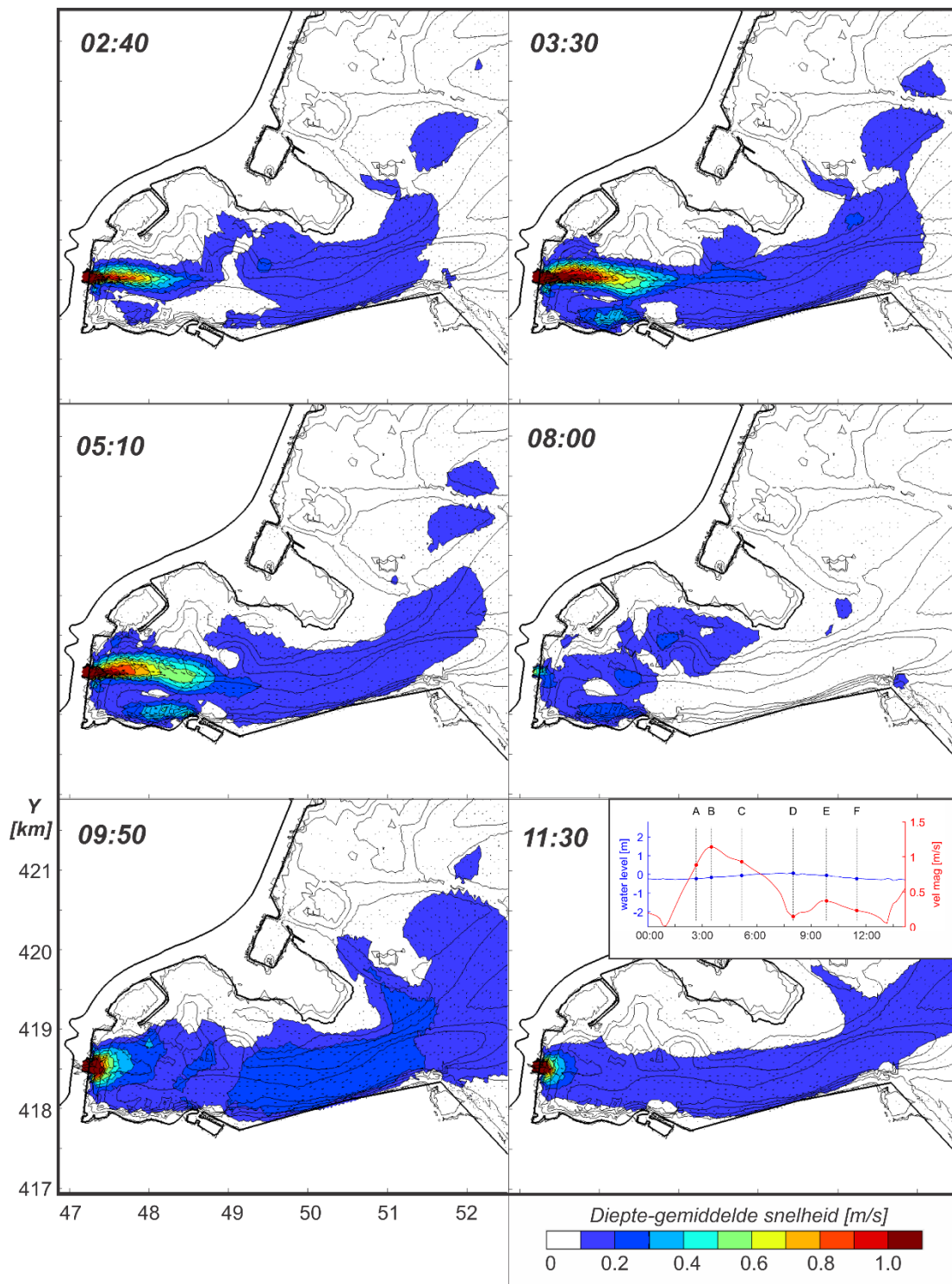
Figuur B- 43: Overzicht ligging schelpdierbanken.

C Modelresultaten Grevelingen

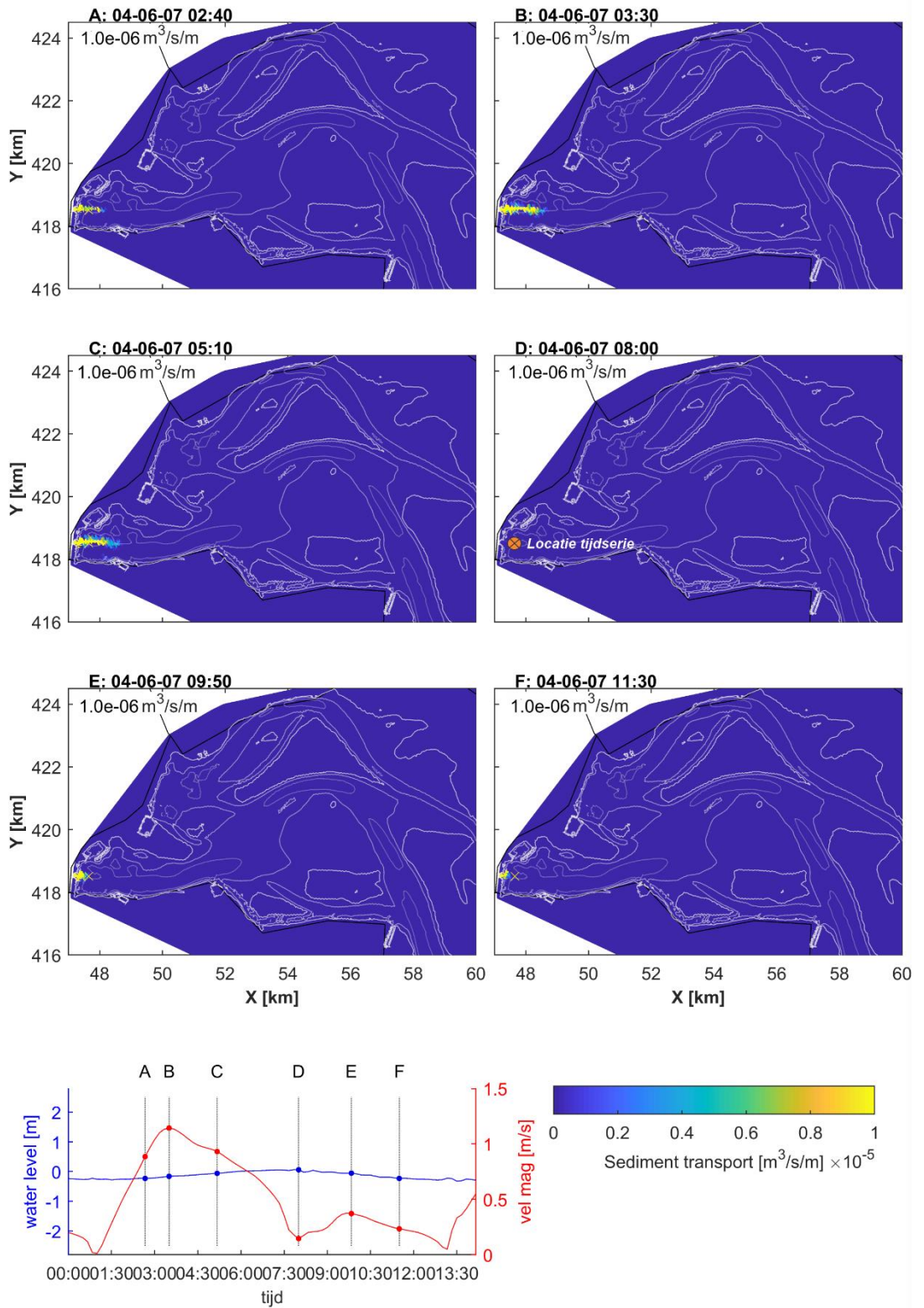
C.1 Doorlaatmiddel zuid



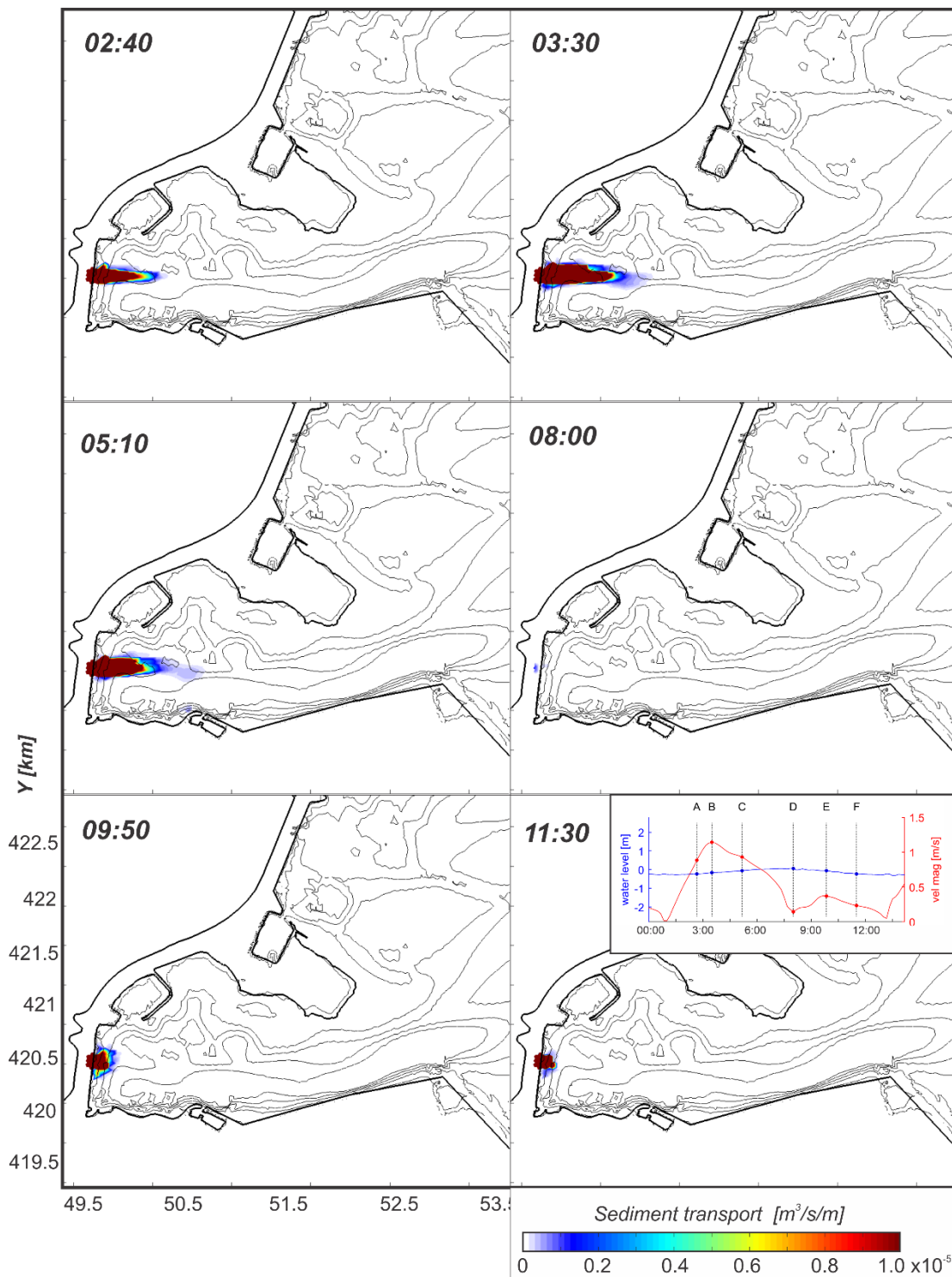
Figuur C- 1: Overzicht van de snelheden op 6 geselecteerde tijdstappen ten gevolge van doorlaatmiddel Zuid.



Figuur C- 2: Overzicht van de snelheden op 6 geselecteerde tijdstappen ten gevolge van doorlaatmiddel Zuid.

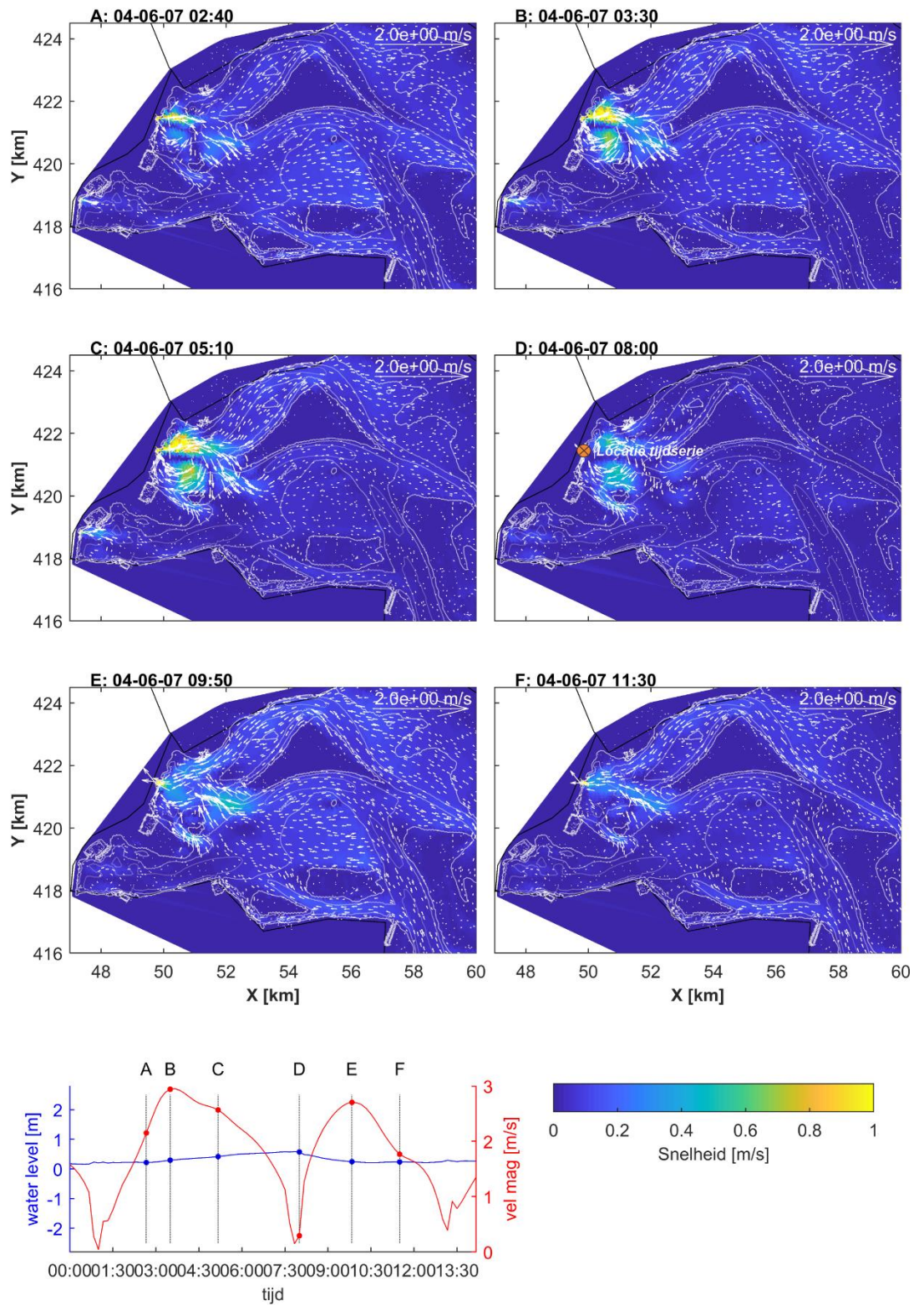


Figuur C- 3: Overzicht van de instantane transporten op 6 geselecteerde tijdstappen ten gevolge van doorlaatmiddel Zuid.

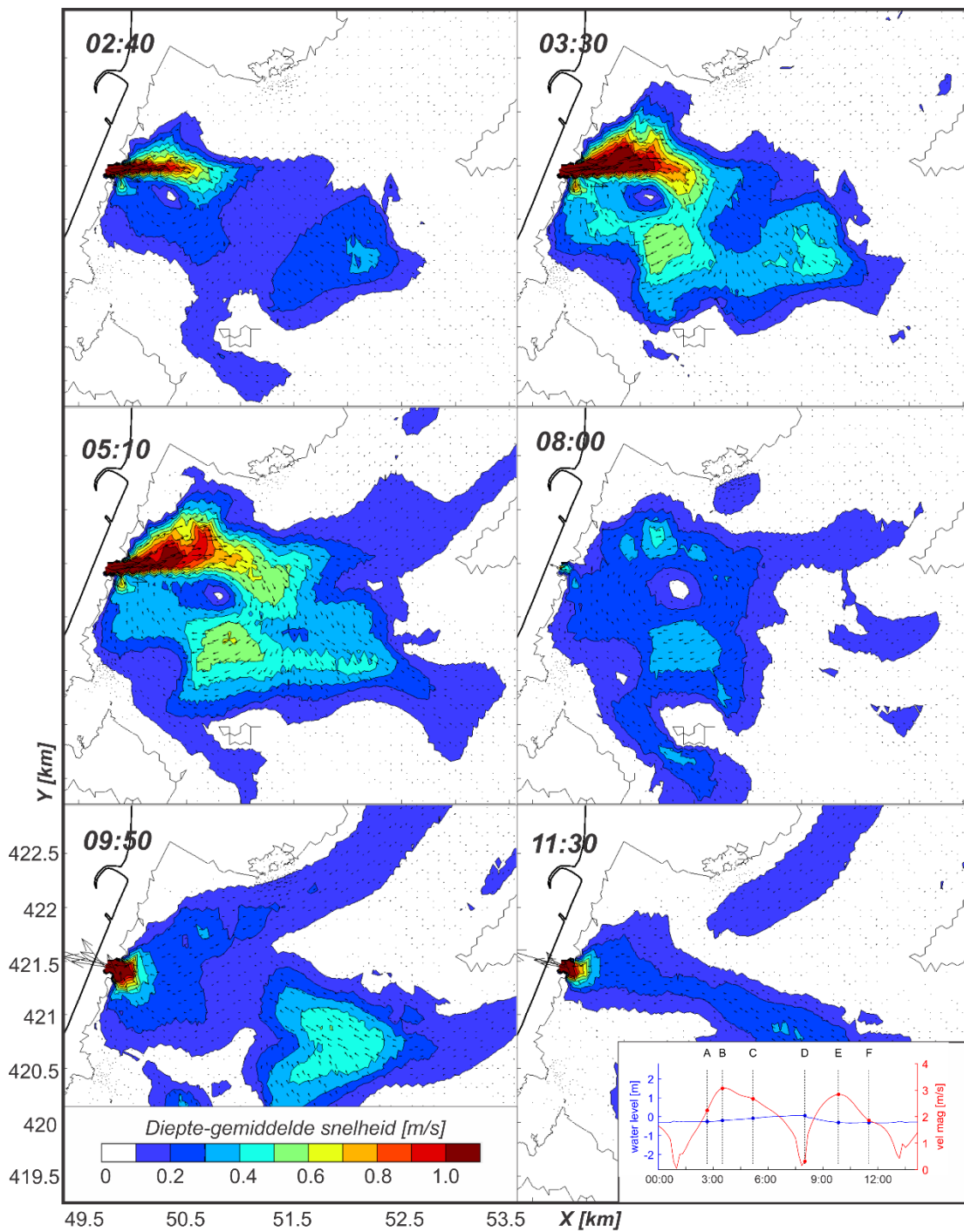


Figuur C- 4: Detail overzicht van de sedimenttransporten op 6 geselecteerde tijdstappen ten gevolge van doorlaatmiddel Zuid.

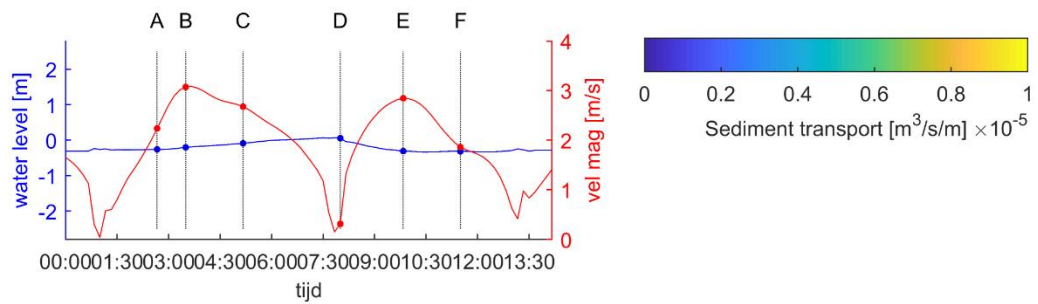
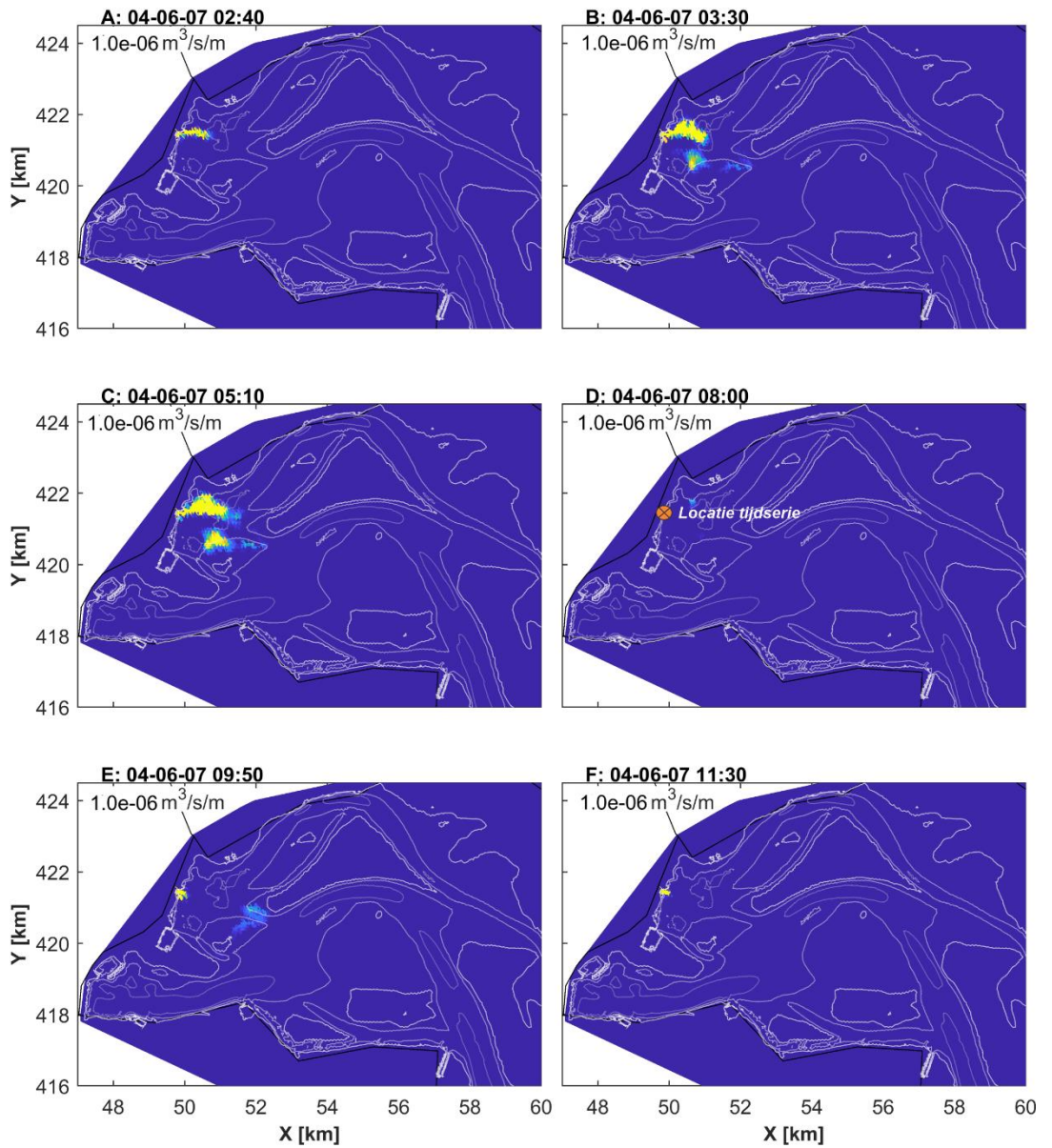
C.2 Doorlaatmiddel Noord



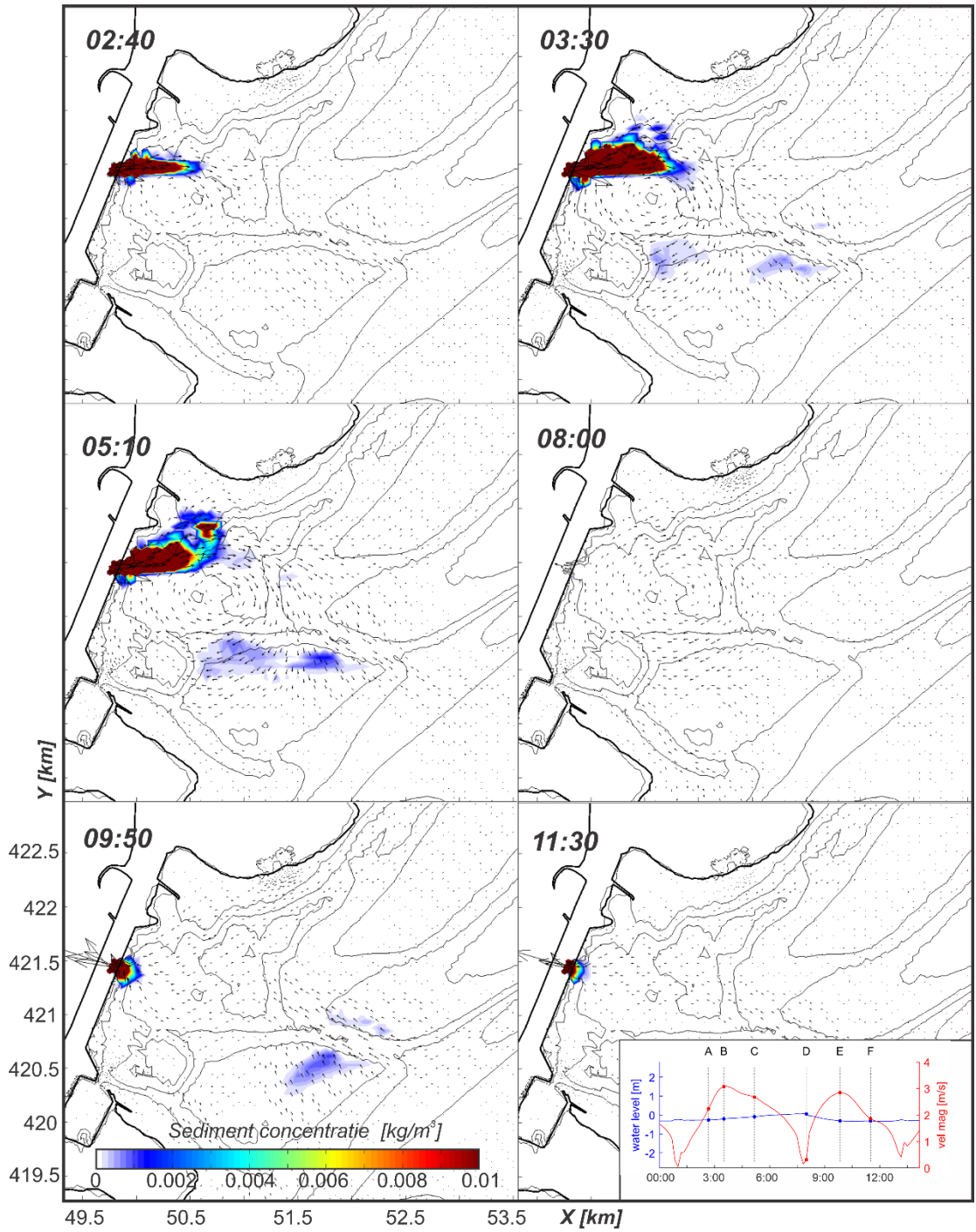
Figuur C- 5: Overzicht van de snelheden op 6 geselecteerde tijdstappen ten gevolge van doorlaatmiddel Noord.



Figuur C- 6: Detail overzicht van de snelheden op 6 geselecteerde tijdstappen ten gevolge van doorlaatmiddel Noord.



Figuur C- 7: Overzicht van de instantane transporten op 6 geselecteerde tijdstappen ten gevolge van doorlaatmiddel Noord.



Figuur C- 8: Detail overzicht van de sediment concentraties op 6 geselecteerde tijdstappen ten gevolge van doorlaatmiddel Noord.

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